

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA APLICACIÓN DE FLEXIGEL Y HEAVY ANFO EN EL PROCESO DE FRAGMENTACIÓN PARA VOLADURAS DE CONTROL”

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

ELABORADO POR:

CARLOS MARTIN QUEZADA VALUIS

ASESOR:

M.Sc. ING. JOSÉ ANTONIO CORIMANYA MAURICIO

LIMA – PERU

2022

DEDICATORIA

A Dios, por su infinita bondad, por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi formación profesional, por haberme dado salud, por los triunfos y momentos difíciles que me han enseñado a valorar su presencia cada día más y por darme lo necesario para seguir adelante cada día.

A mi familia, por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, por los consejos brindados, por los valores inculcados, por la motivación constante que me ha permitido ser una mejor persona, pero sobre todo por su inmenso amor.

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater y maestros, quienes han sido la principal fuente de mi inspiración al impartirme sus conocimientos, enseñanzas y experiencias con las cuales guiaron con éxito mi formación académica.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene por finalidad dar a conocer algunos de los factores que intervienen en una voladura de control en una operación a tajo abierto, enfocándose en la mejora de los mismos a fin de garantizar una óptima granulometría del material disparado. Para tal efecto se identificará si existe algún beneficio, basándonos en los valores de fragmentación que se obtienen al usar la emulsión denominada Flexigel como explosivo en lugar de las mezclas convencionales como el Heavy ANFO.

Partiendo de ello se tomó como instrumento de medición directa los datos de fragmentación P80 de cada agente de voladura y se usará la Prueba T de Student comparando las medias entre los resultados, con ello se determina que la fragmentación obtenida con Flexigel presenta menores valores que el Heavy ANFO, reduciendo su media en 10.85%, para complementar dicho análisis comparativo se considerará también como instrumentos de medición indirecta a los rendimientos del equipo de excavación durante el carguío, los cuales mejoran en 4.78%, así como el flujo pasante y la energía consumida en el proceso de chancado que registran mejoras del 4.52% y 8.12% respectivamente, a partir del uso del Flexigel. Finalmente se buscará dar valor agregado a la comparación de ambos explosivos al contrastar las vibraciones generadas por la detonación cuyos valores disminuyen en un rango del 30% y el ángulo de talud obtenido respecto al ángulo de talud de diseño, establecido por el precorte disparado previamente, mejora en 6° según la reconciliación geotécnica realizada. Teniendo la limitante de que dichas comparaciones se realizan puntualmente en sólo dos disparos se concluye que, aunque el costo del Flexigel es mayor, los indicadores directos e indirectos relativos a la fragmentación mejoran significativamente con el uso de este explosivo.

ABSTRACT

The purpose of this research work is to present some of the factors that intervene in a control blast in an open pit operation, focusing on their improvement in order to guarantee an optimal granulometry of the fired material. For this purpose, it will be identified if there is any benefit, based on the fragmentation values obtained, when using the emulsion called Flexigel as an explosive instead of conventional mixtures such as Heavy ANFO.

Starting from this, the P80 fragmentation data of each blasting agent was taken as a direct measurement instrument and the Student's T-Test will be used comparing the means between the results, with this it is determined that the fragmentation obtained with Flexigel presents lower values than the Heavy ANFO, reducing its average by 10.85%, to complement this comparative analysis, the performance of the excavation equipment during loading will also be considered as indirect measurement instruments, which improve by 4.78%, as well as through flow and energy consumed. in the crushing process that registered improvements of 4.52% and 8.12% respectively, from the use of Flexigel. Finally, it will seek to give added value to the comparison of both explosives by contrasting the vibrations generated by the detonation whose values decrease in a range of 30% and the slope angle obtained with respect to the design slope angle, established by the pre-cut fired previously. 6 ° improvement according to the geotechnical reconciliation carried out. Given the limitation that such comparisons are made punctually in only two shots, it is concluded that, although the cost of Flexigel is higher, the direct and indirect indicators related to fragmentation improve significantly with the use of this explosive.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INDICE

INDICE DE TABLAS

INDICE DE FIGURAS

INTRODUCCIÓN.....	12
CAPÍTULO I GENERALIDADES	13
1.1 La industria minera y la problemática.....	14
1.2 Planteamiento del problema.....	17
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivo específico	19
1.4 Hipótesis	19
1.4.1 Hipótesis general	19
CAPÍTULO II FUNDAMENTO TEÓRICO	20
2.1 Marco Teórico.....	20
2.2 Marco Conceptual	23
2.2.1 Proceso de Voladura de Rocas	23
2.2.2 Explosivos industriales usados en la voladura de rocas	24
2.2.3 Clasificación de los explosivos.....	25
2.2.4 Control de calidad de los agentes de voladura	40
2.2.5 Mecanismo de Fragmentación de la roca.....	45
2.2.6 Tipos de Voladuras	48
2.2.7 Modelos matemáticos para el cálculo de esquemas de voladura en banco	49
2.2.8 Diseño de las mallas de perforación	51
2.2.9 Diseño de mallas de control.....	54
2.2.10 Diseño de carga	55
2.2.11 Ondas observables en una voladura.....	57

2.3 Modelo conceptual.....	59
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	60
3.1 Tipo y diseño de la investigación.....	61
3.1.1 Enfoque	61
3.1.2 Alcance	61
3.1.3 Diseño de investigación	61
3.2 Unidad de análisis	62
3.2.1 Agentes de voladura y explosivos	62
3.3 Etapas de la investigación	63
3.3.1 Población y muestra	65
3.3.2 Recolección de datos	65
3.3.3 Estrategia para la prueba de Hipótesis	68
3.4 Matriz de consistencia.....	72
CAPÍTULO IV APLICACIÓN Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS	74
4.1 Aplicación específica	74
4.1.1 Voladura SR2378-0522	75
4.1.2 Voladura SR2363-0517	79
4.2 Obtención de resultados	82
4.2.1 Resultados Voladura SR2378-0522	82
4.2.2 Resultados Voladura SR2363-0517	86
4.2.3 Preparación y análisis de la información	90
4.2.4 Comparación de resultados	94
CAPÍTULO V ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS. 95	95
5.1 Análisis de resultados	95
5.1.1 Análisis de validez interna	95
5.1.2 Análisis de validez externa	99
5.2 Determinación de la normalidad de los datos	100
5.2.1. Supuesto de normalidad	101
5.2.2. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov	107
5.3 Contrastación de la Hipótesis general.....	108
5.4 Discusión de resultados.....	110
5.4.1 Características de los datos obtenidos de fragmentación P80	110

5.4.2 Fragmentación y costo	111
5.4.3 Rendimiento de equipo de excavación, flujo de chancado	112
5.4.4 Niveles de vibración y ángulo de talud obtenido	115
5.5 Nuevas líneas de investigación	117
CONCLUSIONES	118
RECOMENDACIONES.....	120
BIBLIOGRAFÍA	121
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades técnicas del Flexigel.	38
Tabla 2 Registro de calibración de camión fábrica Q-19 en Nitrato de Amonio.	43
Tabla 3 Valores de Kb según el tipo de roca y explosivo	50
Tabla 4 Correcciones para el cálculo del burden.	52
Tabla 5 Diseño básico de voladura.	56
Tabla 6 Productos Standar de la EE de voladura.	63
Tabla 7 Productos Premiun de la EE de voladura.	63
Tabla 8 SDR cuadro resumen	67
Tabla 9 Matriz de consistencia.....	73
Tabla 10 Factor de Potencia y costo de explosivos SR2378-0522.....	78
Tabla 11 Factor de Potencia y costos de explosivos SR2365-0517	81
Tabla 12 Resultados del rendimiento Pala12 en el proyecto SR 2378-0522.	85
Tabla 13 Resultados de los flujos de chancado y potencia SR 2378-0522.	85
Tabla 14 Resultados del rendimiento Pala12 en el proyecto SR 2365-0517.	89
Tabla 15 Resultados de los flujos de chancado y potencia SR 2365-0517.	89
Tabla 16 Valores de P80 sin tratamiento estadístico.....	90
Tabla 17 Valores de P80 para ambos explosivos.....	93
Tabla 18 Cuadro comparativo de resultados.	94
Tabla 19 Frecuencias valores fragmentación P80 Heavy ANFO.	101
Tabla 20 Frecuencias valores fragmentación P80 Flexigel.....	102
Tabla 21 Estadísticos de los valores fragmentación P80 Heavy ANFO y Flexigel.	104
Tabla 22 Prueba de normalidad.....	108
Tabla 23 Prueba T de Student de una cola.....	109
Tabla 24 Niveles de vibración registrados	115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Tipos de reacciones de acuerdo a la cinética química	24
Figura 2	Detonador Exel MS de 600 ms.....	26
Figura 3	Componentes de la cápsula detonante del Exel 600 ms	27
Figura 4	Partes del tubo de choque del Exel 600 ms	28
Figura 5	Detalle de los elementos del Exel 600 ms	29
Figura 6	Detonador I-KON.....	29
Figura 7	Productos iniciados por el detonador pirotécnico y electrónico.....	30
Figura 8	Pentex CD de 450.....	32
Figura 9	Cordón detonante (CORDTEX).....	33
Figura 10	Efecto de la detonación en el cordón detonante	33
Figura 11	Gránulos o prills de ANFO.....	34
Figura 12	Variación de energía, VOD y gases con el contenido de D2.....	35
Figura 13	Emulsión matriz	36
Figura 14	Muestras del agente de voladura Flexigel	37
Figura 15	Estructura del Heavy ANFO	39
Figura 16	Aplicación del Heavy ANFO en el carguío de taladros	39
Figura 17	Control de calidad mediante medición de densidades en campo.	41
Figura 18	Densidades de algunos agentes de voladura.....	41
Figura 19	Separación de fases para el cálculo del % de petróleo	42
Figura 20	Temperatura de emulsión.	43
Figura 21	Velocidad de detonación para ANFO (0.78 gr/cc).....	44
Figura 22	Proceso de detonación de los taladros	45
Figura 23	Propagación de las ondas de choque entre los taladros.....	46
Figura 24	Expansión de los gases.....	46
Figura 25	Desplazamiento del material.	47
Figura 26	Representación gráfica de las voladuras de control y producción.....	49
Figura 27	Matriz índice de fragmentación.....	53
Figura 28	Malla de un proyecto de control	54
Figura 29	Perfil de banco de minado	55
Figura 30	Información geológica y geotécnica.....	57
Figura 31	Dirección de propagación de la onda P y S.....	58
Figura 32	Dirección de propagación de la onda R.....	59
Figura 33	Modelo conceptual de la investigación.....	59
Figura 34	Primado y carguío de taladros.....	64
Figura 35	Sistema de toma de fotografías en la pala.....	66
Figura 36	Circuito de chancado primario.....	68
Figura 37	Distribución normal o Campana de gauss.....	70
Figura 38	Coficiente de asimetría y de curtosis.....	71
Figura 39	Perfiles de los proyectos a evaluar.....	75
Figura 40	Diseño de cargas SR 2378-0522 para zonas con roca dura y media.....	76

Figura 41	Plano de detalles y ubicación SR 2378-0522.	77
Figura 42	Diseño de cargas SR 2363-0517 para zonas con roca dura.	79
Figura 43	Plano de detalles y ubicación SR 2363-0517.	80
Figura 44	Imágenes obtenidas SDR SR 2378-0522.....	82
Figura 45	Registro vibraciones obtenidas SR 2378-0522.....	83
Figura 46	Reporte Geotécnico SR2378-0522	84
Figura 47	Imágenes obtenidas SDR SR 2363-0517.....	86
Figura 48	Registro vibraciones obtenidas SR 2363-0517.....	87
Figura 49	Reporte Geotécnico SR2363-0517.	88
Figura 50	Análisis de valores atípicos por caja y bigotes	92
Figura 51	Histograma valores fragmentación P80 Heavy ANFO.	102
Figura 52	Histograma valores fragmentación P80 Flexigel.....	103
Figura 53	Gráfico q-q Flexigel.	106
Figura 54	Gráfico q-q Heavy ANFO.	106
Figura 55	Gráfico Rendimiento promedio de la pala.....	112
Figura 56	Gráfico Rendimiento promedio flujo de chancado.....	113
Figura 57	Gráfico Potencia promedio consumida.....	113
Figura 58	Perfil de talud promedio según escaneo.	116

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la industria minera ha vivido un periodo de expansión sin precedentes en todo el mundo. Desde inicios del presente siglo se ha producido un importante crecimiento y, con él, el desarrollo de la ingeniería se ha convertido en una parte integral de las operaciones mineras.

En ese sentido, la minería a cielo abierto depende, en gran medida, del éxito de las voladuras. La voladura, como uno de los primeros trabajos en instalaciones con un gran número de clientes, puede minimizar el costo de las obras y servicios posteriores si se hace correctamente.

Por otro lado, el P80 es un indicador del tamaño de las partículas de un material de muestra, dado que este permite evidenciar si el mismo en su conjunto es grueso o fino. Este se deriva de la curva de granulometría y representa el tamaño de las partículas ideales si el 80% de todos los fragmentos son más pequeños que este tamaño. Entonces, al poseer un valor de P80 menor, implica que se maneja un menor tamaño en los fragmentos generados por la voladura, lo que hará más fácil el proceso de chancado, transporte, entre otros.

Es por ello que surge la necesidad de comparar la fragmentación obtenida por el Flexigel y Heavy ANFO en el proceso de voladuras de control en una empresa minera. Mencionado lo anterior, esta investigación está estructurada de la siguiente manera:

Capítulo I, Generalidades; considera la problemática, formulación del problema, objetivos, justificación, hipótesis del estudio.

Capítulo II, Fundamento teórico, se exponen las principales teorías y conceptos que son necesarios para entender la investigación.

Capítulo III, Metodología; comprende el tipo de investigación, las técnicas e instrumentos de recolección de datos, campo de verificación y las estrategias de recolección de datos.

Capítulo IV, Aplicación y obtención de los resultados, se muestra como fue la recolección de datos en campo y la metodología seguida para obtenerlos.

Capítulo V, Análisis de resultados y contrastación de hipótesis; se muestran el procesamiento y análisis de la información, comprobación de la hipótesis y discusiones.

Conclusiones y recomendaciones, en este apartado se muestran las conclusiones y recomendaciones de la presente investigación resaltando los beneficios que se pudieron corroborar al usar el Flexigel en lugar del Heavy ANFO.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

En la industria minera la fragmentación de las rocas siempre ha sido el inicio de una serie de procesos que nos conducen finalmente a la recuperación del mineral, la roca adquiere un tamaño que hace viable su transporte cuando es fragmentada, es decir lo que se busca es poder fragmentar la roca para cargarla y transportarla de manera eficiente hacia la planta, por ello para arrancar la roca y fragmentarla de manera apropiada es clave el uso de explosivos adecuados y es ahí donde las empresas mineras direccionan parte de sus esfuerzos desarrollando nuevas tecnologías en explosivos buscando mayor poder rompedor y fragmentación más fina con el objetivo de mejorar los resultados de sus voladuras. Una adecuada fragmentación permitirá maximizar el desempeño de los procesos posteriores impactando de manera significativa en la rentabilidad de cualquier operación influyendo sobre los costos en las etapas de carguío, acarreo, chancado y molienda.

El investigador ha revisado en la literatura que la gran mayoría de estudios orientados a la búsqueda de mejoras en fragmentación a partir de la implementación de nuevas

mezclas explosivas están basados en proyectos de producción, por lo cual se toma por conveniente la justificación para la elaboración del presente trabajo de suficiencia a fin de brindar nuevos conocimientos acerca de cómo sentar las bases para realizar una adecuada comparación de agentes de voladura considerando como eje las mejoras en los valores de fragmentación para el caso de voladuras de control.

En este capítulo se conocerán las investigaciones en las que se fundamenta el presente trabajo de suficiencia profesional, cuyo objeto de su realización es sentar algunas de las bases para realizar un análisis comparativo entre cualquier mezcla explosiva mediante un análisis estadístico y de prueba de hipótesis a fin de ser de utilidad para futuras investigaciones en las que estén incluidos nuevos productos explosivos que salgan al mercado. Asimismo, se pretende brindar un punto de inicio para entender la realidad problemática que está observando el investigador planteándose el problema fundamental a partir de las preguntas de investigación y la justificación de la misma, se propone además los objetivos a los que se desea llegar a partir de la aprobación o desaprobación de la hipótesis la cual será validada al final de la presente investigación.

1.1 La industria minera y la problemática

En los últimos 25 años la industria minera ha vivido un periodo de expansión sin precedentes en todo el mundo. Desde principios de la década de los noventa se ha producido un importante crecimiento y, con él, el desarrollo de la ingeniería se ha convertido en una parte integral de las operaciones mineras. Este importante cambio fue impulsado por una normativa de seguridad minera más estricta, que entró en vigor en esos años, así como el reconocimiento gradual por parte de la comunidad minera

del valor de la ingeniería para optimizar los procesos mineros, al igual que las ganancias que genera dicha actividad (Bravo, 2018).

En ese sentido, la minería a cielo abierto depende, en gran medida, del éxito de las voladuras. La voladura, como uno de los primeros trabajos en instalaciones con un gran número de clientes, puede minimizar el coste de las obras y servicios posteriores si se hace correctamente. (Romero, 2016)

Por otro lado, el P80 es un indicador del tamaño de las partículas de un material de muestra, dado que este permite evidenciar si el mismo en su conjunto es grueso o fino. Este se deriva de la curva de granulometría y representa el tamaño de las partículas ideales si el 80% de todos los fragmentos son más pequeños que este tamaño. Así, por ejemplo, si el P80 de la distribución del tamaño de las partículas es de 120 mm, significa que el 80% de todos los fragmentos son menores de 120 mm (Cruz, 2018).

Entonces, al poseer un valor de P80 menor, implica que se maneja un menor tamaño en los fragmentos generados por la voladura, lo que hará más fácil el proceso de chancado, transporte, entre otros (Alcalde, 2019).

Para llevar a cabo este proceso con éxito, es necesario conocer algunos parámetros que caracterizan al explosivo o la mezcla explosiva. Se necesita conocer sus propiedades, como la energía explosiva disponible, la presión de detonación, la presión del taladro, la calidad del humo, entre otros, para que sean compatibles con los requisitos de calidad de la empresa donde se lleve a cabo (Rodríguez, 2020).

Por otro lado, es relevante la distribución de la energía de la explosión en cualquier voladura. Esta debe ser la adecuada ya que debe corresponder a las necesidades

energéticas de la roca para permitir un valor óptimo del factor P80 y que sea lo más bajo posible (Rodríguez, 2020).

En el contexto del Perú, donde la minería es una actividad de alto rendimiento para el país, es importante destacar la importancia del proceso voladura que inicia la fase de producción de cualquier complejo minero. De acuerdo con Chambi (2018), los resultados de esta llamada voladura afectan el 99% de la rentabilidad de la explotación minera y, en particular, a las operaciones mineras unitarias posteriores como el carguío, el transporte, la trituración, entre otros.

Dado que la voladura tiene un impacto significativo en la mina, se requiere una fragmentación adecuada de la roca para maximizar la eficiencia de los procesos posteriores (Salvador et al., 2016).

Dentro de los tipos de explosivos que son usados en la industria, en primer lugar, está el Heavy ANFO que es usado de manera tradicional en el Perú, siendo una mezcla de emulsión base a granel con ANFO en cuya preparación, se llega a aprovechar cada uno de los espacios intersticiales existentes entre los prills de ANFO, los cuales pueden ser ocupados básicamente por un explosivo líquido como la emulsión, actuando de esa manera como una matriz energética. Aunque este último es muy usado en la industria actual en el Perú, el objetivo es mejorar los estándares de fragmentación, los cuales tienen un impacto en toda la cadena de producción en cuanto a costos, es por ello que se investigará el comportamiento de otros explosivos (Alcalde, 2019).

La gran mayoría de las empresas mineras al ir profundizando sus unidades en búsqueda del mineral han ido encontrando rocas cada vez más duras especialmente al superar la

transición de óxidos a otra forma de mineralización de tipo sulfuro, para fragmentar dicha roca han iniciado con la implementación de explosivos con mayor poder rompedor como es el caso de las emulsiones, siendo su implementación en la industria peruana todavía relativamente lenta debido a sus costos, aunque hay que destacar que las nuevas emulsiones que van saliendo al mercado permiten un carguío automatizado, lo que evita exponer a las personas a potenciales riesgos propios de la operación, así como también brinda la alternativa de ser fabricada a la medida del cliente, es decir se puede ajustar la emulsión de acuerdo el tipo de roca realizando esas combinaciones en medio de un continuo proceso de aprendizaje. (Romero, 2016)

Por otro lado, se tiene el Flexigel, que es un explosivo de densidad variable y es a base de una nueva emulsión y poliestireno fabricado especialmente con una densidad y tamaño determinado. Este, al ser un explosivo poco común en la industria, su campo de aplicación es limitado y se posee poca información referencial, motivo por el cual resulta de interés comparar su rendimiento en campo con respecto al heavy ANFO en búsqueda de menores espesores de la roca durante el proceso de voladuras de control (Chambi, 2018).

1.2 Planteamiento del problema

En el Perú, la evolución de los agentes utilizados en las voladuras ha ido variando y mejorando a través de los años con respecto a su liberación de energía para obtener mejores resultados en los procesos mineros como es la voladura; es por ello que es importante conocer las ventajas que se obtienen al probar nuevos explosivos en el proceso minero.

Esto podría lograrse a través de la experimentación con nuevos explosivos, dejando atrás los tradicionales como el Heavy ANFO y utilizando las nuevas propuestas del mercado. Esto no solo podría generar mejores valores del factor P80, el cual es uno de los factores a estudiar, sino que también se espera que al lograr disminuir dicho factor se llegue a mejorar los procesos posteriores como el carguío y chancado, haciendo más rentable la actividad minera.

Para todas las unidades mineras el obtener una buena fragmentación es un objetivo fundamental para sus equipos de voladura, especialmente cuando se está minando en las fases donde predomina la roca dura (alto RQD y UCS), como suele ser en los sectores más profundos de los tajos, teniendo además en cuenta que dichas zonas profundas en algún momento son las que abastecen la mayor cantidad de tonelaje a las chancadoras primarias, es por esto que obtener una buena fragmentación en los procesos de voladuras de control en zonas de mineral, en donde además se suele presentar algunos casos de material sobredimensionado, se vuelve también de vital importancia para todos los procesos productivos de las empresas mineras.

Es por ello que se genera la siguiente pregunta de investigación:

¿En qué medida se mejora la fragmentación al emplear Flexigel en lugar de Heavy ANFO en los procesos de voladuras de control en una operación a tajo abierto?

Del mismo modo se generó la siguiente pregunta específica a partir de esta:

- ¿Cuál de los dos agentes de voladura, como lo son Flexigel y el Heavy ANFO, impacta de mejor forma en los procesos posteriores como el carguío y chancado en una operación a tajo abierto?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Mejorar la fragmentación P80 obtenida con el uso del Flexigel en lugar del Heavy ANFO para el proceso de voladuras de control en una operación a tajo abierto.

1.3.2 Objetivo específico

- Definir el impacto de los dos agentes de voladura en los procesos de carguío y chancado.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

La fragmentación P80 con el uso del Flexigel en el proceso de voladuras de control en una operación a tajo abierto es mejor o menor al obtenido con el uso del Heavy ANFO.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán las bases teóricas que sustentaran la investigación, así como los antecedentes que se tomaron en cuenta como guía y que servirán para la comparación de resultados. El objetivo del fundamento teórico es aportar los conceptos necesarios para que el lector pueda comprender de forma clara los resultados del trabajo de investigación.

2.1 Marco Teórico

Para este apartado se describirán los antecedentes tomados en cuenta para sustentar la presente investigación, empezando desde la perspectiva internacional con Bravo (2018), en su investigación “Estudio de vibraciones inducidas por voladura en minera Spence” en la universidad de Chile, Santiago de Chile, para optar al título de ingeniero civil de minas. Cuyo objetivo fue el análisis del comportamiento de vibraciones inducidas por voladura para las distintas Unidades Geotécnicas en Minera Spence, con

la finalidad de minimizar el daño transmitido al macizo rocoso y evitar futuros deslizamientos. Desde el punto de vista metodológico, fue de campo, de nivel descriptivo, y de corte transversal. Concluyendo que la ejecución de la perforación y la voladura en Minera Spence fue correcta, lo que supuso unos costos bajos para un mejor control de los daños. Sin embargo, la condición en la que se evalúa el comportamiento de la roca es consistente con la secuencia normal más comúnmente realizada en una mina, es decir, una secuencia completa de perforación y liberación como: voladura en taladros de precorte, voladura en taladros de producción y, por último, voladura en taladros de amortiguación.

Del mismo modo se tuvo a Salvador et al (2016) en su artículo titulado “Relación entre los parámetros de voladura y la estabilidad de zonas con restricción geotécnica” en Santiago de Chile. Cuyo objetivo fue el conocimiento y análisis de los parámetros de voladura y su influencia en las vibraciones y desplazamientos de estructuras en una zona de restricción geotécnica. Metodológicamente se llevó a cabo un estudio con un diseño experimental, de nivel descriptivo y longitudinal. En relación a los resultados se obtuvo que el control sobre la dirección y secuencia de salida de la voladura son parámetros que influyen en el control de la estabilidad de los taludes, independientemente del tipo de voladura o energía inducida, es por ello que se debe seleccionar el explosivo adecuado.

Desde el punto de vista nacional se tuvo a Chambi (2018) en su tesis titulada “Aplicación de Flexigel en voladuras de control - Orica Mining Services S.A. - Mina Cerro Verde” cuya finalidad fue el conocer los beneficios de la aplicación del Flexigel, en voladuras de control, además de la influencia que tiene la distribución de energía

del explosivo dentro del taladro, controlando el daño inducido al macizo rocoso y mejorando la fragmentación. Desde el punto de vista metodológico, fue de tipo aplicada, diseño experimental y nivel explicativo. Como conclusiones tuvo que el uso de Flexigel aumenta el costo de los explosivos en un 5,74% en comparación con el uso de HA37, pero los beneficios son mayores, ya que se ahorra en la nueva trituración para la voladura secundaria, se reduce la cantidad de pellets, la carga y el transporte, además de un mayor ahorro en todo el proceso de trituración y molienda debido a la reducción de la fragmentación; se recomienda el cambio.

Por otro lado, se tuvo a Rodríguez (2020) en su investigación titulada “Beneficios en la optimización de la fragmentación de la roca mediante la aplicación de emulsión gasificada en voladura a tajo abierto en la empresa de explosivos Orica en el 2020” cuyo objetivo fue la determinación del beneficio que conlleva la mejora de la fragmentación de la roca aplicando emulsión gasificada en voladura a tajo abierto. Dentro de sus aspectos metodológicos se encontró que fue de tipo aplicada y experimental. Entre sus conclusiones se tuvo que el uso de la emulsión gasificada mejora cuantitativamente el proceso de fragmentación de la roca ya que, al ser un medio de mayor liberación de energía, fragmenta adecuadamente la roca dentro de los límites prescritos con resultados de tamaño de partícula de 6,39 pulgadas, lo que se toma como una mejora en los requisitos operativos, mejora aún más la fragmentación de la misma, el rendimiento de esta ventaja da la mejora en el tiempo y el costo para el manejo y transporte de materiales, la mejora en el proceso, la mejora en la recuperación de los minerales.

Finalmente, Alcalde (2019) en su tesis “Emulsión gasificada en reemplazo de heavy ANFO para reducir el P80 en la fragmentación e incrementar la productividad en carguío, acarreo y chancado en mina Shougang Hierro Perú” cuyo objetivo fue la determinación del grado de disminución de la fragmentación mediante pruebas de campo y evaluar el aumento de la productividad de los equipos de carguío, acarreo y chancado. Desde el punto de vista de la metodología fue de tipo experimental, aplicado, y explicativo. Como resultados tuvo que el P80 promedio de fragmentación con HA55 es de 9.46” lo cual está por encima del P80 aceptado por planta (9”), con SAN-G APU el P80 promedio de la fragmentación es de 7.18”; los proyectos disparados con emulsión gasificada de SAN-G APU han generado una disminución en la fragmentación del 24% con respecto al HA55.

2.2 Marco Conceptual

En este apartado se comprende como marco conceptual dentro de esta investigación al conjunto de conocimientos y definiciones básicas, que constituyen los fundamentos para entender los elementos de los procesos del conocimiento relacionados a la identificación de las variables involucradas en la operación unitaria de la voladura y que permitieron trazar los problemas específicos del presente estudio de investigación, de acuerdo a la problemática que se plantea, a fin de absolverlos con el desarrollo de cada una de las bases del presente trabajo de suficiencia profesional.

2.2.1 Proceso de Voladura de Rocas

De acuerdo a Bravo (2018), la voladura es la operación unitaria más significativa de entre todas las actividades que forman parte del ciclo de minado, permitiendo no solamente en su proceso el obtener el material apropiadamente fracturado y

apilado, sino que además con ello se debe conseguir una alta eficiencia en el ciclo en conjunto (carguío, transporte y tratamiento metalúrgico), con el fin de no dañar las estructuras y mantener estándares de seguridad adecuados para así poder mantener los costos al mínimo posible.

2.2.2 Explosivos industriales usados en la voladura de rocas

Según Bernaola et al (2013) los explosivos industriales son formados en base a una mixtura de sustancias entre ellas combustibles y comburentes, que al ser iniciadas de manera adecuada generan una reacción química con una particularidad fundamental, la cual es su rapidez, esta rapidez indica el estado de la reacción, generalmente un estado de detonación como se muestra en la figura 1. En caso de no iniciarse de manera adecuada, el mismo producto puede generar un estado de deflagración, o incluso un estado de combustión, el cual indicaría que el comportamiento del producto no es el que se esperaba.

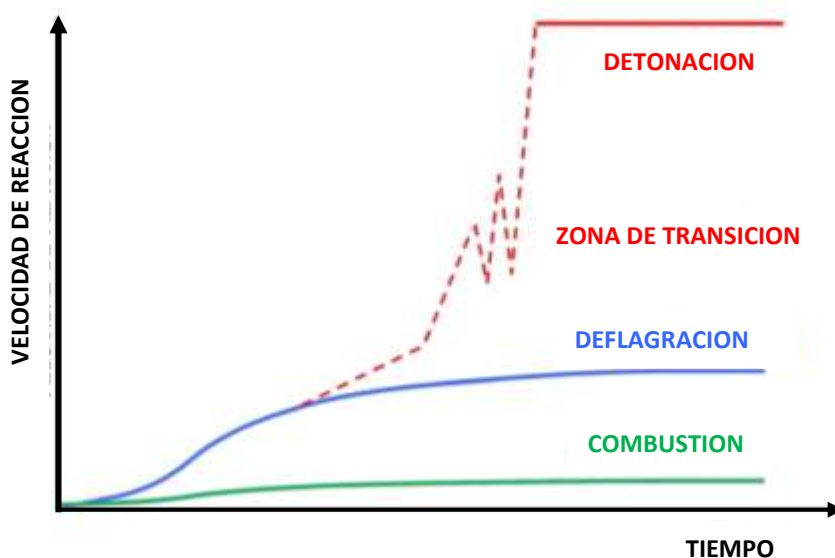


Figura 1 Tipos de reacciones de acuerdo a la cinética química

Fuente: Bernaola (2013).

La reacción que se genera origina gases a alta temperatura y presión, los cuales serán las responsables del movimiento del material disparado y de la fragmentación. Se considera que cada uno de los explosivos posee una estructura definida y específica. Lo que quiere decir que cada una de sus características son distintas, y como resultado de ello, cada uno de los explosivos tiene una aplicación diferente según las necesidades de cada voladura.

2.2.3 Clasificación de los explosivos

Según López Jimeno (1994), los explosivos usados en minería se dividen en explosivos primarios y explosivos secundarios, de acuerdo a su aplicación, los cuales se describirán a continuación:

▪ Los explosivos primarios

De acuerdo a Romero (2016), los explosivos primarios debido a su alta energía y sensibilidad, se usan como iniciadores de los explosivos secundarios; entre ellos se pueden señalar a los compuestos destinados a los detonadores y reforzadores como pentrita, azida de plomo, fulminatos, etc.

Se caracterizan por ser muy sensibles y con alta posibilidad de detonar mediante fuerzas externas de fricción, estiramientos, presión, calor, golpe, aplastamiento, etc. Dentro de la unidad minera en estudio se cuentan con los siguientes explosivos primarios:

- ✓ Detonador Exel MS de 600 ms (13.4 y 25 metros).
- ✓ Detonador I-kon (15 y 30 metros).
- ✓ Detonador I-kon RX reforzado (15 y 30 metros).

- ✓ Detonador Exel conectadet de: 17, 25, 35, 42, 65 y 100 ms.
- ✓ Detonador Exel ms conector (bidireccional).
- ✓ Detonador Exel TD de 0 ms (línea silenciosa).

a) Detonador Exel MS de 600 ms

Según Romero (2016), es un detonador no eléctrico de alta potencia empleado para poder iniciar en forma precisa y segura a cada uno de los explosivos sensibles al fulminante de fuerza 12 y tiene un retardo de detonación de 600 ms.



Figura 2 Detonador Exel MS de 600 ms

Fuente: Sánchez (2015).

El Exel MS de 600 ms es conectado con el Pentex formándose el cebo o prima y colocado a una distancia promedio de 50 cm del piso del fondo del taladro para poder activar la columna explosiva. Su nombre genérico es Nonel y como producto la empresa especializada de la minera la denomina Exel MS de 600ms. Está conformado por:

- ***Cápsula detonante de aluminio***

De acuerdo a Romero (2016), es un casquillo de forma cilíndrico compuesto por aluminio el cual está cerrado en uno de sus extremos, en su interior tiene cierta carga primaria de un explosivo sensible a la chispa y este a su vez activa otra carga secundaria, pero con alto poder explosivo. A continuación, se detallan los elementos que la conforman:

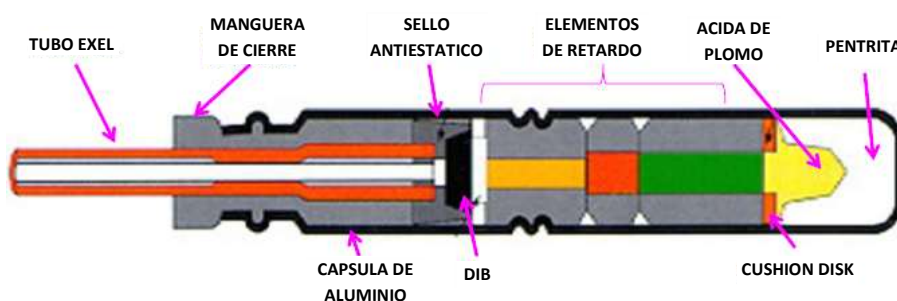


Figura 3 Componentes de la cápsula detonante del Exel 600 ms

Fuente: Romero (2016).

- ***Tubo de choque***

Según Romero (2016), es un tubo hueco compuesto de plástico que está con un contenido de octógeno aluminizado (HMX) adjunto al tubo por su parte interior cuya adherencia es mayor al 95%. Es el encargado de transmitir la energía a través de una onda de choque a través de la deflagración de una delgada película explosiva que está adherida a las paredes de un tubo plástico.

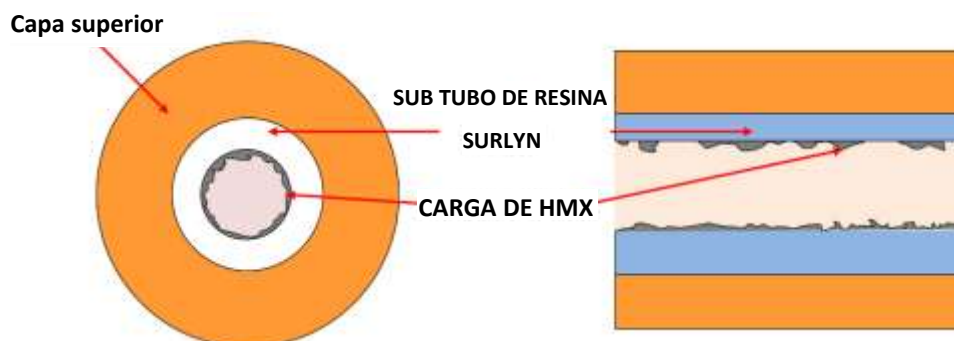


Figura 4 Partes del tubo de choque del Exel 600 ms

Fuente: Romero (2016).

Las propiedades de manipulación, resistencia, dureza y resistencia a la abrasión del tubo de choque están influenciadas en su mayor parte por las propiedades de los plásticos exteriores. La carga del tubo es de 0.015 gramos por 1 metro de tubo que también se puede expresar en 0.15 gramos por 10 metros. El tubo de choque tiene una velocidad de detonación de aproximadamente 2000 m/s (2 m por ms).

- ***Conector plástico J***

De acuerdo a Romero (2016), es el dispositivo que permite unir el tubo de choque a una línea troncal del cordón detonante, para hacerlo de la manera correcta siempre es necesario asegurarse de mantener la perpendicularidad (90°) en la conexión.

- ***Etiqueta.***

Muestra el tiempo nominal de la detonación, la longitud que tiene el tubo de choque (en metros y en pies), asimismo el número de serie (Romero, 2016).

- **Sello ultrasónico**

Es el que retiene al conector “j” y evita que entre al tubo humedad o contaminantes. Cuando el Exel detona el sello se observa quemado, agrietado e inflado. En el caso del tubo de choque no se nota este cambio. Romero (2016)



Figura 5 Detalle de los elementos del Exel 600 ms

Fuente: Sánchez (2015).

b) Detonador I-KON

Según Chambi (2018), cada detonador tiene un número único de ID que viene en el chip, y que viene impreso en la etiqueta adjunta. Son programables en incremento de milisegundos y tienen un alto nivel de protección contra cualquier iniciación accidental por corrientes vagabundas.

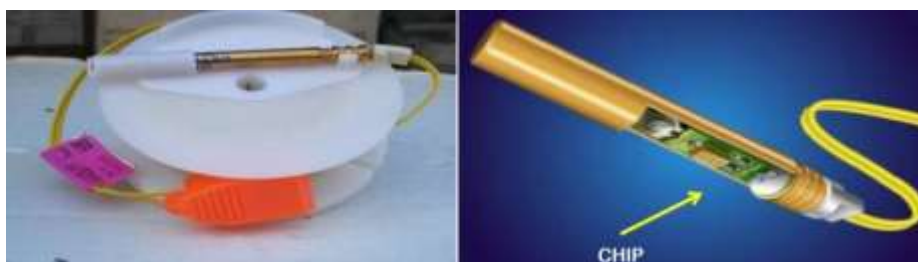


Figura 6 Detonador I-KON

Fuente: Chambi (2018).

El carrete es la base donde viene dispuesto el detonador, el cable envuelto con un conector que en su interior tiene dentadas de cobre revestido con silicona para presionar con el cable de conexión el cual emitirá la señal al logger.

- **Propiedades técnicas del detonador I-KON**

- ✓ Se programan con incrementos de 1 ms, desde 0 hasta 15000 ms.
- ✓ Material aislante: PP amarillo
- ✓ Diámetro exterior de aislante: 1,35 mm
- ✓ Resistencia a la tensión: > 200 N.
- ✓ Impermeabilidad al agua: 10 bars, 7 días.
- ✓ Longitud del cable conductor: 6 m, 15, 20, 30, 40, 60 y 80 m (carretes).

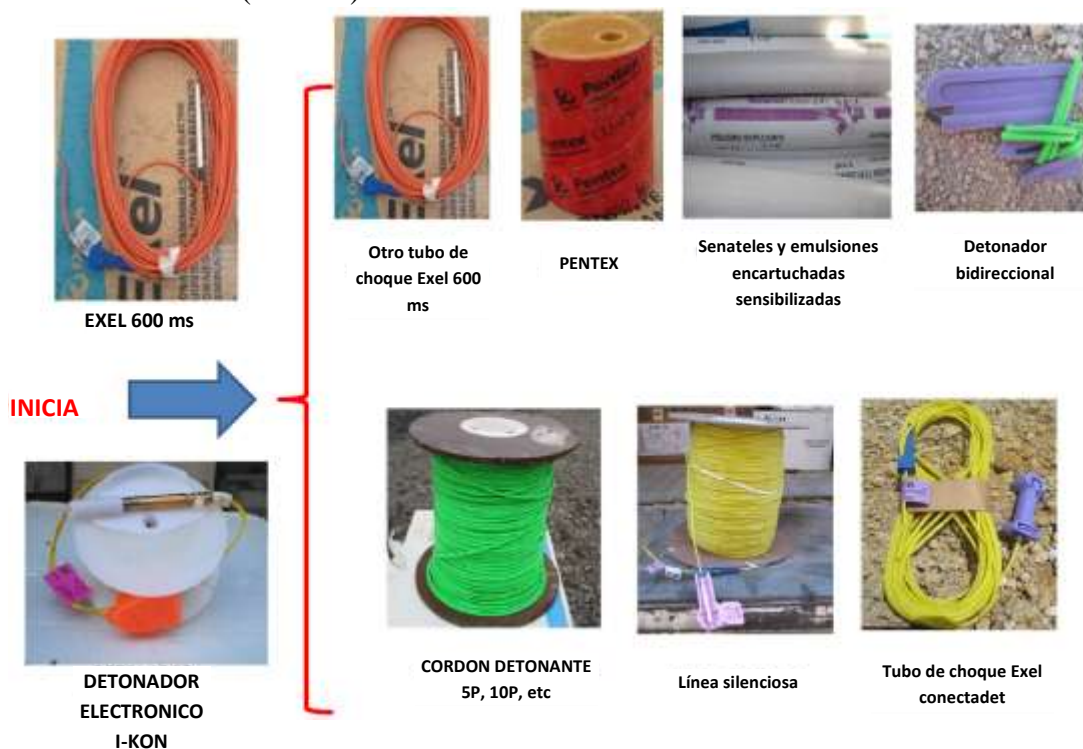


Figura 7 Productos iniciados por el detonador pirotécnico y electrónico.

Fuente: Sánchez (2015).

- **Los explosivos secundarios**

Según Romero (2016), los explosivos secundarios son aquellos que efectúan el arranque y rotura del macizo rocoso, definitivamente tienen menor sensibilidad que los explosivos primarios, asimismo llegan a desarrollar un mayor trabajo útil por lo que también se les conoce como “explosivos rompedores”. Se dividen en dos grupos:

- a) **Los altos explosivos**

Se sugiere utilizar detonadores de fuerza 12 para iniciarlos (Exel 600 ms, bidireccionales, línea silenciosa). En los polvorines de la unidad minera en estudio generalmente se cuenta con los siguientes:

- ***Pentex CD de una libra (Booster)***

Según Chambi (2018), su nombre genérico es booster, que llega a brindar un alto poder para la iniciación en un vasto rango de aplicaciones de explosivos. Posee dos túneles longitudinales acomodan hasta dos detonadores (exel y I-kon) o un cordón detonante, este sistema se llama detlok que mantienen en forma segura al detonador en su lugar durante el carguío, mientras que todavía permite un seguro retiro del detonador si es necesario. Al conectarse con el exel de 600 ms y/o detonador I-kon se coloca a una distancia promedio de 50 cm del piso del fondo del taladro, el tubo de choque y el cable se aseguran en la estaca triangular. El control de este accesorio de voladura debe darse permanentemente con la distribución en cantidades iguales,

confirmación de los operadores de camión fábrica, conteo de taladros en mismo campo dando la conformidad a la supervisión de la zona.

Sistema detlok



Figura 8 Pentex CD de 450

Fuente: Sánchez (2015).

- ***Cordtex (Cordón detonante)***

De acuerdo a Romero (2016), su nombre genérico es cordón detonante, son explosivos lineales fuertes, flexibles que están formados por un núcleo continuo fino de P.E.T.N. (un poderoso explosivo pulverizado), cubierto por una envoltura de plástico y también son reforzados con hilos y un compuesto orgánico que le brindan mejores condiciones de resistencia ante la abrasión. Tiene las siguientes características:

- ✓ Detona en toda su longitud a una alta velocidad constante aprox de 7000 m/s.
- ✓ Es un medio eficaz de transmitir energía desde un lugar a otro.
- ✓ Pueden ser iniciados por impacto o roce intenso.
- ✓ Están en presentaciones de 5P y 10 P.

- ✓ Puede ser iniciado por un detonador de potencia #8, exel de 600ms, línea silenciosa, bidireccional.
- ✓ Evita la penetración de líquidos (aceite, agua) en las puntas de corte.
- ✓ Son usados para voladura de pre corte, recorte y líneas descendentes.



Figura 9 Cordón detonante (CORDTEX)

Fuente: Romero (2016).

El efecto de detonación del cordón detonante genera energía lineal axialmente dispersa que recorre toda la longitud del explosivo. En consecuencia, todo el material físico del cordón se desintegra por ello es de vital importancia realizar conexiones mediante nudos establecidos y siempre manteniendo la perpendicularidad (90°).

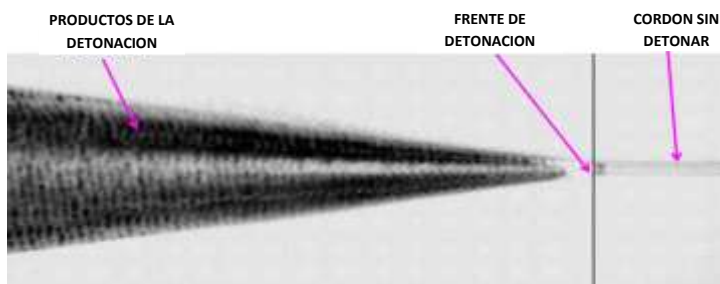


Figura 10 Efecto de la detonación en el cordón detonante

Fuente: Romero (2016).

b) Agentes de voladura

Estos materiales necesitan de un cebo energético para arrancar, entre ellos están:

- **ANFO (*Ammonium Nitrate + Fuel Oil*).**

Según López Jimeno (1994), es un agente de voladura granular, seco constituido por una mezcla de Nitrato de amonio poroso y Petróleo Diesel N°2. Es empleado en taladros totalmente secos trabajando de manera eficiente y a un bajo costo. El ANFO se usa como carga explosiva para zonas secas y de dureza blanda a media logrando el trabajo mecánico de fragmentación.



Figura 11 Gránulos o prills de ANFO

Fuente: Sánchez (2015).

La mezcla ideal corresponde al 94.3 % de nitrato de amonio (oxidante) y 5.7 % de petróleo (combustible), para un mejor balance de oxígeno en la detonación. Se indican las siguientes características:

- ✓ Brinda el 100 % de energía útil y una generación menor de gases nocivos.

- ✓ La porosidad del prill es indispensable para la obtención de puntos calientes en el proceso de la detonación.
- ✓ Es un explosivo muy insensible a los golpes, su manipulación es muy segura.
- ✓ Se utiliza para voladuras de roca blanda a media.
- ✓ Se usa mayormente como carga de columna
- ✓ Se puede suministrar con camiones fábrica y manualmente para voladuras secundarias.
- ✓ El ANFO se puede mezclar con polvo de aluminio de 5 a 10 % ya que es un combustible de alta energía, aumentando la potencia en volumen.

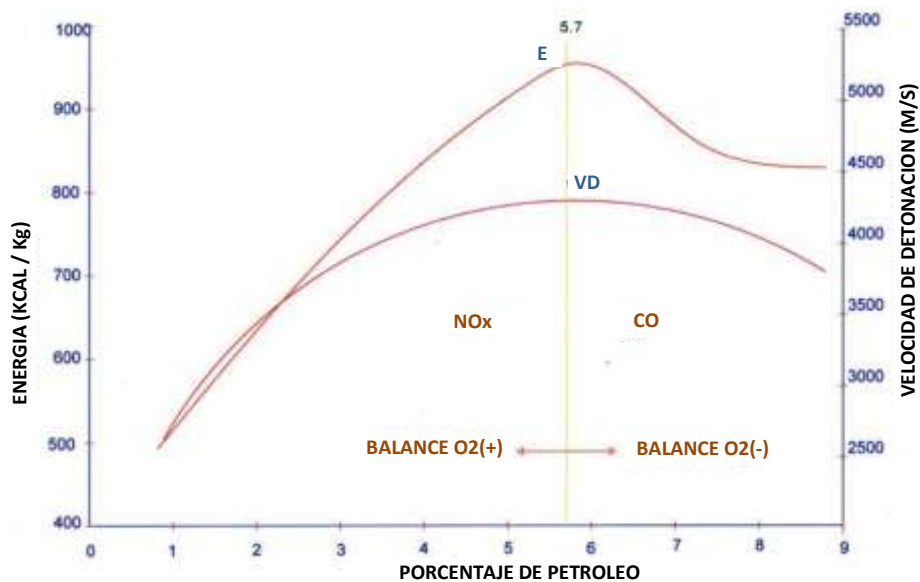


Figura 12 Variación de energía, VOD y gases con el contenido de D2

Fuente: López Jimeno (1994).

- ***Emulsión***

De acuerdo a López Jimeno (1994), la emulsión es una mezcla de dos líquidos no miscibles entre si denominadas fases. La primera fase o fase dispersa que contiene el comburente (solución de nitrato de amonio) la cual está formada por gotitas y la segunda fase o fase continua que contiene el combustible y el agente emulsificante. El combustible rodea a cada gotita de comburente manteniendo un íntimo contacto logrando una reacción química muy rápida. El agente emulsificante es un producto que se posiciona frecuentemente en la interfase de los dos líquidos inmiscibles disminuyendo su tensión interfacial, permitiendo que se forme la emulsión cuando se da un buen grado de agitación.



Figura 13 Emulsión matriz

Fuente: Sánchez (2015).

En todo este proceso al producirse la emulsión siempre se tiene una fase continua en la que se distribuyen las gotas del otro líquido inmiscible que constituye la fase dispersa. Una emulsión tiene viscosidad que está influida por la proporción de la parte dispersa en la emulsión y por el tamaño de las gotas (micras) de tal manera que en el momento que el

volumen total de la fase dispersa aumenta y el tamaño de las gotas disminuye, es cuando la viscosidad de la emulsión llega a aumentar.

Las emulsiones no son explosivas en realidad, sino que para funcionar como explosivos deben sensibilizarse. La emulsión matriz es mezclada con ANFO para formar el Heavy ANFO o ANFO pesado y es utilizado en el carguío de taladros como columna explosiva. Asimismo, una de las emulsiones y que es materia de estudio dentro del presente informe es el Flexigel, el cual se describirá a continuación:

- ***Flexigel***

Según Chambi (2018), el Flexigel es un explosivo de densidad variable y es a base de una nueva Emulsión y Poliestireno fabricado especialmente con una densidad y tamaño determinada. Este agente de voladura puede ser bombeado o también vaciado de manera directa hacia los taladros.



Figura 14 Muestras del agente de voladura Flexigel

Fuente: Chambi (2018).

La principal característica del Flexigel, es la capacidad que posee para trabajar con un rango amplio de densidades, su densidad de fabricación

varía desde 0,5 hasta 1,1 g/cm³ y las velocidades de detonación (VOD) pueden registrar valores desde 2500 hasta 4200 m/s. El Flexigel, como nuevo agente de voladura pretende ser una importante opción con una alta categoría de tecnología que nos permita gestionar de forma eficiente la energía que se libera durante la reacción de detonación. El explosivo se presenta en dos líneas de productos, diferenciadas por su aplicación en los procesos de voladura, Flexigel Advantage, referido a productos de alta energía y Flexigel Control, destinado a voladuras de control de daño y/o donde sea necesario cuidar taludes parciales o globales. Para este caso de estudio se considera el uso del Flexigel Control específicamente para los proyectos de voladuras de control en la unidad minera en estudio.

Tabla 1 Propiedades técnicas del Flexigel.

Propiedades	Sistema Flexigel™ Control			
	50	60	70	80
Densidad (g/cm ³)	0.5	0.6	0.7	0.8
Diámetro Mínimo del Barreno (mm)	200	200	150	150
Largo Máximo del Barreno(m)	80	80	80	80
Largo Máximo de Carga (m)	75	75	75	75
Tipo de Barreno	Solo Barrenos Secos			Secos y Desaguados
Sistema de Carguío	vaciado			vaciado/ Bombeable
Booster Pentex™ recomendado para diámetro mínimo del barreno	Pentex™ 450g			
VOD Típico (km/s)	2.0 – 3.0	2.2 – 3.2	2.5 – 3.5	2.8 – 3.8
Energía Relativa Efectiva (REE) MJ/kg				
Fuerza Relativa en peso	53	60	67	74
Fuerza Relativa en volumen	33	45	57	74
Salida de CO ₂ (kg/t)	179	169	168	163
Tiempo de Espera	7 días			

Fuente: Chambi (2018).

- **Heavy ANFO**

Según López Jimeno (1994), es una mezcla de ANFO y emulsión matriz en diferentes proporciones. Las preparaciones del Heavy ANFO están en relación a las exigencias de la voladura y a la existencia de agua, entre 10 a 90 % de emulsión y la diferencia ANFO, entre las combinaciones más conocidas se encuentran: 20-80, 30-70, 40-60, 50-50, 60-40 y 65-35.

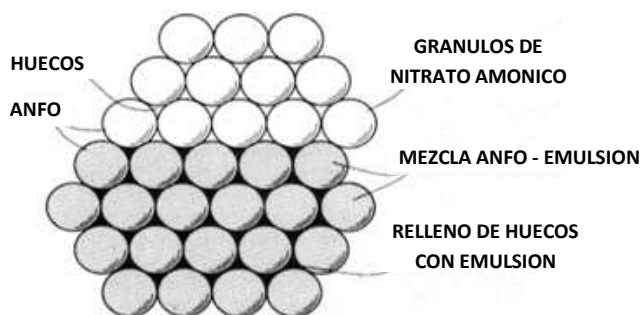


Figura 15 Estructura del Heavy ANFO

Fuente: López Jimeno (1994).

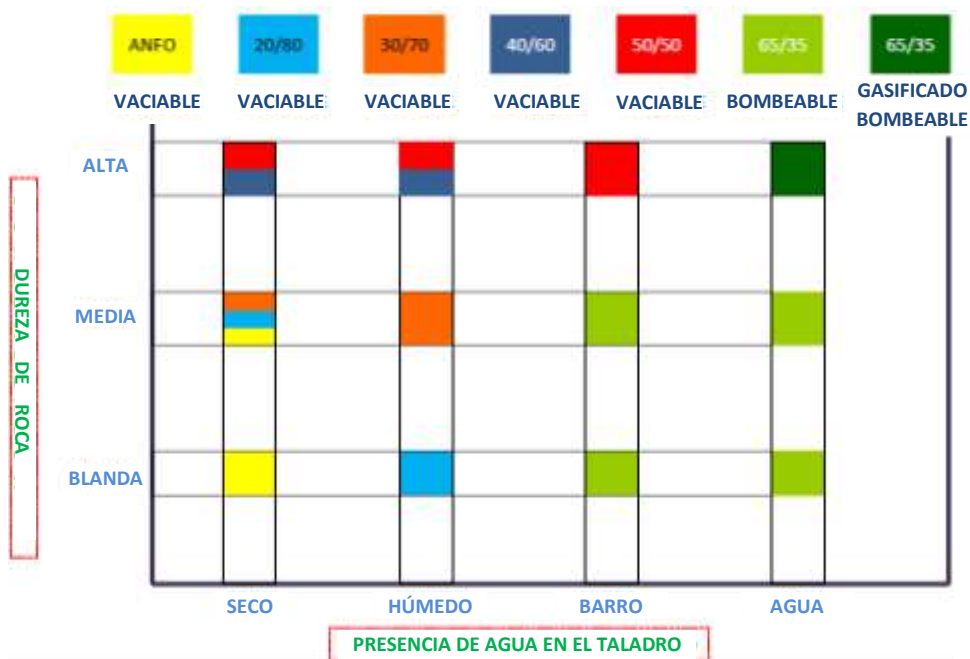


Figura 16 Aplicación del Heavy ANFO en el carguío de taladros

Fuente: Sánchez (2015).

Como combinación de ANFO más proporciones requeridas de emulsión matriz se forma un explosivo que se usa como carga explosiva para zonas secas, húmedas, con barro y con agua, de dureza blanda a dureza alta, estas mezclas explosivas son usados en carga de columna de los taladros consiguiendo también el trabajo mecánico de fragmentar la roca.

2.2.4 Control de calidad de los agentes de voladura

a) Densidades tomadas en campo

Según Chambi (2018), para garantizar que la densidad del producto entregado cumpla con las especificaciones técnicas se llevará a cabo el control de las densidades de los productos fabricados en campo el cual se realizará a un ritmo de 03 muestras por cada viaje realizado del camión fabrica o cuando se cambia de proporción (mezcla Heavy ANFO) y el resultado del promedio obtenido se comunicará al supervisor de perforación y voladura de la empresa minera. Para toma de densidades en campo se utiliza un vaso volumétrico de 1 litro de agua, una balanza electrónica de alta precisión y una espátula para enrasar el producto explosivo. Según Peralta (2019), por ejemplo, si se bombea la emulsión cuya densidad es de 1,31 gr/cc y una concentración en la mezcla de emulsión con concentración del 10 % de Nitrito de Sodio para poder activar e iniciar el proceso de gasificación, luego de 18 a 20 minutos la altura de carga del explosivo aumenta, para llegar a obtener finalmente una densidad promedio de copa cuyo valor es aproximadamente de 1,13 gr/cc. Luego de efectuarse la gasificación se llega a obtener un valor para la densidad media promedio aproximadamente de 1.25 gr/cc en el centro de la columna de carga. Es

necesario resaltar que es responsabilidad del supervisor encargado del proceso de voladura, el poder confirmar de manera aleatoria la altura de carga final antes de realizar el tapado final de los taladros.



Figura 17 Control de calidad mediante medición de densidades en campo.
Fuente: Elaboración propia.

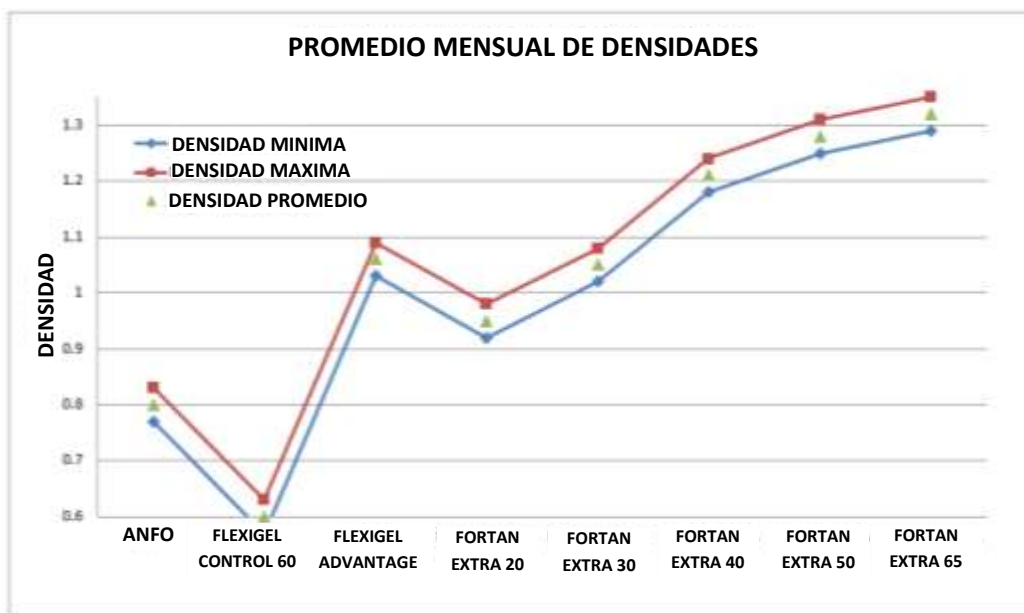


Figura 18 Densidades de algunos agentes de voladura.
Fuente: Elaboración propia.

b) Porcentaje de petróleo en Anfo

Según Peralta (2019), el control de porcentaje de petróleo es para verificar que se está cumpliendo con las especificaciones técnicas en la elaboración del ANFO y se realizará en la planta de nitrato. La frecuencia del muestreo para verificar el cumplimiento de las dichas especificaciones es de 2 evaluaciones por mes, teniendo por objetivo el de garantizar que los parámetros de nuestro control se encuentren en el rango de 5.7 % a 6.3 %.



Figura 19 Separación de fases para el cálculo del % de petróleo

Fuente: Sánchez (2015).

c) Calibraciones de camiones fábrica

De acuerdo a Peralta (2019), el objetivo es encontrar la variación entre la diferencia de pesos entre la balanza y la pantalla, así como el factor de inicial corrección y el factor final de corrección, este valor se supone que debe ser igual, ya que indica que el factor de corrección se estaría ajustando de acuerdo a la variación de las balanzas. La frecuencia de muestreo es de 1 vez al mes. La desviación permisible es del 2 %.

Tabla 2 Registro de calibración de camión fábrica Q-19 en Nitrato de Amonio.

Sitio	Fecha	MMU	Producto	Factor Inicial	Peso Real	Peso Pantalla	Factor Corregido	Error Pantalla	Error Factor
CV	13-Ene	Q - 19	Nitrato de Amonio	3.2424	94.0	94.0	3.2424	0.0	0.0000
CV	16-Ene	Q - 19	Nitrato de Amonio	3.2425	94.0	94.0	3.2424	0.0	0.0001
CV	18-Feb	Q - 19	Nitrato de Amonio	3.2424	94.0	94.0	3.575	0.0	-0.3326
CV	27-Feb	Q - 19	Nitrato de Amonio	3.9168	94.0	94.0	4.2053	0.0	-0.2885
CV	8-Mar	Q - 19	Nitrato de Amonio	3.0000	94.0	94.0	3.0000	0.0	0.0000
CV	27-Mar	Q - 19	Nitrato de Amonio	3.0000	94.0	94.1	3.3000	-0.1	-0.3000

Fuente: Elaboración propia.

d) Temperatura de emulsión

Según Peralta (2019), la máxima temperatura que puede registrar la para ser aceptada por la unidad minera en estudio a fin de no proceder con la destrucción del Nitrato de Amonio es de 50°C.

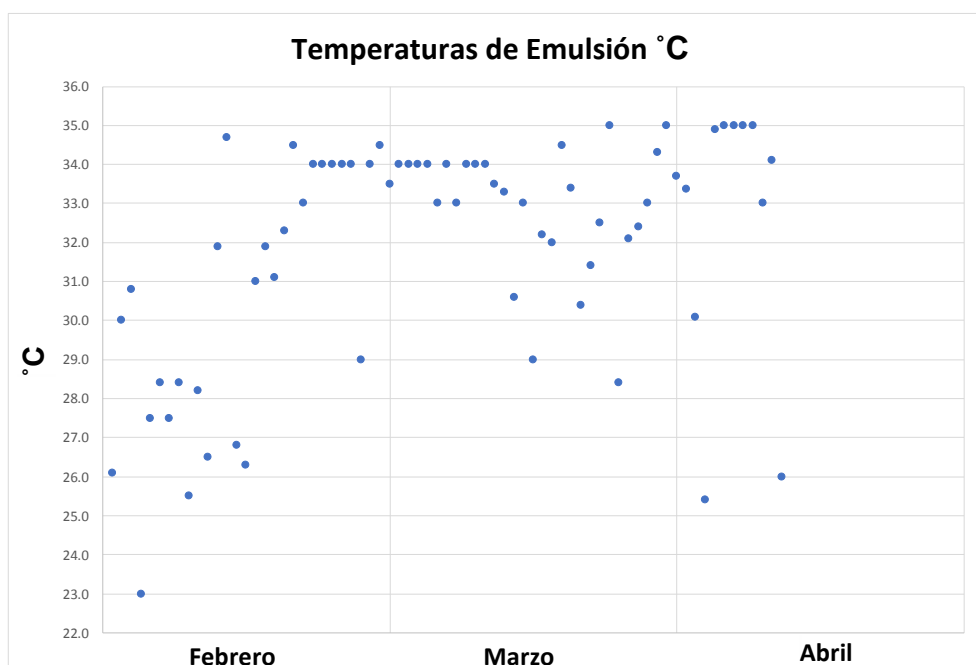


Figura 20 Temperatura de emulsión.

Fuente: Elaboración propia.

e) Velocidad de detonación

Según Chambi (2018), para garantizar la calidad de los agentes de voladura empleados en la unidad minera en estudio es necesario realizar la medición de velocidad de detonación (VOD) de todas las mezclas explosivas que se aplican en la operación.

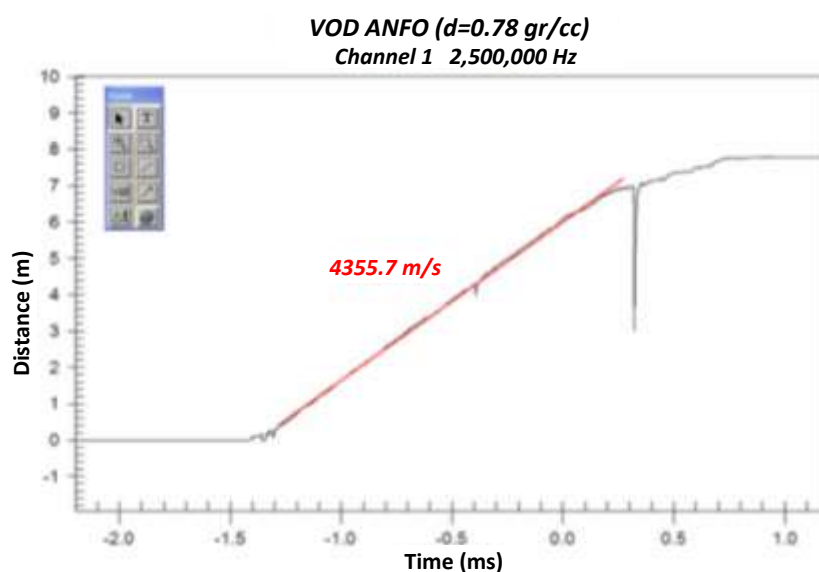


Figura 21 Velocidad de detonación para ANFO (0.78 gr/cc)

Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia de medición es de 1 vez por semana y consiste en registrar con el equipo MicroTrap II la velocidad con que se va quemando el cable de prueba de 10,8 ohm/m. de resistencia y esta es traducida a una velocidad de detonación (VOD) del explosivo., la sonda se introduce en su totalidad en el taladro el cuál se quiere registrar. En este caso de estudio las emulsiones de tipo Flexigel llegaron a desarrollar un VOD bajo por lo tanto se puede inferir que dicho producto puede ayudar de manera significativa en el control de paredes, especialmente en zonas de dureza similar a las presentadas en la profundización de los tajos de la minera en estudio.

2.2.5 Mecanismo de Fragmentación de la roca

De acuerdo a Bernaola (2013), se presentan 4 etapas durante los procesos de fracturamiento y desplazamiento del material disparado que acontecen en el momento de la detonación de una carga explosiva confinada y posterior a ella.

a) Proceso de detonación

El proceso de detonación es la etapa inicial de la fragmentación y posterior desplazamiento en donde los principales componentes del explosivo se llegan a convertir en gases, los cuales al hallarse confinados generan una alta presión y temperatura. Bernaola (2013).



Figura 22 Proceso de detonación de los taladros

Fuente: Bernaola (2013)

b) Propagación de las ondas de choque

Según Bernaola (2013), la etapa que sigue al proceso de detonación es la propagación de ondas de choque y de esfuerzos a través de la roca. Dicha onda de presión, la cual es transmitida por medio del macizo rocoso, es generada como consecuencia de las altas presiones existentes y de la vertiginosa expansión del gas, quienes llegan a generar el impacto en cada una de las

paredes de los taladros. A medida que la onda llega a viajar hacia el exterior, se tiene una marcada predisposición a comprimir el material rocoso disparado.



Figura 23 Propagación de las ondas de choque entre los taladros.

Fuente: Bernaola (2013).

c) Expansión de los gases

De acuerdo a Bernaola (2013), en el transcurso de la difusión de la onda de choque, los gases que se generan a alta presión y temperatura llegan a producir un campo de esfuerzo en las inmediaciones del taladro que expanden también el taladro original, extendiendo y generando grietas radiales llegando a penetrar en cualquier discontinuidad del macizo rocoso



Figura 24 Expansión de los gases.

Fuente: Bernaola (2013).

. Luego de esto los principales responsables del material roto son los gases que se encuentran en la nueva cavidad que se llega a formar alrededor del taladro, los que llegan a penetrar en las grietas, diaclasas y fallas existentes y el impulso distribuido hacia el material por la detonación.

d) Desplazamiento de material

Según Bernaola (2013), generalmente en esta última fase, gran parte de la fragmentación se ha llegado a completar gracias a las ondas de compresión y de tensión, además de la presurización del gas o la combinación de ambos. De todas maneras, suele ocurrir también cierto grado de fragmentación producto de las colisiones en el aire y debido al impacto del material disparado contra el suelo. En la mayoría de los casos, mientras más alto es el banco aumenta la posibilidad de obtener mayor fragmentación y esto se debe al incremento de la velocidad con la que los fragmentos de manera individual caen e impactan al piso del banco.

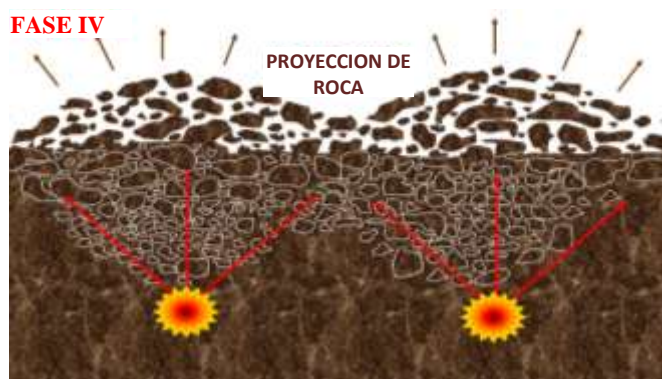


Figura 25 Desplazamiento del material.
Fuente: Bernaola (2013).

2.2.6 Tipos de Voladuras

Para enfocarse al tema de investigación requerido es importante describir los tipos de voladura más resaltantes empleados en la unidad minera en estudio, los cuales serán los siguientes:

a) Voladura de producción

Según Bravo (2018), las voladuras de producción son aquellas que corresponden a las realizadas lejos del talud, dichos disparos no son parte de la línea de diseño final del tajo, es decir no colindan con las paredes finales de diseño. Es importante destacar que las voladuras de producción se pueden llevar a cabo tanto en mineral como en desmonte y entre sus objetivos generalmente están la separación del mineral de interés del macizo rocoso y la de disminuir el tamaño de los fragmentos de rocas asegurando una granulometría que facilite su acarreo y sea beneficiosa para los requerimientos de chancado y molienda. Por lo tanto, la voladura de producción, se caracteriza por estar orientada a mayores volúmenes de roca, posee generalmente un único diseño y cuentan con un alto factor de carga, llegando a producir altos niveles de vibraciones. Cabe mencionar que en esta unidad minera en estudio los taladros de producción se emplean tanto en voladuras de control como en voladuras de producción y en el caso de las primeras, su secuencia de detonación es luego de la voladura de precorte.

b) Voladura de control

De acuerdo a Bravo (2018), la voladura de control es menos productiva y generalmente más cara que una voladura convencional y su principal objetivo

debe ser minimizar los posibles costos relacionados al mantenimiento y estabilidad de taludes asegurando los estándares de seguridad por lo que estos disparos se emplean para taludes con mayor tiempo de exposición. Existen varias técnicas de voladuras de control siendo la voladura de precorte la que se utiliza actualmente en la unidad minera de estudio en el cual y para aprovechar de forma más efectiva la energía al generar el plano de discontinuidad en mención, es necesario que la voladura de precorte sea efectuada previa a la perforación de taladros de producción. En la unidad minera en estudio es bastante común que los taladros de precorte se perforan en conjunto a los taladros de producción y se disparen en la misma voladura.

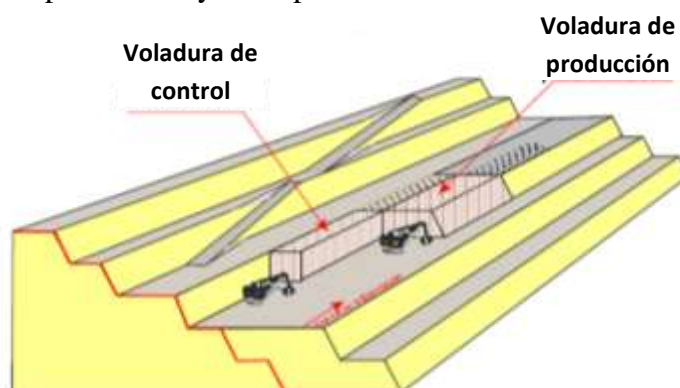


Figura 26 Representación gráfica de las voladuras de control y producción.

Fuente: Bravo (2018).

2.2.7 Modelos matemáticos para el cálculo de esquemas de voladura en banco

Según López Jimeno (1994), la variable geométrica más crítica e importante en el diseño de una malla de voladura es el burden. Desde hacía varias décadas se han llevado a cabo numerosas investigaciones y se han desarrollado diferentes metodologías para su cálculo a fin de obtener su valor. No obstante, no es propósito del presente trabajo detallarlas, por ello se mencionan algunas como referencia.

a) Fórmula de Ash

$$B(\text{pies}) = \frac{K_B \times D(\text{pulg})}{12}$$

En donde “K_B” es un valor constante que depende de la clase de roca y del tipo de explosivo según lo indicado a continuación:

Tabla 3 Valores de K_b según el tipo de roca y explosivo

TIPO DE EXPLOSIVO	CLASE DE ROCA		
	SUAVE	MEDIA	DURA
Densidad baja (0,8 hasta 0,9 gr/cm ³) y baja potencia.	30	25	20
Densidad media (1,0 hasta 1,2 gr/cm ³) y potencia media.	35	30	25
Densidad alta (1,3 hasta 1,6 gr/cm ³) y alta potencia.	40	35	30

Fuente: López Jimeno (1994).

Dichas constantes se modifican para el cálculo de otros parámetros, según se indica:

- ✓ Profundidad de taladro: $L = K_L \times B$, (K_L entre 1,5 y 4).
- ✓ Sobre perforación: $SP = K_j \times B$ (K_j entre 0,2 y 0,4).
- ✓ Longitud de taco: $T = K_t \times B$ (K_t entre 0,7 y 1).
- ✓ Espaciamiento: $S = K_s \times B$

$K_s = 2,0$ (iniciación simultánea de taladros).

$K_s = 1,0$ (taladros secuenciados con retardos largos).

$K_s = 1,2$ hasta $1,8$ (taladros secuenciados con retardos cortos).

b) Fórmula de Konya

$$B = 3,15 \times d \times \left[\frac{\rho_e}{\rho_r} \right]^{0.33}$$

Donde: B = Burden, en pies. ρ_e = densidad del explosivo.

d = diámetro del explosivo (pulg). ρ_r = densidad de la roca.

El espaciamiento se calcula según las siguientes expresiones:

✓ Taladros de una fila (instantáneos):	$H < 4B$	$s = \frac{H+2B}{3}$
	$H \geq 4B$	$s = 2 B$
✓ Taladros de una fila (secuenciados):	$H < 4B$	$s = \frac{H+7B}{8}$
	$H \geq 4B$	$s = 1,4 B$
✓ Longitud de taco:	Roca masiva	$T = B.$
	Roca estratificada	$T = 0,7 B.$

2.2.8 Diseño de las mallas de perforación

Según Peralta (2019), al igual que en todos los modelos matemáticos en esta investigación también se considera al burden como la variable geométrica más crítica en el diseño de una voladura. Si el burden es demasiado pequeño, puede traer como consecuencia un excesivo desplazamiento del material volado, presión dinámica sobre el explosivo de los taladros colindantes o que la fragmentación sea demasiado fina. Si el burden es demasiado grande, puede llevar incluso a una sobre rotura de la cara final, lanzamiento del material disparado hacia la parte posterior, proyección de rocas (fly rock), altos niveles de golpe de aire, posible formación de cráteres, altos niveles de vibración y fragmentación demasiado gruesa. Como se ha visto existen muchos modelos matemáticos para calcular el Burden, en este caso de estudio referencialmente, dicha estimación se realiza con las siguientes ecuaciones recomendadas por Calvin J. Konya las cuales se adaptan a la realidad de la mina en estudio, asumiendo un diámetro de perforación acorde a la altura de banco deseado, cuya ecuación queda expresada de la siguiente manera:

$$B = 0.012 \left(\frac{2SGe}{SGr} + 1.5 \right) (De) x Kr x Kd x Ks$$

Donde: B = Burden (m) S = Espaciamiento (m)

SGe = Densidad del explosivo (g/cc) SGr = Densidad de la roca (g/cc)
 De = Diámetro de explosivo (mm)

Asimismo, también se puede considerar el diseño del Burden a partir del explosivo, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$B = 8 \times 10^{-3} \times (De) \times \sqrt[3]{\frac{PRvol}{SGr}} \times Kr \times Kd \times Ks$$

Donde: B = Burden (m) SGr = densidad de la roca (g/cc)
 S = Espaciamiento (m) De = Diámetro del explosivo (mm)
 PRvol = Potencia relativa por volumen

Tabla 4 Correcciones para el cálculo del burden.

Corrección según número de filas	Kr
Una o dos filas.	1.00
Tercera fila y subsecuentes o voladuras con apilamientos anteriores.	0.90
Corrección según orientación de estratos	Kd
Estratos hacia el corte.	1.18
Estratos hacia la cara.	0.95
Otros depósitos.	1.00
Corrección según estructuras geológicas	Ks
Altamente fracturada, juntas frecuentes y débiles, capas con bajo cementante.	1.30
Capas delgadas, bien cementadas con juntas estrechas.	1.10
Roca intacta y masiva.	0.95

Fuente: Peralta (2019).

Resolviendo ambas ecuaciones y utilizando como agente de voladura al ANFO (densidad = 0.78 gr/cc), densidad de la roca = 2.6 gr/cc y consideraciones para las correcciones Kr = 0.9, Kd = 1 y Ks = 1.1 se estima para la primera ecuación un burden promedio de 6,74 m. Asimismo, se estima para la segunda ecuación con el mismo agente de voladura ANFO (potencia relativa al volumen = 97%) un burden con valor promedio de 7.15 m, lo cual representa 8 metros como espaciamiento, y este se convierte en el punto de partida y sirve de referencia para luego también

tomar en cuenta los valores de UCS, RQD, litología existente entre otros parámetros geotécnicos.

a) Ajuste del burden según indicadores geotécnicos

Según Peralta (2019), la geología del terreno es una de las variables no controlables en la voladura de rocas, así como todo el conjunto de propiedades inherentes del macizo rocoso es por ello que el área de geotecnia actualiza semanalmente la base de datos en el software Minesight registrando la resistencia a la compresión de la roca intacta (UCS), el grado de fracturamiento (RQD), la litología y la alteración del material a ser excavado.

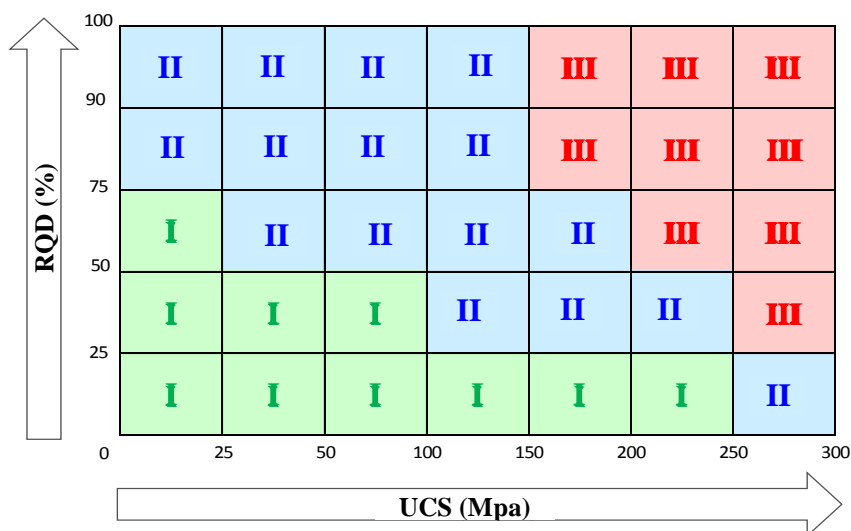


Figura 27 Matriz índice de fragmentación.

Fuente: Peralta (2019).

Dentro de todo el conjunto de parámetros anteriormente realizados se toman en consideración principalmente el UCS y RQD a fin de poder ajustar el burden teórico que se había calculado previamente. De manera general se determinan los factores de burden y espaciamiento primordialmente en base a objetivos de fragmentación para las mallas de producción y de cuidado de las paredes del

talud en el caso de las mallas de control. En ambos casos, se consideran tanto el UCS y RQD del macizo rocoso al momento de efectuar el disparo.

2.2.9 Diseño de mallas de control

De acuerdo a Peralta (2019), para poder diseñar estas mallas de perforación se emplea el software de diseño conocido como Minesight, dichas mallas para voladuras de control generalmente son polígonos con forma de paralelogramo contando generalmente con 4 filas de taladros, el objetivo de la realización de este diseño especial es el cuidado de las paredes de los taludes es decir siempre tomando en cuenta el diseño de la fase final de minado. En el caso de este tipo de proyectos de control es necesario considerar un diseño en líneas considerando un offset del toe de diseño (burden) con un espaciamiento de valor fijo en todo el largo de la línea, de la misma forma se desarrolla la línea de buffer y la fila de producción modificada.

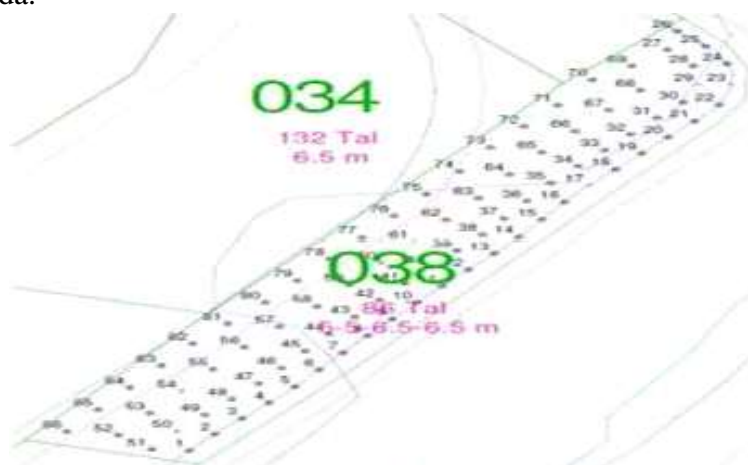


Figura 28 Malla de un proyecto de control

Fuente: Peralta (2019).

El diseño del tajo de la unidad minera en estudio determina el diseño de bancos dobles en determinados sectores, es por ello que se representa un perfil de talud doble con un diseño de control. Para garantizar el cuidado de las paredes de los

taludes del tajo abierto se realizan algunas simulaciones para observar la distribución de energía las cuales permite también determinar el espaciamiento y burden inicial para desarrollar los diseños de las mallas de control, asimismo se tiene que considerar también el nivel de energía básico que se tiene según el historial de los registros de voladura en función al tipo de roca que se va disparar.

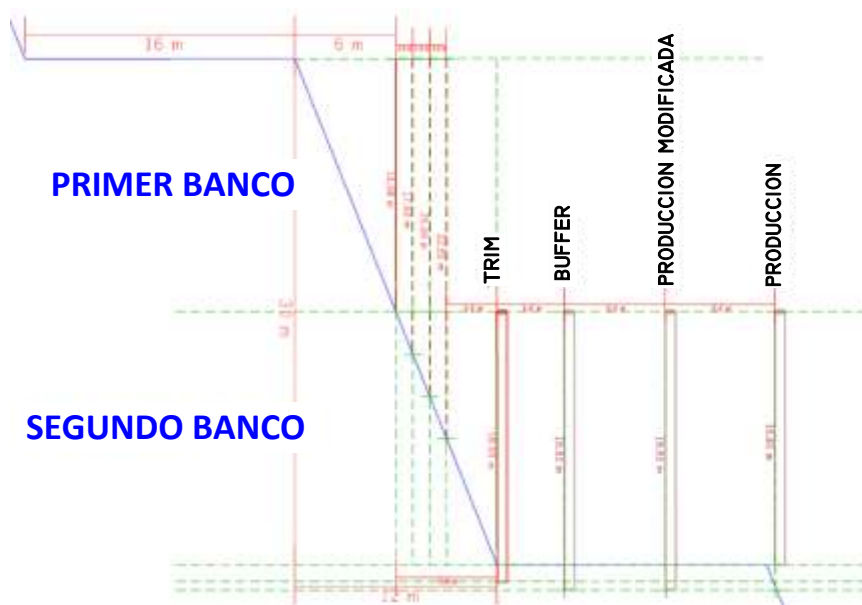


Figura 29 Perfil de banco de minado

Fuente: Peralta (2019).

La idea es determinar el espaciamiento recomendado según el tipo de explosivo en diferentes clases de roca que se debe emplear con especial énfasis en la fila de trim y en la fila de buffer a fin de reducir los posibles daños a las paredes de los taludes de acuerdo al nivel de energía que se obtiene.

2.2.10 Diseño de carga

Según Peralta (2019), a fin de elaborar el diseño de carga es necesario tomar en cuenta parámetros básicos del talud de diseño, dimensiones de la malla, propiedades geotécnicas e hidrogeológicas del macizo rocoso, velocidades de

penetración real y propiedades de explosivos. De acuerdo a la tabla 5, se observan algunos de los indicadores que nos permiten optimizar el diseño de carga.

Tabla 5 Diseño básico de voladura.

PARÁMETROS DE SITIO	DISEÑO
Diámetro del explosivo (mm)	270
Densidad del explosivo (gr/cc)	0.78
Energía del explosivo (MJ/Kg)	3.81
Densidad de roca (gr/cc)	2.6
Altura de banco (m)	15
Espaciamiento diseño (m)	8
Ángulo del barreno (°)	0
Factor de energía deseado	500
* Parámetros ajustables: Sobreperforación y taco	
Factor corrección taco	0.6
Factor corrección sobreperforación	-0.8

Longitud de taco = Diámetro del explosivo x 22	6.5
Distribución vertical de energía = (Altura de banco-longitud de taco) /Altura de banco x 100	56
Sobreperforación = Diámetro del explosivo x 0.0085	1.5
Longitud del barreno = Altura banco + sobreperforación	16
Longitud carga = Longitud taladro - longitud taco - longitud cámara aire - longitud deck	10
Densidad carga = 0.0507 x densidad explosivo x diámetro explosivo x diámetro explosivo	44.7
Peso del explosivo = Longitud del explosivo x densidad carga	445
Energía del explosivo = Peso explosivo x energía explosivo	1695
Malla triangular equilátera	7
Factor rigidez = Altura banco/burden	2.2
m3/tal= Altura banco x espaciamento x burden	831
t/tal= Altura banco x espaciamento x burden x densidad roca	2162
Factor carga = Peso explosivo / tonelaje	0.21
Factor potencia = Peso explosivo / volumen	0.54
Factor de energía = Energía explosivo / tonelaje	784

Fuente: Peralta (2019).

Como se había mencionado anteriormente los diseños se efectúan al tomar como base el desarrollo y distribución de la energía en Kilo joule / Tonelada además de considerar también los parámetros por Geotecnia y Geología los cuales son utilizados para realizar el diseño adecuado según el tipo de roca, siendo el detalle de dichos parámetros como RQD y UCS los que se muestran en los siguientes gráficos:

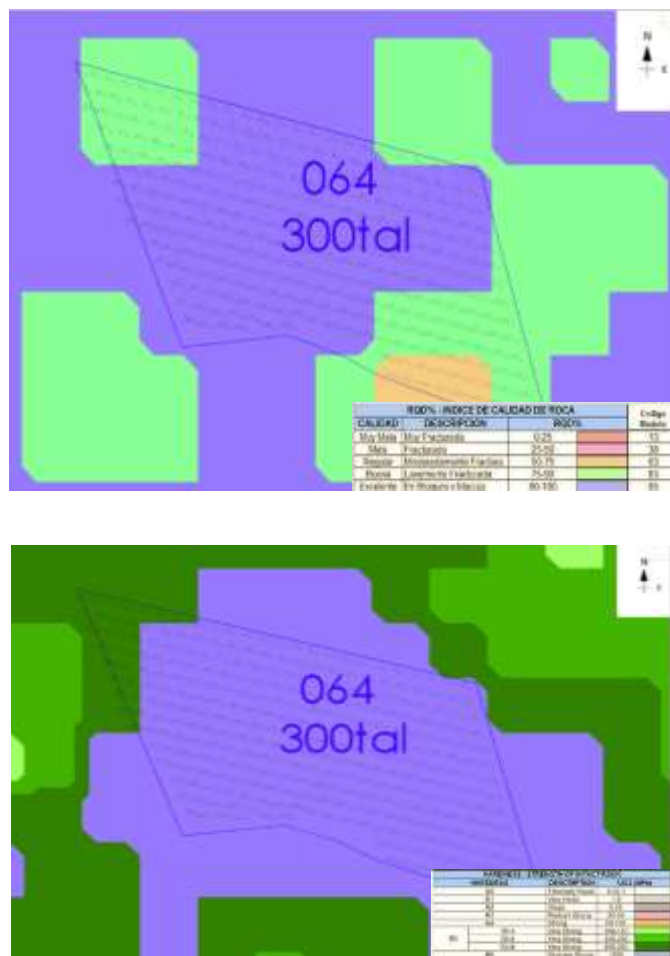


Figura 30 Información geológica y geotécnica.

Fuente: Peralta (2019)

2.2.11 Ondas observables en una voladura

Según Bravo (2018), los tres principales tipos de onda que se llegan a observar cuando se proceden a registrar las vibraciones generadas por la voladura, aunque no todas ellas siempre se presentan o se llegan a detectar, son los siguientes:

a) Onda de compresión (P)

Es la onda más rápida y con mayor amplitud que se desplaza a través del suelo, por lo que es la primera onda que se llega a registrar. En el caso de las ondas de compresión, las partículas de onda se desplazan en la misma dirección que

su propagación. No producen cambios de forma, pero si en el volumen en el material en el que se propagan, asimismo pueden trasladarse en materiales sólidos, líquidos incluso en gases. Bravo (2018).

b) Onda Transversal (S)

De acuerdo a Bravo (2018), la onda de corte o S tiene una velocidad de entre 50 hasta 60% de la velocidad de la onda de compresión P. Dentro de las ondas transversales, las partículas de onda se desplazan de manera perpendicular a la dirección de su propagación, no llegan a producir cambios en el volumen, pero si llegan a producir cambios de forma en los materiales en los que se propaga. Dichas ondas transversales se desplazan sólo en sólidos y tanto la onda P como la onda S corresponden a las llamadas ondas de cuerpo.

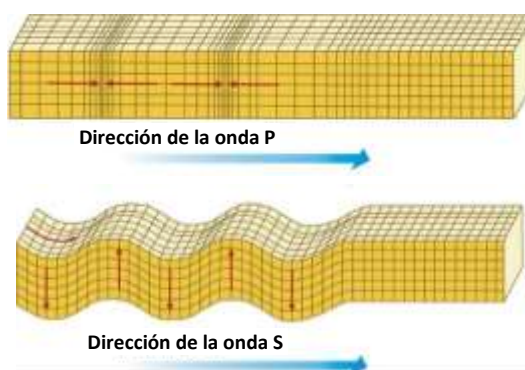


Figura 31 Dirección de propagación de la onda P y S.

Fuente: Bravo (2018)

c) Onda Rayleigh (R)

La onda Rayleigh es una onda de superficie que se desvanece de manera rápida con la profundidad y se llega a propagar de manera más lenta que las ondas de cuerpo. Las partículas dentro de la onda se desplazan de manera elíptica dentro de un plano vertical normal a la superficie y en la misma dirección de su propagación. Bravo (2018).

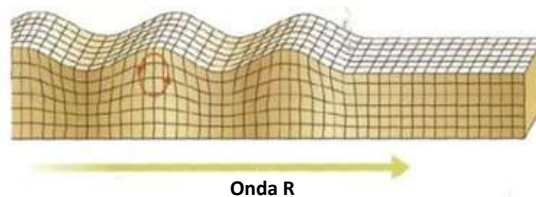


Figura 32 Dirección de propagación de la onda R.

Fuente: Bravo (2018)

2.3 Modelo conceptual

Para el trabajo de investigación el desarrollo de un modelo conceptual permite describir la relación de los conceptos y variables consideradas como el proceso de fragmentación y los agentes de voladura involucrados. Por ello se considera que la elaboración del presente modelo conceptual es importante para abstraer el problema e identificar como interactúa el sistema en el cual se desenvuelve nuestro análisis comparativo.

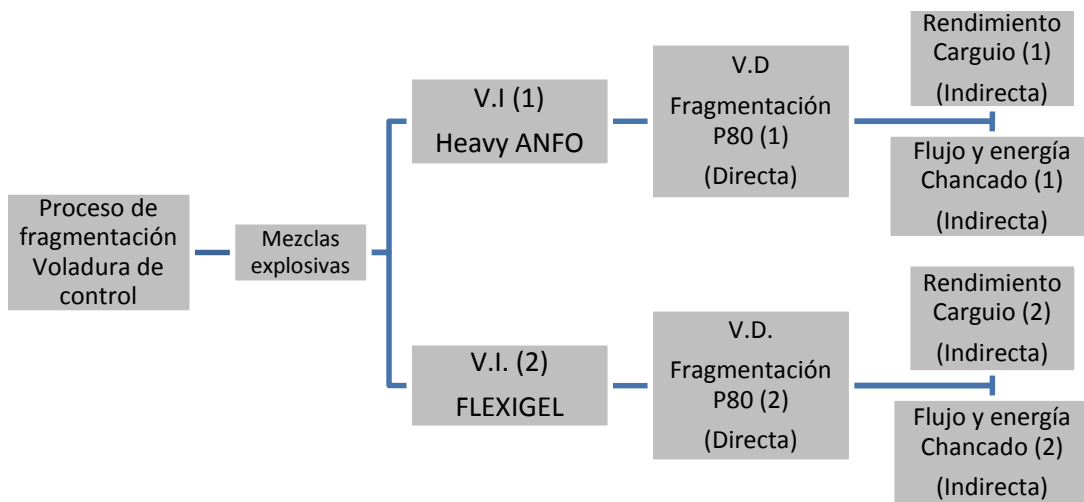


Figura 33 Modelo conceptual de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se abordarán los aspectos metodológicos para llevar a cabo la investigación, así como el procedimiento para alcanzar los objetivos de la misma.

Según Hernández et al. (2014), una variable es una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse. El concepto de variable se aplica a personas u otros seres vivos, objetos, hechos y fenómenos, los cuales adquieren diversos valores respecto de la variable referida. Por ejemplo, la inteligencia, ya que es posible clasificar a las personas de acuerdo con su inteligencia; no todas las personas la poseen en el mismo nivel, es decir, varían en inteligencia.

Para este caso de estudio se definen como variable dependiente a la fragmentación representada por el valor P80 obtenido y como variables independientes a los agentes de voladura Flexigel y Heavy ANFO, existiendo una relación entre los valores de fragmentación obtenidos en cada uno de los disparos analizados y los agentes de

voladura empleados, dicha relación adquiere valor para la realización de esta investigación y forma parte de la hipótesis planteada en el presente trabajo de suficiencia.

3.1 Tipo y diseño de la investigación

3.1.1 Enfoque

Citando a Hernández et al. (2014), la investigación fue de tipo cuantitativo, ya que para dar respuestas a las preguntas se hizo uso de procesos matemáticos y se recurrió a la estadística para poder llegar a una conclusión válida.

3.1.2 Alcance

Según Hernández et al. (2014), la investigación es de alcance explicativo, ya que no solo expone los conceptos o fenómenos estudiados, si no que establece una relación entre las variables para determinar las causas de los fenómenos.

3.1.3 Diseño de investigación

De acuerdo a Hernández et al. (2014) el tipo de investigación es aplicada ya que utiliza los conocimientos adquiridos y los pone en práctica para resolver el problema de investigación. Asimismo, es un diseño experimental, ya que toma datos directamente del campo de acción y los analiza para medir las variables estudiadas.

3.2 Unidad de análisis

La unidad de análisis para el presente estudio es la Mina Cerro Verde, la cual es un complejo minero de cobre y molibdeno ubicado en el distrito de Uchumayo, en la provincia de Arequipa, en el Perú y situada a una altitud promedio de 2.600 metros sobre el nivel del mar. La mina a tajo abierto ha sido ampliada a hacia una tasa de procesamiento de 1 000 000 de toneladas de material extraído y 400 000 toneladas de mineral procesado por día.

3.2.1 Agentes de voladura y explosivos

Orica Mining Services S.A. es la empresa que realiza el servicio de voladura a la unidad minera y le llega a suministrar los siguientes explosivos y agentes de voladura en un amplio rango de productos de baja y alta energía, para ajustarse más eficientemente a distintas aplicaciones requeridas:

- ✓ **ANFO:** utilizado especialmente para material suave, mucha generación de gases lo que permite un adecuado desplazamiento del material.
- ✓ **Heavy ANFO:** Mezcla de ANFO con emulsiones en diferentes proporciones, utilizado en material con mayor resistencia de, en mayor porcentaje de emulsión por encima de un 40% se utiliza en taladros con presencia de agua
- ✓ **FLEXIGEL 60:** Emulsión de baja densidad, utilizada en zonas de control, no genera desplazamiento
- ✓ **FLEXIGEL 110:** Emulsión de baja densidad utilizada en zonas de control con presencia de agua
- ✓ **FORTIS EXTRA (GASIFICADO):** emulsión gasificada de alta potencia, utilizada para zonas extremadamente dura.

Tabla 6 Productos Standar de la EE de voladura.

Producto	Densidad gr/cc	Velocidad de Detonación m/s (*)	Energía Absoluta MJ/Kg	Energía Efectiva (100MPa) MJ/Kg	Potencia Relativa al Peso % (REE)	Potencia Relativa al Volumen % (RBS)	Vol. Gases l/Kg	Resist. al Agua	Ø Crítico	Densidad de carga lineal 10 5/8" Kg/m
ANFO	0.77 - 0.84	3700 - 4600	3.82	2.35 - 2.37	98 - 102	97 - 103	965	Nula	>2.0	44.07
HA 37	1.02 - 1.10	3800 - 4800	3.55	2.52 - 2.65	106 - 112	129 - 147	980	Nula	>3.5	57.23
HA 46	1.10 - 1.20	4000 - 5000	3.48	2.59 - 2.75	109 - 116	143 - 166	985	Mala	>4.0	65.82
HA 45/55	1.15 - 1.25	4200 - 5200	3.44	2.64 - 2.79	112 - 118	148 - 174	988	Regular	>5.0	70.97
HA 55	1.20 - 1.28	4500 - 5500	3.39	2.69 - 2.82	114 - 119	163 - 181	990	Buena	>5.0	72.68
HA 65/35	1.24 - 1.30	4300 - 5300	3.31	2.68 - 2.79	113 - 117	166 - 182	994	Buena	>5.5	74.4
HA 73	1.26 - 1.31	4200 - 5200	3.20	2.66 - 2.74	112 - 116	168 - 181	1000	Buena	>5.5	76.12

(*) Valores típicos en diámetros entre 9 7/8" - 12 1/4"

Fuente: Sánchez (2015)

Tabla 7 Productos Premiun de la EE de voladura.

Producto	Densidad gr/cc	Velocidad de Detonación m/s (*)	Energía Absoluta MJ/Kg	Energía Efectiva (100MPa) MJ/Kg	Potencia Relativa al Peso % (REE)	Potencia Relativa al Volumen % (RBS)	Vol. Gases l/Kg	Resist. al Agua	Ø Crítico	Densidad de carga lineal 10 5/8" Kg/m
Fortis Extra 55	1.19 - 1.29	4700 - 5700	3.5	2.74 - 2.90	115 - 122	163 - 187	986	Buena	>5.0	71.54
Fortis Extra 65	1.21 - 1.31	4500 - 5500	3.4	2.72 - 2.88	115 - 121	166 - 189	965	Buena	>5.0	74.40
Fortis Extra 70	1.24 - 1.34	4300 - 5300	3.31	2.70 - 2.85	114 - 120	168 - 191	992	Buena	>5.0	76.68
Flexigel 60	0.57 - 0.63	2500 - 3300	2.72	1.44 - 1.54	61 - 65	41 - 49	997	Buena	>5.0	34.34
Flexigel 110	1.05 - 1.10	3500 - 4500	2.99	2.24 - 2.32	94 - 98	118 - 128	1002	Buena	>5.0	62.95
Senatel 1 1/2"	1.15 - 1.25	4000 - 4800	3.5	2.30 - 2.57	98 - 110	133 - 165	905	Buena	>1.0	-

(*) Valores típicos en diámetros entre 9 7/8" - 12 1/4"

Fuente: Sánchez (2015)

3.3 Etapas de la investigación

Se desarrollan de la siguiente manera:

- Se realizó una investigación profunda de las variables a estudiar.
- Se planteó la metodología a seguir para alcanzar los objetivos propuestos.

- Se recolectaron los datos en campo referentes al P80 con el uso de Heavy ANFO y el Flexigel.
- Se tabularon en Excel los resultados obtenidos, los cuales están compuestos de 72 valores para el Heavy ANFO y el Flexigel respectivamente.
- Se procedió a realizar la eliminación de los valores atípicos a fin de hacer el respectivo análisis de datos llevando a cabo el cálculo de los elementos de la estadística descriptiva y corroborando si la distribución de los datos obtenidos corresponde a una distribución normal.
- Se contrastó la hipótesis con ayuda de la prueba estadística T de Student de una cola.
- Se emitieron los resultados y conclusiones pertinentes.



Figura 34 Primado y carguío de taladros.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1 Población y muestra

En el caso de la investigación que se está realizando a lo largo del presente trabajo de suficiencia en el que el propósito básico del estudio es describir la relación que guardan los agentes de voladura Heavy ANFO y Flexigel en la fragmentación de las voladuras de control se puede determinar que la muestra estaría representada por los registros de P50, P80 y Top Size obtenidos después de cada voladura en los proyectos SR 2378-0522 y SR2365-0517 las cuales fueron realizadas a través de las imágenes tomadas del frente de minado por medio de las cámaras instaladas en la cabina de los equipos de excavación que en nuestro caso sería una pala eléctrica PH 4100DC.

En este caso los registros obtenidos fueron de 72 elementos para cada voladura realizada tanto en la primera voladura con Heavy ANFO como en la segunda voladura efectuada con Flexigel las cuales conformaran nuestra muestra.

Considerando que cada disparo se generan un número indeterminado de registros visuales es que se considera a la Población como infinita.

3.3.2 Recolección de datos

a) Medición directa de la fragmentación

Al ser muy importante la fragmentación, como resultado directo del proceso de voladura, es necesario contar con un indicador directo de su medición, para ello se tiene que contar con las herramientas necesarias para poder medirla. En la unidad minera de la presente investigación se cuenta con el sistema SDR (Size Distribution Report) que es un sistema de toma de fotografías con cámaras que son instaladas en las Palas, las imágenes obtenidas durante el minado se

procesaran a través del Split Online. Con el SDR se puede obtener medidas de fragmentación desde el P10 hasta el Top Size, para luego generar el reporte por Pala, destino o por fase de minado. En la unidad minera en estudio se utiliza el sistema de cámaras en las palas, esto permite tener una mayor toma de muestras que el sistema tradicional que consiste tomar fotos manualmente del frente de las palas, exponiendo al personal y en muchos casos demoras no productivas de las palas para que se pueda realizar esta actividad.



Figura 35 Sistema de toma de fotografías en la pala.

Fuente: Dispatch Cerro Verde.

La cantidad de imágenes tomadas pasan a una base de datos, donde a través del Split Online se obtiene los resultados de fragmentación. Finalmente, el sistema SDR genera reportes instantáneos que ayudan a ver el performance de los diseños usados, esto reportes pueden ser por pala o por fase de minado y todo esto por fecha y hora en donde se revisan y redefinen los objetivos para P50, P80 y Top Size respectivamente.

Tabla 8 SDR cuadro resumen

Pala	Total Imágenes	Imágenes procesadas	Horas Operativas	% Imágenes procesadas	P50		P80		Top Size	
					Valor	Target	Valor	Target	Valor	Target
P06	243	232	22.4	95%	2.8	4.0	5.7	8	12.9	30
P07	359	354	20.8	99%	4.8	4.0	9	8	17.5	30
P09	480	255	22.3	53%	5.9	4.0	10.9	8	20.2	30
P11	185	183	20.8	99%	2.7	4.0	5.6	8	12.5	30
P12	280	278	16.9	99%	4.8	4.0	9.1	8	17.8	30
P14	409	212	21.4	52%	10.2	4.0	16	8	27.4	30
P15	754	672	22.4	89%	3.0	4.0	6	8	12.8	30
P16	631	554	21	88%	3.0	4.0	5.9	8	12.5	30
P17	492	467	21.5	95%	5.7	4.0	10	8	18.6	30
P18	420	411	20.2	98%	6.8	4.0	11.8	8	21.4	30
P19	480	325	21	68%	5.3	4.0	9.5	8	17.6	30
Total	4733	3943	230.7	85%						

Fuente: Elaboración propia.

b) Medición indirecta de la fragmentación

- **Rendimiento del equipo de excavación**

La obtención de los datos a fin de evaluar este parámetro se establece por la coordinación con el despachador de camiones de la unidad minera quien asigna determinada flota de camiones a cada pala, se reunirá en el sistema del administrador los datos a tratar como el rendimiento que se obtiene por el equipo de excavación, en este caso una pala electromecánica 4100DC (Pala 12) mientras estuvo realizando el carguío del material de los disparos realizados.

- **Flujo de chancado y potencia consumida**

Los datos obtenidos serán a partir del monitoreo realizado por el controlador del sistema de chancado quien administra la recepción del material transportado por los camiones asignados por el despachador de mina. El equipo principal del circuito de chancado primario es una chancadora giratoria de 60”

x 113” cuya alimentación es hasta fragmentos de 1200 mm y otorga una reducción de los fragmentos ingresados hasta alcanzar un producto de 165 mm. La potencia consumida es de 746 KW y el flujo de Tonelaje pasado es hasta de 2600 Ton/Hr.

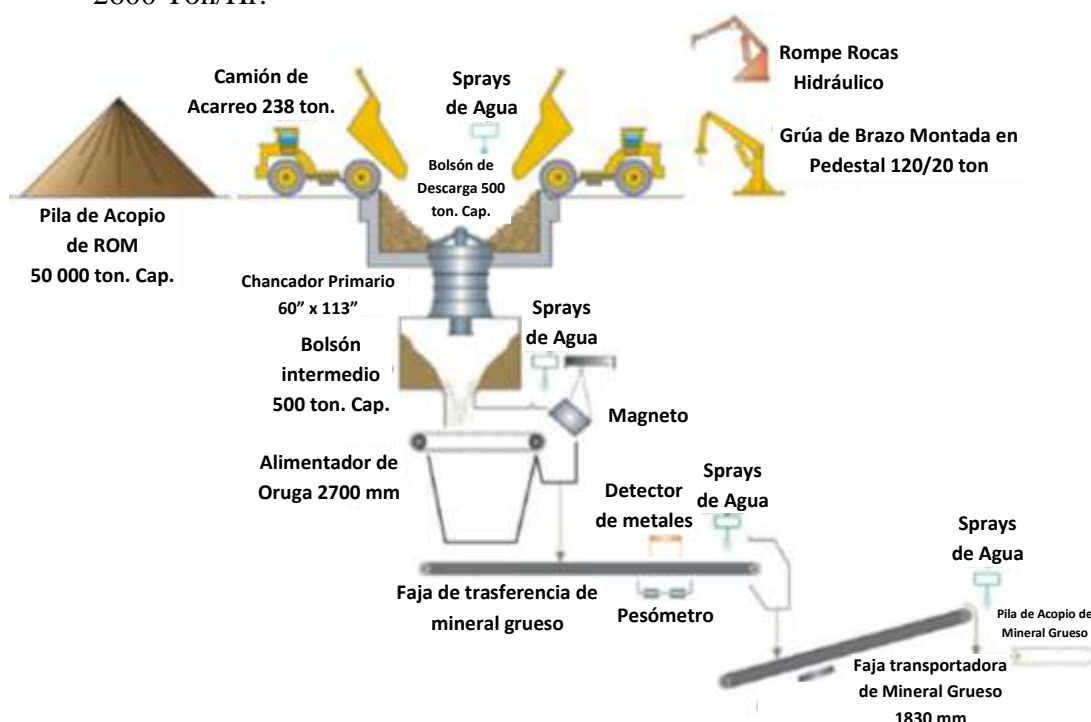


Figura 36 Circuito de chancado primario.

Fuente: Dispatch Cerro Verde.

3.3.3 Estrategia para la prueba de Hipótesis

Primero se procedió a analizar los datos y determinar su distribución, en el caso de no ser normal se procede a normalizarlo a través de una regresión con el programa SPSS. Para probar la hipótesis de esta investigación se hará uso de la estadística deductiva, a través de la prueba T de Student, se utiliza para identificar una diferencia significativa entre las medias de los dos grupos. En toda la estadística deductiva, se supone que las variables dependientes tienen una distribución normal. De forma específica se utilizará la prueba T de Student de una cola o

unilateral, la cual se utiliza cuando se conoce el signo de la potencial diferencia entre las muestras antes de ejecutar el experimento y la prueba.

a) Herramientas Estadísticas

De acuerdo a Sheldon (2018), la estadística se compone de métodos, procedimientos y fórmulas que recogen información para analizarla y sacar conclusiones adecuadas. Se puede decir que es una ciencia de los datos y su principal objetivo es mejorar la comprensión de los hechos a partir de la información disponible. Hay diferentes tipos de estadísticas:

- **Estadística descriptiva**

Se refiere a los métodos de recogida, organización, síntesis y presentación de un conjunto de datos. Se ocupa principalmente de describir las propiedades básicas de los datos y suele utilizar indicadores, gráficos y tablas. Se trata de tablas de frecuencia, diagramas de barras, gráficos de barras y de caja (Sheldon, 2018).

- **Estadística inferencial**

Es un paso más allá de la simple descripción. Se trata de métodos utilizados para hacer predicciones y generalizaciones y para sacar conclusiones de los datos analizados, teniendo en cuenta el grado de incertidumbre. Para ello vemos que el objetivo es realizar inferencias, esas inferencias con respecto a una población, pero a partir de la información o los datos obtenidos de una muestra. (Sheldon, 2018).

b) Distribución Normal:

Según Sheldom (2018) dentro de la estadística inferencial vamos a encontrar que en muchas ocasiones se nos da un punto de referencia que denominan distribución normal, esto es básicamente un criterio con el que se puede comparar algo. De esa manera encontramos que mucho de los fenómenos que existen dentro de los campos de investigación se distribuyen de una forma normal. Es decir que si tomamos al azar un número de casos vamos a encontrar que esos datos van a constituir un polígono de frecuencias que de alguna manera nos van a dar paso a una curva normal o campana de gauss. Lo que hace esa curva normal es que nos describe la frecuencia del comportamiento que está teniendo una variable continua y a partir de esa distribución normal se basa el análisis estadístico inferencial.

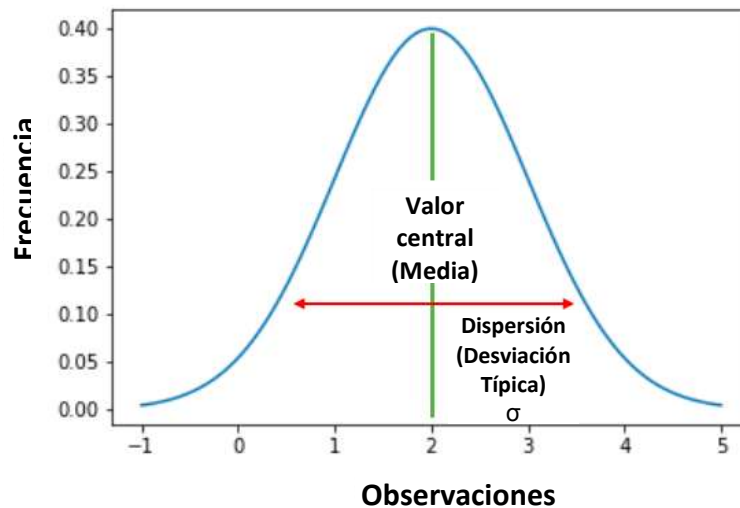


Figura 37 Distribución normal o Campana de gauss.

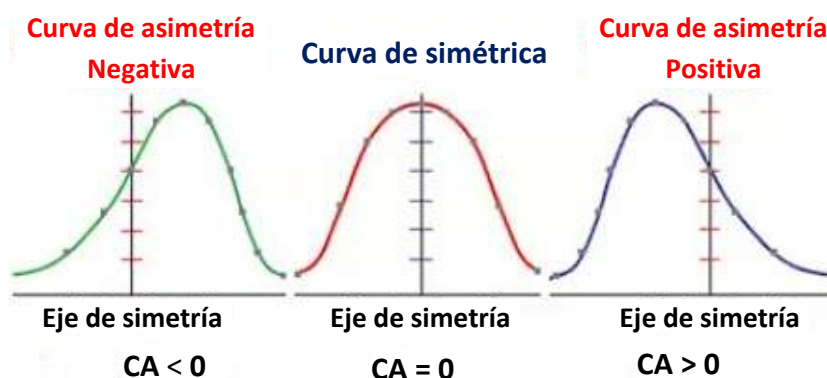
Fuente: Sheldom (2018).

c) Medidas de asimetría y curtosis:

Resulta que van existir algunos casos en lo que los datos no toman exactamente la forma de la curva normal, en ese caso a mencionar dos procesos el de asimetría y curtosis.

La asimetría y curtosis son dos tipos de medidas de forma que nos va indicar la morfología de la distribución de los datos, es decir la asimetría y la curtosis nos van a indicar a nosotros como es la forma o cual es el comportamiento de la forma que está teniendo esa distribución de los datos, si es simétrica, si va ser asimétrica o si va tener un apuntamiento de una manera u otra.

COEFICIENTE DE ASIMETRÍA



COEFICIENTE DE CURTOSIS

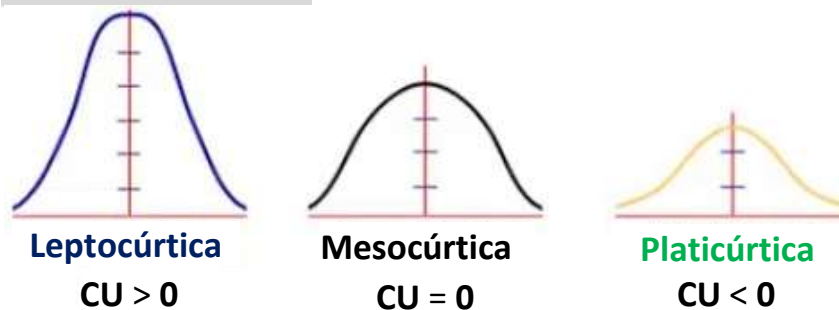


Figura 38 Coeficiente de asimetría y de curtosis.

Fuente: Sheldon (2018).

d) Prueba de normalidad

Se utilizan para determinar si un conjunto de datos está bien modelado por una distribución normal o no, o para calcular la probabilidad de una variable aleatoria de fondo es que se distribuye normalmente. Para este caso se utilizará la prueba de Kolmogorov-Smirnov debido a que la muestra es mayor a 50 sujetos (Sheldon, 2018).

e) Prueba T de Student para muestras relacionadas

Se dice que dos muestras son relacionadas o son pareadas, esto es cuando una variable dependiente es medida en la misma muestra en dos tiempos distintos, generalmente se utilizan en estudios experimentales en donde tenemos dos mediciones en la misma muestra. Las muestras de poblaciones presentan necesariamente una distribución normal y se puede presentar los siguientes casos:

$$H_0: \mu_d = 0 \quad H_0: \mu_d \leq 0 \quad H_0: \mu_d \geq 0$$

$$H_1: \mu_d \neq 0 \quad H_1: \mu_d > 0 \quad H_1: \mu_d < 0$$

Estadístico de prueba:

$$t = \frac{d}{S_d / \sqrt{n}} \quad S_d = \sqrt{\frac{(d_i - d)^2}{n - 1}}$$

Donde: t = Estadístico t calculado. Sd = Desv. Estándar de las diferencias.

d = Promedio de las diferencias.

Que sigue una distribución con n – 1 grados de libertad.

Se rechaza la hipótesis nula (H₀) si:

$$t < -t_{(1-\frac{\alpha}{2})(n-1)} \text{ o } t > t_{(1-\frac{\alpha}{2})(n-1)} \text{ (Bilateral)}$$

$$t > t_{(1-\alpha)(n-1)} \text{ (Unilateral derecha)}$$

$$t < t_{(1-\alpha)(n-1)} \text{ (Unilateral izquierda)}$$

3.4 Matriz de consistencia

Se desarrolla la matriz de consistencia de la presente investigación a fin de realizar la evaluación del grado de conexión y enlace lógico existente entre el título, el problema, los objetivos, las hipótesis, las variables, la metodología de contrastación de hipótesis, diseño de investigación, la población y muestras del presente estudio.

Tabla 9 Matriz de consistencia.

MATRIZ DE CONSISTENCIA					
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA DE CONTRASTACIÓN DE HIPOTESIS	DISEÑO
<p>General:</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿En qué medida se mejora la fragmentación al emplear Flexigel y Heavy ANFO en los procesos de voladuras de control? <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál de los dos agentes de voladura, como lo son Flexigel y el Heavy ANFO, impacta de mejor forma en los procesos posteriores como el carguío, transporte y chancado en una operación a tajo abierto? 	<p>General:</p> <ul style="list-style-type: none"> Mejorar la fragmentación P80 obtenida con el uso del Flexigel en lugar del Heavy ANFO en el proceso de voladuras de control en una operación a tajo abierto. <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Definir el impacto de los dos agentes de voladura en los procesos de carguío y chancado. 	<p>General:</p> <ul style="list-style-type: none"> La fragmentación P80 con el uso del Flexigel en el proceso de fragmentación de voladuras de control en una operación a tajo abierto es menor al obtenido con el uso del Heavy ANFO. 	<p>Variable Independiente 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> Heavy ANFO. <p>Variable Independiente 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> Flexigel. <p>Variable Dependiente 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fragmentación P80. 	<p>Técnica para prueba de hipótesis:</p> <ul style="list-style-type: none"> Prueba T Student (Comparación de medias). <p>Mecanismo de medición directa:</p> <ul style="list-style-type: none"> Fragmentación P80 <p>Mecanismo de medición indirecta:</p> <ul style="list-style-type: none"> Rendimiento del equipo de excavación. Flujo de tonelaje pasante y Energía empleada en Chancadora. 	<p>Enfoque: Cuantitativo</p> <p>Alcance: Aplicado - Explicativo</p> <p>Diseño: Experimental – transversal</p> <p>Población y muestra: La población es infinita y la muestra está representada por los 72 registros de fragmentación P80 de cada voladura de control con Heavy ANFO y Flexigel respectivamente.</p> <p>Instrumento: Ficha de observación y registro de datos</p> <p>Técnica: Observación directa en campo.</p>

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentarán los datos del diseño de los disparos de control y resultados que generaron los agentes de voladura en cuanto a los rendimientos del equipo de excavación en el proceso de carguío, el flujo de material pasante y energía consumida en el proceso de chancado, así como las vibraciones generadas en el que se determina que dichos indicadores mejoran con el uso del Flexigel

4.1 Aplicación específica

La comparación se basará en dos proyectos de control disparados en el lado Sureste del tajo SR los cuales serán efectuados considerando el diseño de carga en base los agentes de voladura Heavy ANFO y Flexigel. Como cualquier voladura de control se cuenta también con taladros de precorte, en este caso se tiene que para este sector el precorte ha sido diseñado con ángulo de 80° y cargado con explosivo encartuchado para la evaluación dicho precorte se disparó en día anteriores junto con el proyecto de producción aledaño.

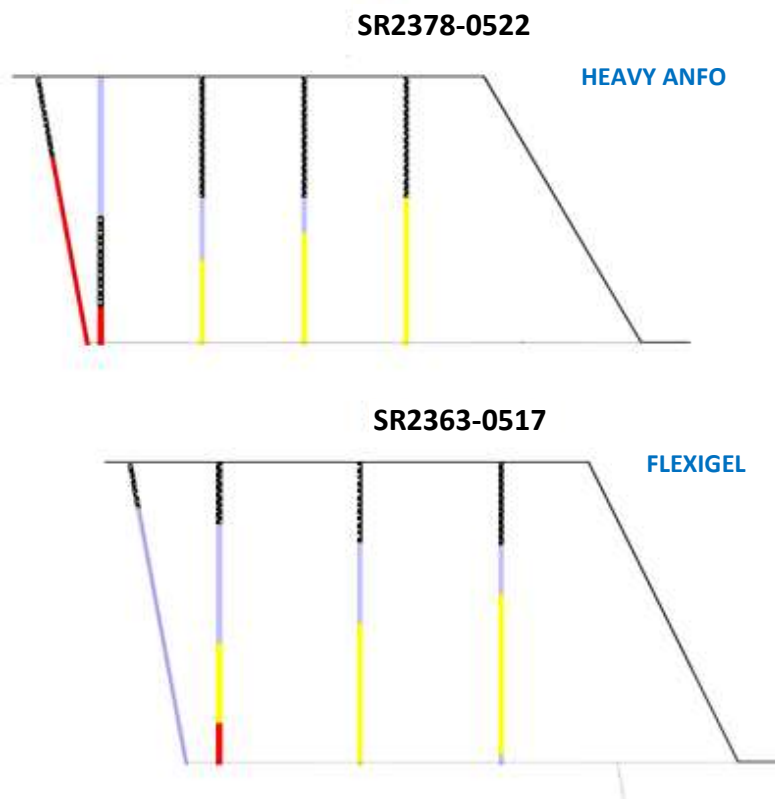


Figura 39 Perfiles de los proyectos a evaluar.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Voladura SR2378-0522

Proyecto: SR2378-0522

Patrón de control: 6 – 6 – 6 – 6 m

Longitud de sobre perforación: 0 – 1 – 1.5 – 1.5 m

Tiempo entre taladros: 58 ms

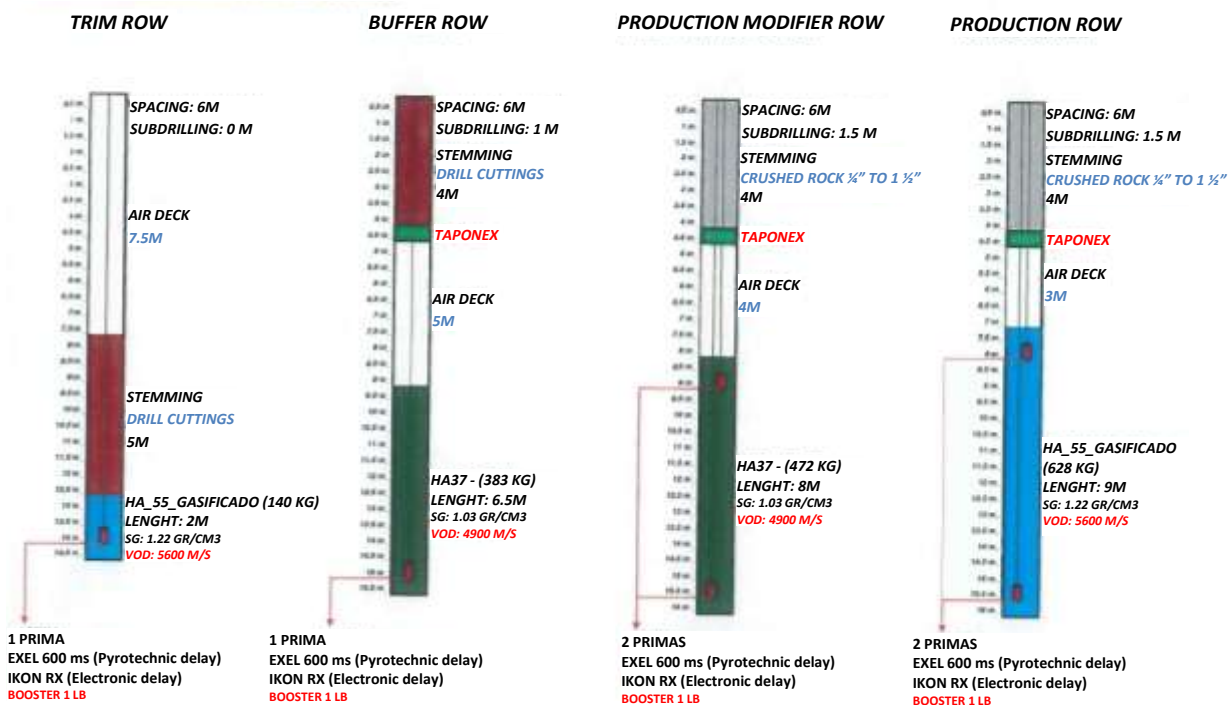
Tiempo entre filas: 113 ms

Cantidad de taladros: 90

RQD: 83 / UCS: 145 Mpa

Altura de banco promedio: 14.5 m

HARD ROCK DESIGN WITHOUT WATER - CONTROL



AVERAGE ROCK DESIGN WITHOUT WATER - CONTROL

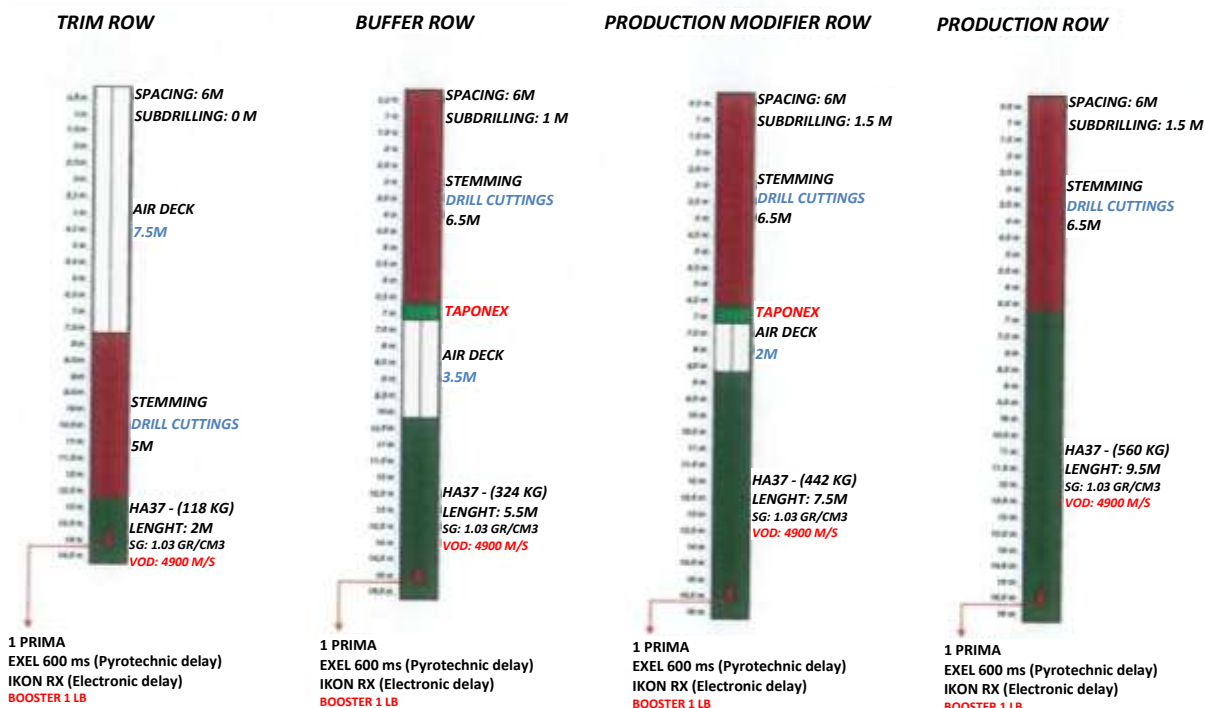


Figura 40 Diseño de cargas SR 2378-0522 para zonas con roca dura y media.

Fuente: Elaboración propia.

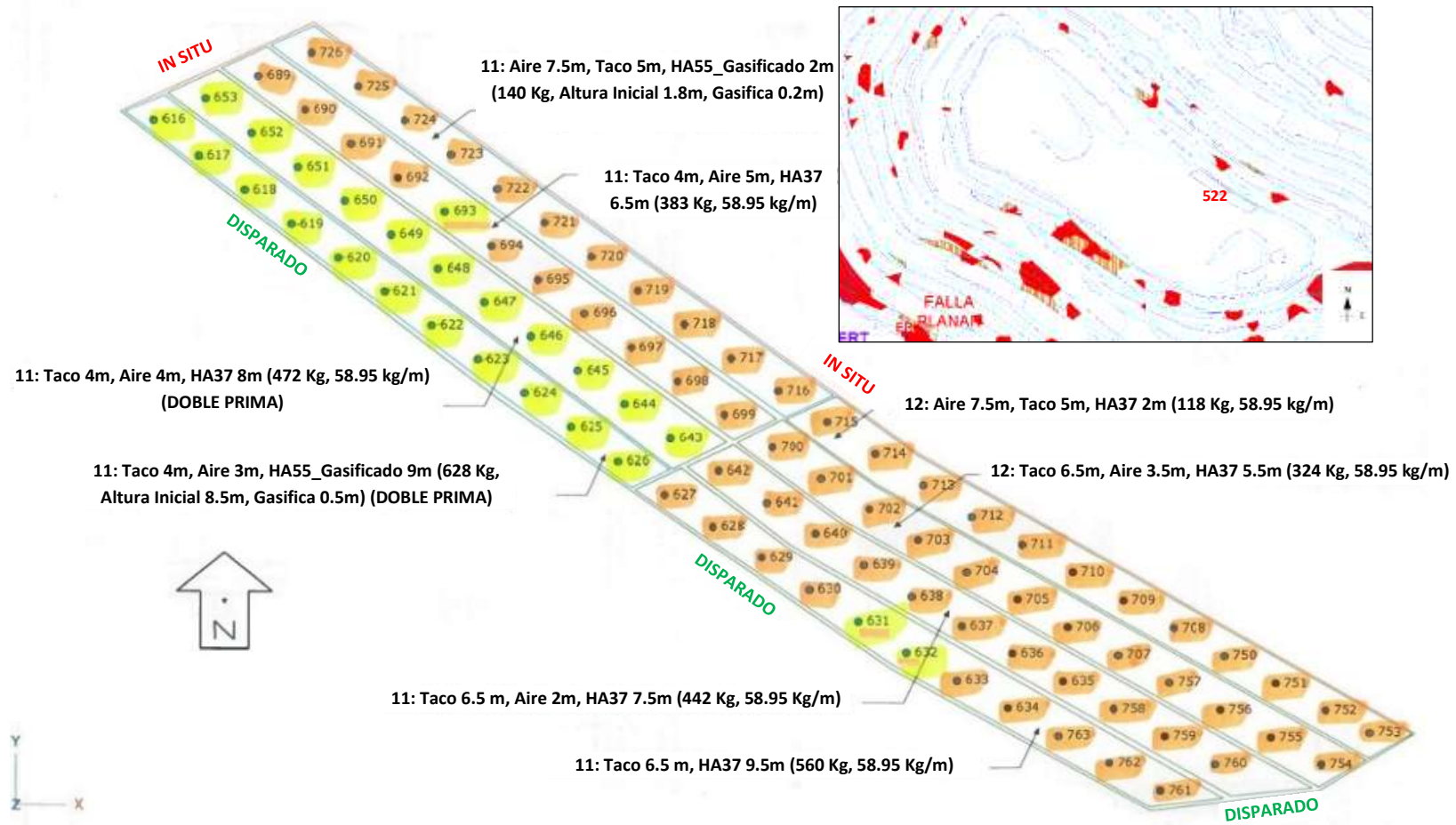


Figura 41 Plano de detalles y ubicación SR 2378-0522.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los diseños de carga establecidos se realiza el cálculo del consumo de explosivos y costos del mismo en cada fila, así como el factor de potencia, costo total del explosivo y costo del explosivo por tonelada de todo el proyecto de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 10 Factor de Potencia y costo de explosivos SR2378-0522

Design Data	Trim		Buffer		Producción Modificada		Producción	
Diámetro Taladro (mm)	270	270	270	270	270	270	270	270
Tipo de roca	Media	Dura	Media	Dura	Media	Dura	Media	Dura
Profundidad de taladro (m)	14.5	14.5	15.5	15.5	16	16	16	16
Espaciamiento (m)	6	6	6	6	6	6	6	6
Burden (m)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
Densidad de la roca (g/cc)	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68	2.68
Agente de Voladura	HA37	HA55gas	HA37	HA37	HA37	HA37	HA37	HA55gas
Número de taladros	12	11	12	11	11	11	11	11
Kilogramos de explosivo / taladro (Kgs/tal)	118	140	324	383	442	472	560	628
Toneladas / taladro (TM/tal)	1212.43	1212.43	1296.05	1296.05	1337.86	1337.86	1337.86	1337.86
Factor de Potencia (Kgs/TM)	0.10	0.12	0.25	0.30	0.33	0.35	0.42	0.47
Kilogramos Totales Explosivo (Kgs)	1416	1540	3888	4213	4862	5192	6160	6908
Toneladas totales rotas (TM)	14549.18	13336.75	15552.58	14256.53	14716.42	14716.42	14716.42	14716.42
Energía Absoluta (MJ/Kgs)	3.55	3.39	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55	3.39
Factor de Energía (KJ/TM)	345.50	391.44	887.47	1049.07	1172.85	1252.45	1485.96	1591.29

Kilogramos Totales Explosivo (Kgs)	34179
Toneladas totales rotas (TM)	116560.70
Factor de Energía (KJ/TM)	1029.37
Factor de Potencia (Kgs/TM)	0.29

Costo de explosivos (\$)	736.32	831.60	2021.76	2190.76	2528.24	2699.84	3203.20	3730.32
Costo de explosivos/Tonelada rota	0.05	0.06	0.13	0.15	0.17	0.18	0.22	0.25
Costo total de explosivos (\$/Ton)							17,942.04	
Costo (\$/Ton)							0.154	

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Voladura SR2363-0517

Proyecto: SR2363-0517

Patrón de control: 7 – 7 – 8.5 m

Longitud de sobre perforación: 0 – 0 – 1 m

Cantidad de taladros: 50

Tiempo entre taladros: 39 ms

Tiempo entre filas: 72 ms

RQD: 85 / UCS: 160 Mpa

Altura de banco promedio: 15 m

HARD ROCK DESIGN WITHOUT WATER - CONTROL

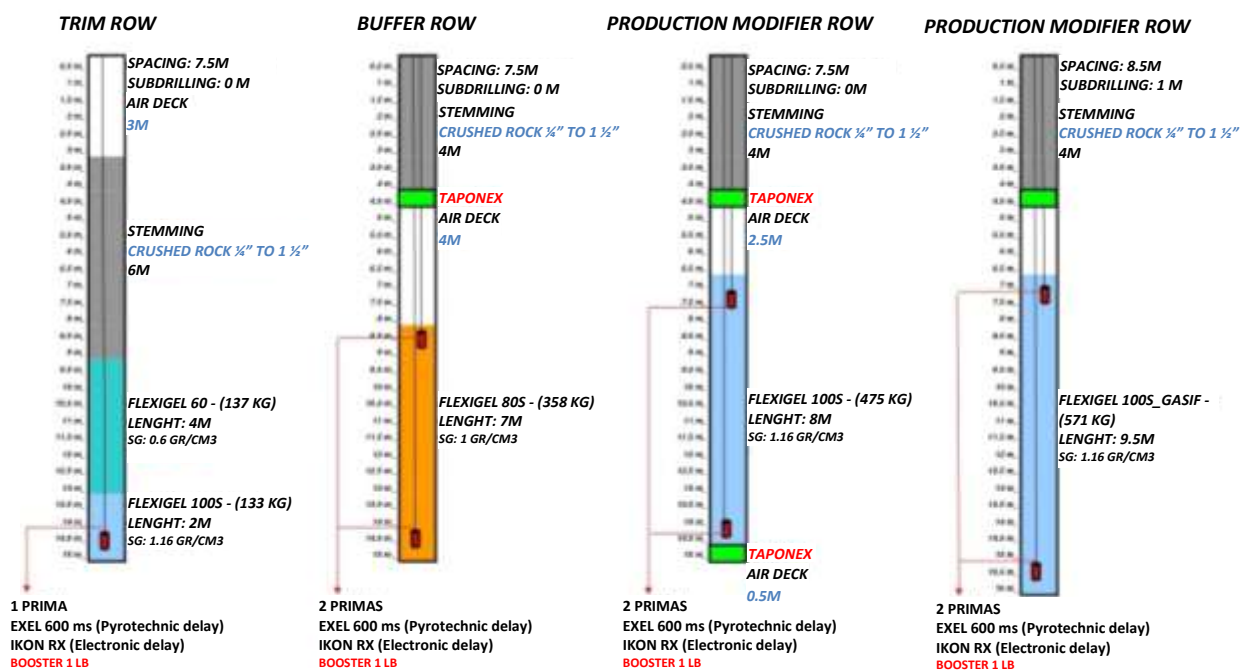


Figura 42 Diseño de cargas SR 2363-0517 para zonas con roca dura.

Fuente: Elaboración propia.

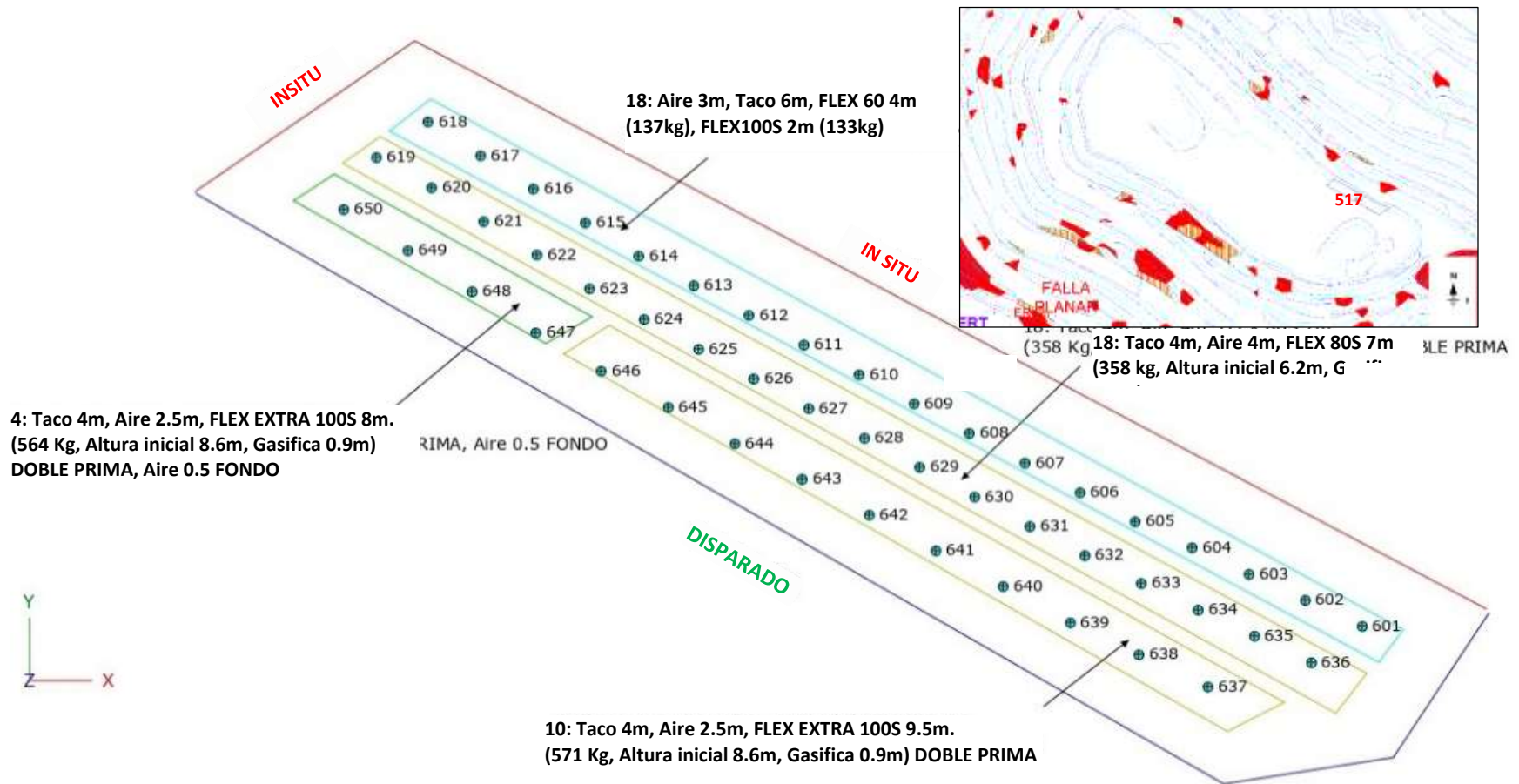


Figura 43 Plano de detalles y ubicación SR 2363-0517.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los diseños de carga establecidos se realiza el cálculo del consumo de explosivos y costos del mismo en cada fila, así como el factor de potencia, costo total del explosivo y costo del explosivo por tonelada de todo el proyecto de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 11 Factor de Potencia y costos de explosivos SR2365-0517

Design Data	Trim		Buffer	Producción Modificada	
Diámetro Taladro (mm)	270		270	270	270
Tipo de roca	Dura		Dura	Dura	Dura
Profundidad de taladro (m)	15		15	15	16
Espaciamiento (m)	7.5		7.5	8.5	7.5
Burden (m)	6.5		6.5	7	6.5
Densidad de la roca (g/cc)	2.71		2.71	2.71	2.71
Agente de Voladura	Flexigel 60	Flexigel 100S	Flexigel 80S	Flexigel 100S	Flexigel 100S
Número de taladros	18		18	4	10
Kilogramos de explosivo / taladro (Kgs/tal)	133	137	358	564	571
Toneladas / taladro (TM/tal)	1981.69		1981.69	2418.68	2113.80
Factor de Potencia (Kgs/TM)	0.07		0.18	0.23	0.27
Kilogramos Totales Explosivo (Kgs)	2394	2466	6444	2256	5710
Toneladas totales rotas (TM)	35670.375		35670.375	9674.7	2113.80
Energía Absoluta (MJ/Kgs)	2.72	2.96	2.88	2.96	2.96
Factor de Energía (KJ/TM)	182.55	198.66	520.28	690.23	799.58

Kilogramos Totales Explosivo (Kgs)	19270
Toneladas totales rotas (TM)	102153.45
Factor de Energía (KJ/TM)	547.70
Factor de Potencia (Kgs/TM)	0.19

Costo de explosivos (\$)	4131.00	5477.40	4853.50	4853.50
Costo de explosivos/Tonelada rota	0.12	0.15	0.23	0.23
	Costo total de explosivos (\$)			16379.50
	Costo (\$/Ton)			0.160

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Obtención de resultados

4.2.1 Resultados Voladura SR2378-0522

Luego de realizado el disparo y con la Pala 12 minando el material disparado se obtuvieron un total de 72 registros de fotografías tomadas por la cámara instalada en la parte superior de la cabina del equipo de excavación, luego de procesar dichas imágenes en el Split One se obtienen una serie de valores de fragmentación P80, los cuales serán revisados en el apartado 4.3, algunas de las imágenes obtenidas por la Pala eléctrica se muestran a continuación:

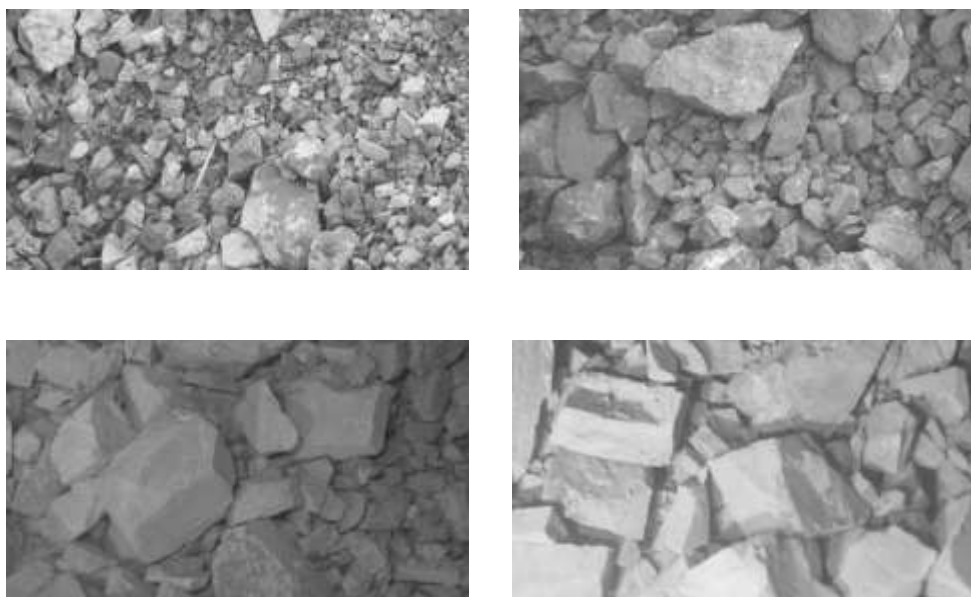
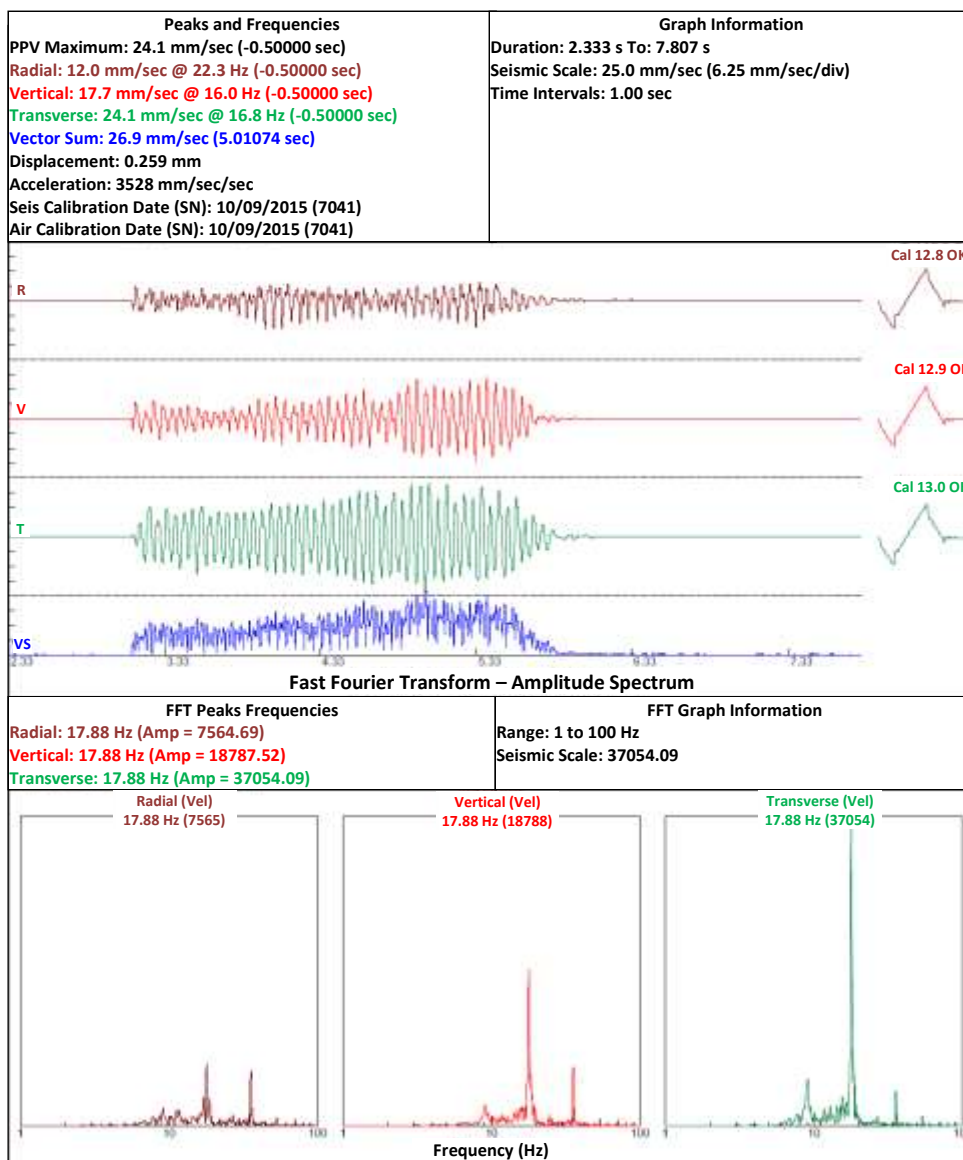


Figura 44 Imágenes obtenidas SDR SR 2378-0522.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se obtienen los valores de las ondas generadas por la voladura, las cuales fueron registrados por un geófono ubicado a 143.03 m de la zona disparada y cuyos resultados se detallan según la siguiente figura:



Geophone Records			
VPP (mm/s)		Frecuency (Hz)	
VPP_R	12	Frec_Rad	17.88
VPP_V	17.7	Frec_Ver	17.88
VPP_T	24.1	Frec_Tra	17.88
VPP	26.9	DOM.FREQ.	17.88

Figura 45 Registro vibraciones obtenidas SR 2378-0522.

Fuente: Elaboración propia.

Según el registro de ondas identificadas por el geófono se tiene que la onda longitudinal reporta un valor de 12 mm/s, la onda vertical reporta un valor de 17.7

mm/s y la onda transversal reporta un valor de 24.1 mm/s, en cuanto el vector suma este presenta un valor de VPP de 26.9 mm/s.



Figura 46 Reporte Geotécnico SR2378-0522

Fuente: Geotecnia Cerro Verde.

Además de acuerdo a la opinión del supervisor de Geotecnia quien realiza la inspección en campo luego de efectuado el disparo y en base a las ondas de vibración registradas llega a corroborar la presencia de daños en el talud circundante con desprendimientos de rocas, movimiento de estructuras además de constatar la presencia de algunas rocas colgadas producto del impacto de dichas ondas y energía liberada durante el disparo. Asimismo, luego de culminado el minado del material volado, Geotecnia determinó a partir de la reconciliación geotécnica de toes y crestas de la zona evaluada detallado en el Anexo 1 que la zona disparada con Heavy ANFO terminó con un ángulo de talud de 65°.

Como parte de la medición indirecta de la variable fragmentación P80 se tuvo que durante el minado del equipo de excavación se registraron también datos respecto a la productividad de minado en el disparo SR2378-0522 dentro de los cuales se

obtiene para la Pala 12 un promedio de rendimiento de 8032.24 Tn/Hr, dichos datos se muestran a continuación:

Tabla 12 Resultados del rendimiento Pala12 en el proyecto SR 2378-0522.

Registro	Modelo	Equipo	Tajo	Fase	Banco	Agente de Voladura	Rendimiento (Tn/Hr)
1	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	7498.09
2	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	8325.19
3	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	7976.56
4	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	8448.15
5	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	7840.43
6	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	8400.83
7	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	8508.58
8	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	7652.08
9	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	7284.68
10	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	8249.55
11	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	7913.45
12	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	8289.36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13 Resultados de los flujos de chancado y potencia SR 2378-0522.

Registro	Modelo	Equipo	Tajo	Fase	Banco	Agente de Voladura	Flujo Chancado (Tn/Hr)	Potencia (KW)
1	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2326	1157
2	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2202	1074
3	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2354	1244
4	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2255	1081
5	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2051	939
6	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2227	1051
7	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2108	990
8	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2247	1107
9	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2125	1171
10	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2145	1009
11	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2123	1079
12	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2058	980
13	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2404	1214
14	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2214	1083
15	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2378-0522	Heavy ANFO	2107	994

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, respecto al flujo de tonelaje pasante en chancadora expresada en Ton/Hr y la energía empleada del sistema expresada en KW, las cuales son requeridas para realizar la reducción de los fragmentos de la voladura con el agente de voladura Heavy ANFO que han sido transportados a chancadora por medio de los camiones de acarreo, se tiene que en el grupo de registros obtenidos se tuvo un valor promedio de 2196.40 Ton/Hr y un promedio de consumo de energía de 1078.20 KW; dicha información se adjunta en la Tabla 13 como parte también de la medición indirecta de la fragmentación P80.

4.2.2 Resultados Voladura SR2363-0517

Asimismo, luego de realizado el disparo y con la Pala minando el material disparado se obtuvieron también un total de 72 registros de fotografías tomadas por la cámara instalada en el equipo de excavación, luego de procesar dichas imágenes en el Split One se obtienen una serie de valores de fragmentación P80, los cuales serán revisados en el apartado 4.3, algunas de estas imágenes se muestran a continuación:

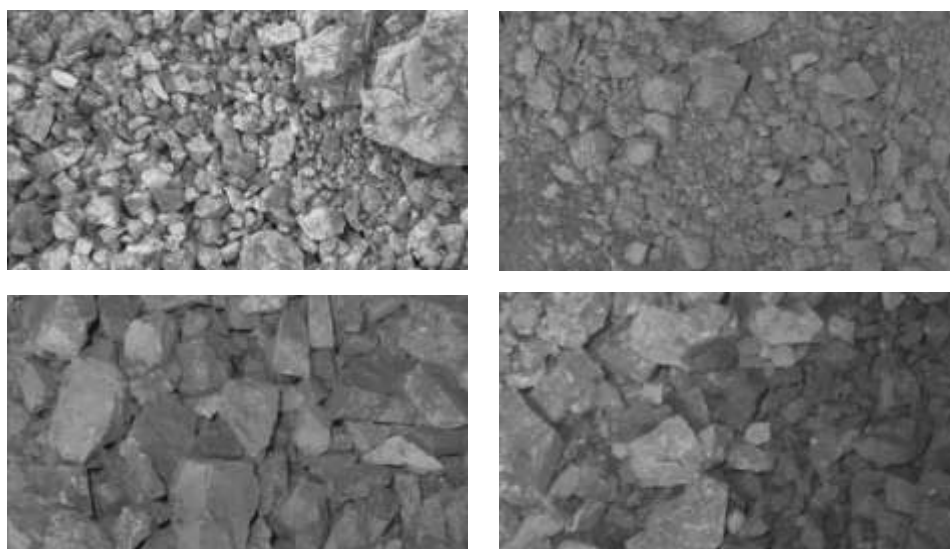
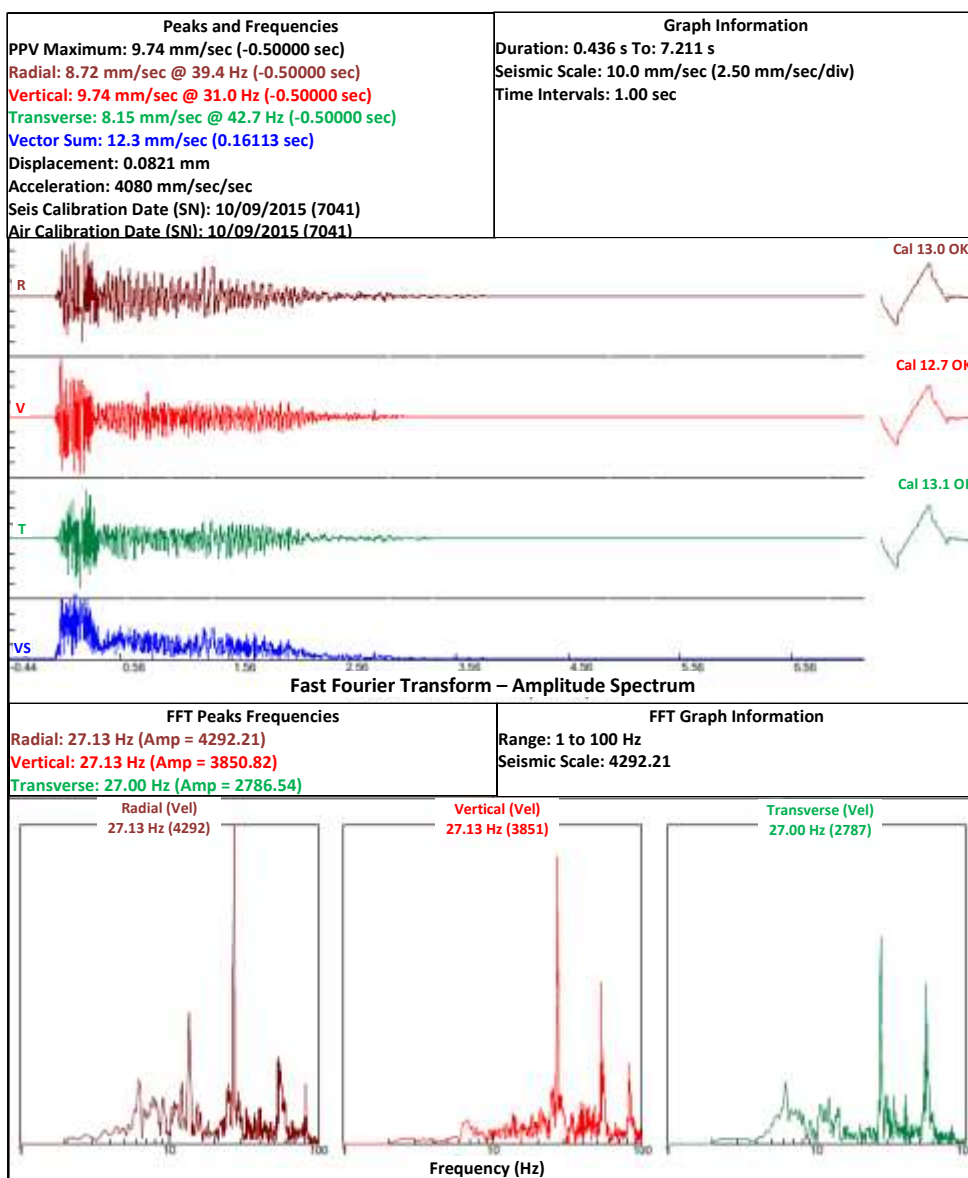


Figura 47 Imágenes obtenidas SDR SR 2363-0517.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se obtienen los valores de las ondas generadas por la voladura, las cuales fueron registrados por un geófono ubicado a 216.22 m de la zona disparada y cuyos resultados se detallan según el siguiente cuadro:



Geophone Records			
VPP (mm/s)		Frecuency (Hz)	
VPP_R	8.72	Frec_Rad	27.13
VPP_V	9.74	Frec_Ver	27.13
VPP_T	8.15	Frec_Tra	27
VPP	12.3	DOM.FREQ.	27.00

Figura 48 Registro vibraciones obtenidas SR 2363-0517.

Fuente: Elaboración propia.

Según el registro de ondas identificadas por el Geófono se tiene que la onda longitudinal reporta un valor de 8.72 mm/s, la onda vertical reporta un valor de 9.74 mm/s y la onda transversal reporta un valor de 8.15 mm/s. En cuanto el vector suma este presenta un valor de VPP de 12.3 mm/s.



Figura 49 Reporte Geotécnico SR2363-0517.

Fuente: Geotecnia Cerro Verde.

En cuanto al proyecto SR2363-517 el supervisor de Geotecnia quien realiza la inspección en campo luego de efectuado el disparo y en base a las ondas de vibración registradas corrobora que no hay mayores daños en el talud circundante, tampoco reporta movimiento de estructuras, sobrequebres o grietas significativas en las inmediaciones de la zona disparada. Asimismo, luego de culminado el minado del material volado, Geotecnia determinó a partir de la reconciliación geotécnica de toes y crestas de la zona evaluada detallada en el Anexo 2 que la zona disparada con Flexigel terminó con un ángulo de talud de 71°.

Como parte de la medición indirecta de la variable fragmentación (P80) se tuvo que durante el minado del equipo de excavación se registraron también datos

respecto a la productividad de minado del material disparado dentro de los cuales se obtiene para la Pala 12 un promedio de rendimiento de 8416.50 Tn/Hr, dichos datos se muestran a continuación:

Tabla 14 Resultados del rendimiento Pala12 en el proyecto SR 2365-0517.

Registro	Modelo	Equipo	Tajo	Fase	Banco	Agente de Voladura	Rendimiento (Tn/Hr)
1	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	7609.15
2	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8849.88
3	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8206.18
4	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8165.20
5	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8681.97
6	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	7984.93
7	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8951.14
8	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	9092.35
9	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8535.32
10	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	9029.39
11	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	7636.70
12	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	8255.76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15 Resultados de los flujos de chancado y potencia SR 2365-0517.

Registro	Modelo	Equipo	Tajo	Fase	Banco	Agente de Voladura	Flujo Chancado (Tn/Hr)	Potencia (KW)
1	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2358	1008
2	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2154	723
3	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2098	704
4	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2283	988
5	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2273	859
6	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2201	835
7	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2336	1168
8	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2204	858
9	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2284	923
10	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2269	838
11	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2434	1157
12	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2302	949
13	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2486	1058
14	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2412	1410
15	P&H 4100XPC	12	Santa Rosa	IV	SR 2365-0517	Flexigel	2340	1381

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la Tabla 15 se tiene que para el caso del agente de voladura Flexigel, el flujo de tonelaje pasante en chancadora promedio es de 2295.60 Ton/Hr y el consumo de energía promedio es de 990.60 KW.

4.2.3 Preparación y análisis de la información

Para probar la hipótesis planteada en el estudio de acuerdo a las mediciones de los valores de fragmentación P80 obtenidos, a partir de las imágenes tomadas por la Pala N°12 durante el minado de la misma luego de efectuarse los disparos con los agentes de voladura Heavy ANFO y Flexigel, primero se procede a determinar si dentro del conjunto de datos obtenidos existen ciertos valores atípicos y para ello se realizó un gráfico de caja y bigote, el cual se muestra, a continuación:

Tabla 16 Valores de P80 sin tratamiento estadístico.

	P80	
	Heavy ANFO	Flexigel
1	12.36	11.81
2	9.71	11.69
3	10.57	11.78
4	14.60	13.51
5	11.25	6.35
6	13.66	9.13
7	14.05	4.97
8	12.63	10.05
9	12.88	7.72
10	9.99	6.62
11	8.22	6.36
12	11.92	8.58
13	12.05	4.21
14	10.48	3.75
15	11.26	6.55
16	9.48	5.43
17	10.16	7.39
18	12.21	8.89
19	9.49	8.09
20	9.89	9.40
21	13.29	11.96
22	15.65	9.74
23	9.35	8.24
24	9.96	6.26
25	8.82	10.60
26	36.43	9.94

27	9.97	10.44
28	8.81	10.76
29	9.67	9.46
30	10.51	11.58
31	9.77	10.83
32	9.09	15.90
33	15.89	13.36
34	10.85	16.03
35	11.11	10.04
36	15.29	15.80
37	17.79	16.41
38	12.49	9.88
39	18.45	18.38
40	13.94	13.78
41	12.36	19.85
42	7.85	12.64
43	10.68	15.53
44	15.22	15.79
45	9.23	12.20
46	12.35	10.30
47	12.03	12.12
48	14.61	10.69
49	15.42	13.77
50	17.75	16.91
51	18.52	19.26
52	20.28	11.08
53	16.03	17.11
54	11.80	10.47
55	11.79	10.77
56	11.34	16.96
57	9.20	10.91
58	13.10	13.30
59	17.56	12.68
60	14.88	13.01
61	32.09	10.22
62	14.38	12.72
63	15.35	11.82
64	15.61	14.30
65	14.99	13.62
66	14.72	11.04
67	17.65	15.47
68	20.62	11.84
69	11.90	12.98
70	13.30	9.28
71	21.12	18.46
72	13.20	9.61

Fuente: Elaboración propia.

Se entiende que para tener un patrón de datos fidedigno es necesario darles un tratamiento a los valores de fragmentación P80 de los registros obtenidos con los

agentes de voladura Heavy ANFO y Flexigel eliminando los valores atípicos (tanto superiores como inferiores) a fin de no desviar el comportamiento de la masa central de datos. Entonces en el análisis estadístico es necesario considerar que para tener un adecuado patrón de comportamiento de los datos es indispensable retirar estos valores atípicos.

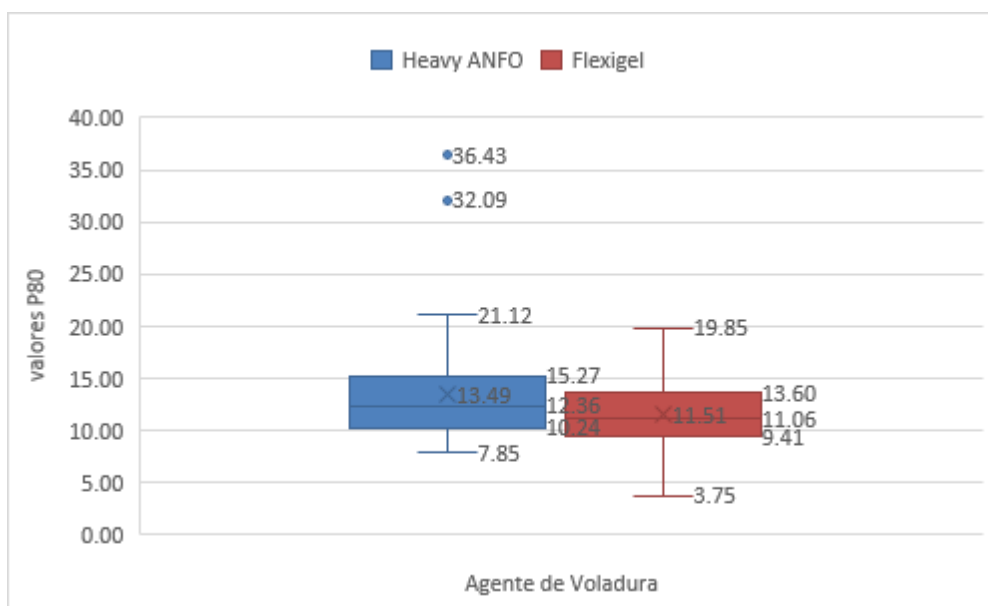


Figura 50 Análisis de valores atípicos por caja y bigotes

Fuente: Elaboración propia.

Con base en la figura 50, se procedió a eliminar los dos valores atípicos encontrados en la medición del Heavy ANFO, correspondientes a 36,43 y 32,09. Contando ahora la lista de valores, se totalizaron 70 datos para la variable independiente Heavy ANFO y 72 valores para la variable independientes Flexigel, los cuales permitirán la aplicación de la prueba t de Student, quedando como resultado la siguiente base de datos:

Tabla 17 Valores de P80 para ambos explosivos.

	P80	
	Heavy ANFO	Flexigel
1	12.36	11.81
2	9.71	11.69
3	10.57	11.78
4	14.60	13.51
5	11.25	6.35
6	13.66	9.13
7	14.05	4.97
8	12.63	10.05
9	12.88	7.72
10	9.99	6.62
11	8.22	6.36
12	11.92	8.58
13	12.05	4.21
14	10.48	3.75
15	11.26	6.55
16	9.48	5.43
17	10.16	7.39
18	12.21	8.89
19	9.49	8.09
20	9.89	9.40
21	13.29	11.96
22	15.65	9.74
23	9.35	8.24
24	9.96	6.26
25	8.82	10.60
26	9.97	9.94
27	8.81	10.44
28	9.67	10.76
29	10.51	9.46
30	9.77	11.58
31	9.09	10.83
32	15.89	15.90
33	10.85	13.36
34	11.11	16.03
35	15.29	10.04
36	17.79	15.80
37	12.49	16.41
38	18.45	9.88
39	13.94	18.38
40	12.36	13.78
41	7.85	19.85
42	10.68	12.64
43	15.22	15.53
44	9.23	15.79
45	12.35	12.20
46	12.03	10.30
47	14.61	12.12
48	15.42	10.69
49	17.75	13.77
50	18.52	16.91
51	20.28	19.26

52	16.03	11.08
53	11.80	17.11
54	11.79	10.47
55	11.34	10.77
56	9.20	16.96
57	13.10	10.91
58	17.56	13.30
59	14.88	12.68
60	14.38	13.01
61	15.35	10.22
62	15.61	12.72
63	14.99	11.82
64	14.72	14.30
65	17.65	13.62
66	20.62	11.04
67	11.90	15.47
68	13.30	11.84
69	21.12	12.98
70	13.20	9.28
71		18.46
72		9.61

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4 Comparación de resultados

Para tener una referencia de los resultados obtenidos en los disparos realizados con cada agente de voladura se presenta el siguiente cuadro cuyos valores de medición directa e indirecta relativos a la fragmentación se muestran a continuación, los cuales serán discutidos a detalle en el siguiente capítulo.

Tabla 18 Cuadro comparativo de resultados.

Voladura	Precio Agente de Voladura (\$/Kg)	Factor de Potencia (Kgs/TM)	P80 (pulg)	Costo (\$/Ton)	Productividad Pala (Ton/Hr)	Productividad Chancadora (Ton/Hr)	Energía Consumida Chancadora (KW)
SR 2378-0522 Heavy ANFO	0.53	0.29	12.9	0.154	8032.24	2196.4	1078.2
SR 2363-0517 Flexigel	0.85	0.19	11.5	0.160	8416.50	2295.6	990.6

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

En este capítulo se desarrolla el análisis estadístico de los datos obtenidos de fragmentación P80 de cada uno de los disparos descritos en el capítulo anterior, con dicha base de datos depurada se debe de realizar pruebas estadísticas para dar respuesta a las preguntas de investigación.

5.1 Análisis de resultados

En este apartado se busca revisar el nivel de confianza respecto a la veracidad o falsedad de la investigación.

5.1.1 Análisis de validez interna

En cuanto a la validez interna esta se enfoca en el grado en que un experimento excluye las explicaciones alternativas de los resultados. Esto nos permite además del análisis de otros factores diferentes a la variable independiente que pudiera explicar los resultados, estos factores serán una amenaza a la validez interna. En

cuanto, a los factores orgánicos los cuales refieren a las características del sujeto y estados internos que pueden influir en los valores observados de la variable dependiente. Estos se muestran a continuación.

- **Características y habilidades:** Los sujetos con diferente inteligencia, rasgos de personalidad, educación previa y habilidades motoras pueden realizar los experimentos de forma diferente. Por lo tanto, se informó a los trabajadores sobre el procedimiento y se seleccionaron sujetos con experiencia similar en el manejo de explosivos y minado del material disparado en ambos casos, vale decir los disparos y minado fueron realizados en fechas diferentes, pero por la misma guardia de voladura y de operaciones.
- **Error de medición:** Referida a la variabilidad en los datos de las observaciones repetidas. El mismo sujeto puede reaccionar de manera diferente de vez en cuando, pero en este caso los datos obtenidos de la cámara instalada en la Pala 12 recopilan esta información a partir de tomas obtenidas por el personal de Dispatch Mina, dicha información se almacena en el servidor y los datos en nuestro caso reciben un tratamiento estadístico para eliminar el error de medición en la fragmentación mediante la eliminación de valores atípicos detectados.
- **Motivación y expectativas:** Los voluntarios pueden tener diferentes expectativas de participación en comparación con los individuos reactivos. Para abordar este factor, no se informó a los supervisores, ni a los operadores de pala sobre la obtención de los datos de referencia; posteriormente, todos los supervisores de voladura y personal involucrado de operaciones mina se

comprometieron a considerar los resultados obtenidos y desplegar sus esfuerzos desde sus respectivas áreas para mejorar los datos de referencia.

- **Madurez:** En cualquier estudio realizados durante un largo periodo de tiempo, pueden producirse cambios en la realización del experimento. En nuestro caso, todos los registros de fragmentación de las voladuras de control efectuadas se realizaron en las mismas condiciones: jornada laboral de 24 horas, con las mismas condiciones: cambios de turno, refrigerios, paradas diarias programadas de los equipos de excavación, operarios con la misma experiencia, rango de edad similar, supervisores con características similares de experiencia, edad y tiempo en la empresa.
- **Agotamiento:** Referido al agotamiento experimental por aportación limitada o pérdida diferencial de elementos. Por lo tanto, había suficientes registros para que todas las pruebas fueran iguales. No hubo cambios en la composición del personal que participó en el estudio, es decir no hubo ningún tipo de abandono en la participación de la investigación por parte de alguno de los integrantes.

En cuanto a los estímulos y los factores situacionales, se tuvo lo siguiente:

- **Instrucciones:** Dadas a los sujetos y/o forma de presentar los estímulos no relacionados con la V.I. pueden tener un efecto sobre la V.D. Los procedimientos escritos de trabajo seguro en las zonas de voladura y carguío de material con pala fueron ejecutados a conciencia por parte del personal involucrado facilitando el mismo criterio para la toma de decisiones en cada una de sus actividades, las cuales guardan relación con el presente experimento.

- **Características físicas de la situación experimental:** Respuestas diferentes según la hora del día, la temperatura ambiente, el nivel de ruido, entre otros factores, puede tener resultados que tienden a responder al entorno, o sujetos que responden de forma diferente cuando se les observa que en condiciones normales. Así que se intentó controlar estas variables para mantener las mismas condiciones entre los experimentos, la temperatura durante el estudio en la zona de voladura estuvo entre el nivel de ruido estuvo cerca de los 24°C y el nivel de ruido durante el minado estuvo por debajo de los 85 decibeles, los cuales no afectaron la respuesta de los integrantes de la investigación durante el desarrollo de los procesos asignados.
- **Experimentador:** El experimentador puede influir en los sujetos. Por este motivo, el desarrollador de la presente investigación se comunica con los supervisores que participaron en el estudio para evitar influir en los operadores de los equipos o afectar a la muestra.

El error de medición puede surgir de la recolección de datos durante la medición de las respuestas. Por lo tanto, se consideraron las siguientes cuestiones:

- **Instrumentos y aparatos:** La calibración o el funcionamiento normal de los instrumentos y aparatos tiene un efecto sobre el valor medido de las variables. Por este motivo, se comprobó la calibración y la certificación de la operatividad de la cámara instalada en la parte superior de la cabina de la Pala 12.
- **Experimentador:** Consciente o inconscientemente, el sesgo del experimentador puede interferir en la recogida o el análisis de datos. Por lo tanto, para evitar el sesgo de los experimentadores, los datos fueron recogidos

y analizados por personal que no estaba familiarizado con el estudio es decir por el asistente de control del despacho de equipos de la minera. Es importante mencionar que a juicio de la experiencia del investigador para cada disparo se han considerado las mismas condiciones a fin de que los resultados sean coherentes y puedan ser replicados en cualquier sector de la mina en estudio. En ese sentido considera que la variación de los parámetros como espaciamiento, burden o profundidad de taladro es aceptable para propósitos de la presente investigación ya que dichas variaciones no son significativas y no afectan de manera unilateral los resultados obtenidos.

5.1.2 Análisis de validez externa

En cuanto al análisis de validez externa, esta se encarga de analizar el grado y extensión en que los resultados pueden ser generalizados a otros sujetos, situaciones o contextos. Es por ello que se tomó en cuenta que cumplieran los siguientes supuestos:

- **Interacción Selección-Tratamiento o validez de población:** Capacidad de generalizar el tratamiento a personal que no pertenezcan al grupo de estudio. Definitivamente se cumple con esta premisa ya que el presente estudio puede ser entendido, revisado y/o complementado por cualquier individuo que tenga relación técnica o profesional con las operaciones mineras a tajo abierto con especial énfasis en aquellos relacionados al proceso de voladura de cualquier empresa minera. Esto representa la posibilidad de extrapolar los resultados y procedimientos seguidos en el presente trabajo a otras unidades mineras generalizando la aplicación de la comparación para diferentes agentes de

voladura en la industria minera para la mejora de fragmentación en sus proyectos de voladura.

- **Interacción Contexto-Tratamiento o validez de ecológica:** Capacidad de generalización del tratamiento a situaciones más allá de la estudiada. Esto es cada vez más requerido por la presente minera en estudio y las demás empresas mineras que buscan la mejora continua de sus procesos a partir de estudios en el que para medir el contexto real de sus operaciones recopilan información en escenarios diarios a cada hora, en cada turno, por día evitando que los actores de los procesos analizados sean afectados o respondan de manera distinta al normal desarrollo de sus actividades.
- **Interacción Historia-Tratamiento o validez histórica:** Capacidad de generalizar el tratamiento a otras ocasiones temporales del pasado o futuro. En nuestro caso se compara una mezcla explosiva nueva contra una mezcla explosiva tradicional, los resultados marcaran el desarrollo o la implementación del nuevo agente de voladura en los distintos procesos de voladuras de control y otros a desarrollarse en la mina en estudio a partir de los resultados obtenidos referidos principalmente a la fragmentación.

5.2 Determinación de la normalidad de los datos

Antes de empezar la prueba t de Student, se debe de cumplir el supuesto que considera que los datos obtenidos con cada agente de voladura siguen una distribución normal, en caso de que algún grupo de datos obtenidos no llegara a cumplir con dicho supuesto, se procedería a normalizar dichos datos con pruebas no paramétricas. Para los propósitos que persigue el presente trabajo de investigación en caso que ambos listados

de datos presenten un comportamiento normal se tendrían las bases suficientes para iniciar con la prueba t de Student.

5.2.1. Supuesto de normalidad

Una de las formas de demostrar que los datos de las muestras obtenidas se ajustan a una distribución normal es por medio de la elaboración de histogramas en donde se espera ver que la distribución de los datos analizados tenga una curva suave también conocida como la campana de Gauss, sin embargo, a veces los histogramas presentan algunas formas muy peculiares. Para ello además de graficar dichos histogramas se obtendrán algunas medidas de tendencia central o estadísticos básicos en el software Microsoft Excel como se muestra a continuación:

Tabla 19 Frecuencias valores fragmentación P80 Heavy ANFO.

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>
7.85	1	1.43%
9.51	9	14.29%
11.17	14	34.29%
12.82	15	55.71%
14.48	9	68.57%
16.14	13	87.14%
17.80	4	92.86%
19.46	2	95.71%
y mayor...	3	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

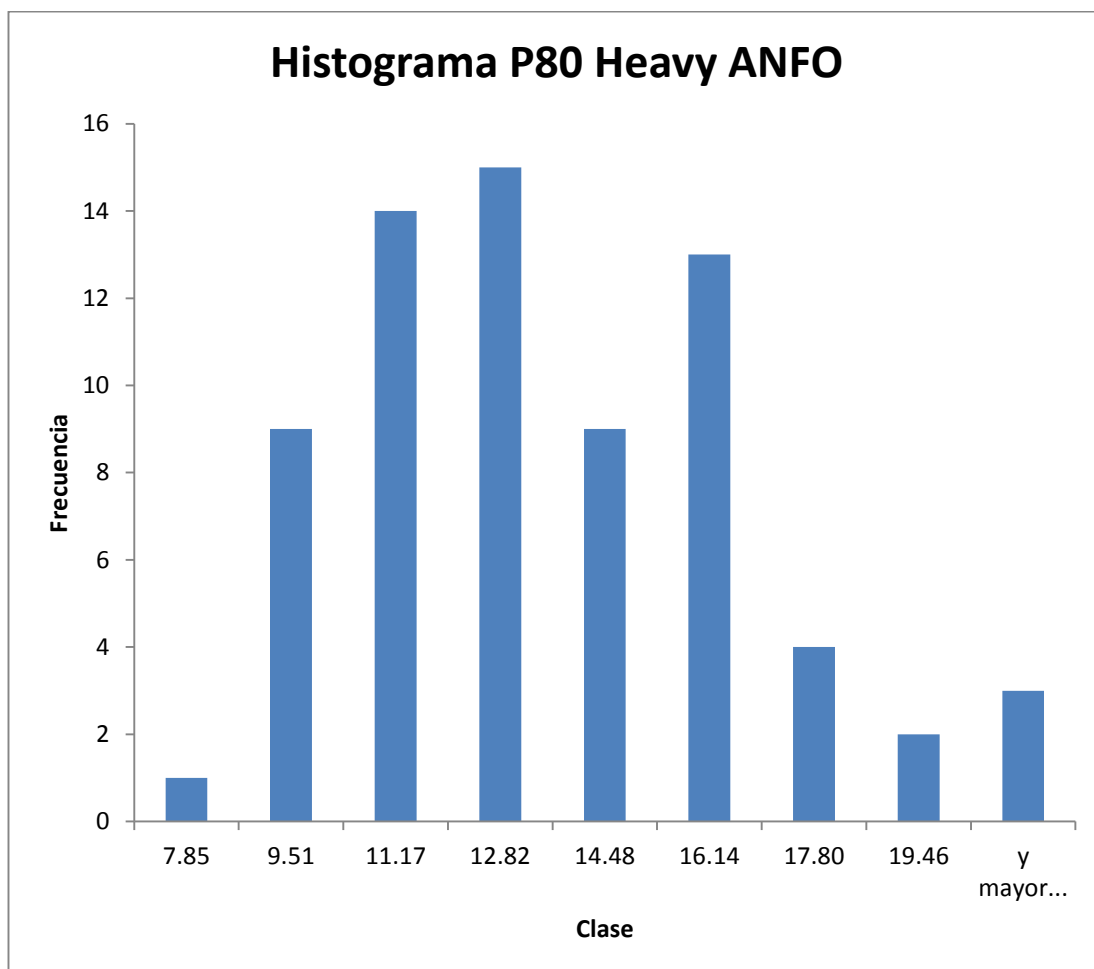


Figura 51 Histograma valores fragmentación P80 Heavy ANFO.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20 Frecuencias valores fragmentación P80 Flexigel.

Clase	Frecuencia	% acumulado
3.75	1	1.39%
5.77	3	5.56%
7.78	7	15.28%
9.79	10	29.17%
11.80	19	55.56%
13.81	17	79.17%
15.82	5	86.11%
17.83	6	94.44%
y mayor...	4	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

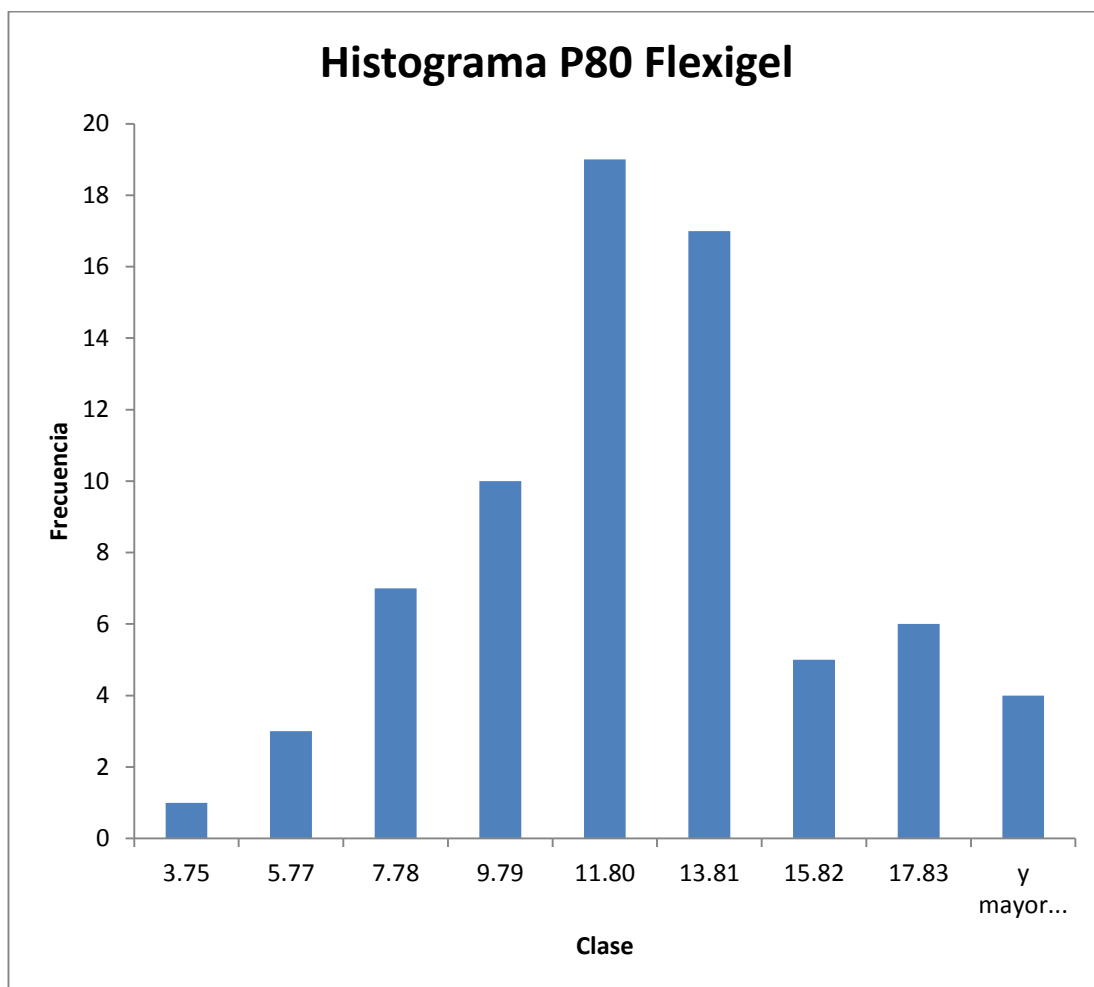


Figura 52 Histograma valores fragmentación P80 Flexigel.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que gráficamente por medio de los histogramas el comportamiento de ambas muestras de las variables Heavy ANFO y Flexigel aparentemente tienen cierta tendencia semejante a una curva de distribución normal, para corroborar esto se procede a obtener ciertos estadísticos básicos que reforzaran si dicho comportamiento es normal.

Tabla 21 Estadísticos de los valores fragmentación P80 Heavy ANFO y Flexigel.

	<i>Heavy ANFO</i>	<i>Flexigel</i>
Media	12.892	11.506
Error típico	0.378	0.426
Mediana	12.355	11.062
Desviación estándar	3.166	3.613
Varianza de la muestra	10.021	13.054
Curtosis	-0.109	-0.210
Coefficiente de asimetría	0.689	0.165
Rango	13.266	16.092
Mínimo	7.850	3.755
Máximo	21.116	19.846
Suma	902.410	808.421
Cuenta	70	72
Nivel de confianza (95.0%)	0.755	0.849

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 21, en cuanto a la media el Flexigel presenta un valor menor en comparación al Heavy ANFO, lo cual indica que el promedio de fragmentación P80 es menor para el Flexigel, repitiéndose en la mediana.

En referencia a la desviación estándar el Heavy ANFO presenta un valor ligeramente menor es decir que la muestra posee valores más consistentes que el Flexigel, denotando que hay una mayor variabilidad de los datos en el caso del Flexigel que del Heavy ANFO.

En cuanto a la Varianza de las muestras coincide con la desviación estándar teniendo una menor varianza el Heavy ANFO lo que se traduce en una menor dispersión en las muestras obtenidas por parte de este agente de voladura.

Respecto a los valores de curtosis del Heavy ANFO y del Flexigel se obtienen valores negativos cercanos a cero, esto nos indica que, si tomamos una distribución normal como referencia y nos fijamos en la distribución de los datos para ambos casos, dichas distribuciones tienen un apuntamiento menor que una distribución normal con una baja concentración de valores de P80 en la región central de la distribución, lo que llamamos una distribución platicúrtica.

En referencia al coeficiente de asimetría, en ambos casos tanto para el Heavy ANFO como para Flexigel se tienen valores mayores a cero, esto indica que tanto el Heavy ANFO como el Flexigel se distribuyen a partir de una curva de asimetría positiva, es decir que la mayoría de los datos de P80 en ambas muestras se encuentran hacia la izquierda del promedio siendo menores a 12.892” en el caso del Heavy ANFO y menores a 11.506” en el caso del Flexigel.

Otra de las formas para determinar gráficamente que la muestra de datos obtenidas de los agentes de voladura Heavy ANFO y Flexigel siguen una distribución normal es por medio de las gráficas de probabilidad cuantil cuantil, dichas gráficas nos indicaran visualmente por medio de una tendencia de línea recta que los datos de fragmentación P80 puedan presentar una distribución normal. Dichas gráficas se muestran a continuación:

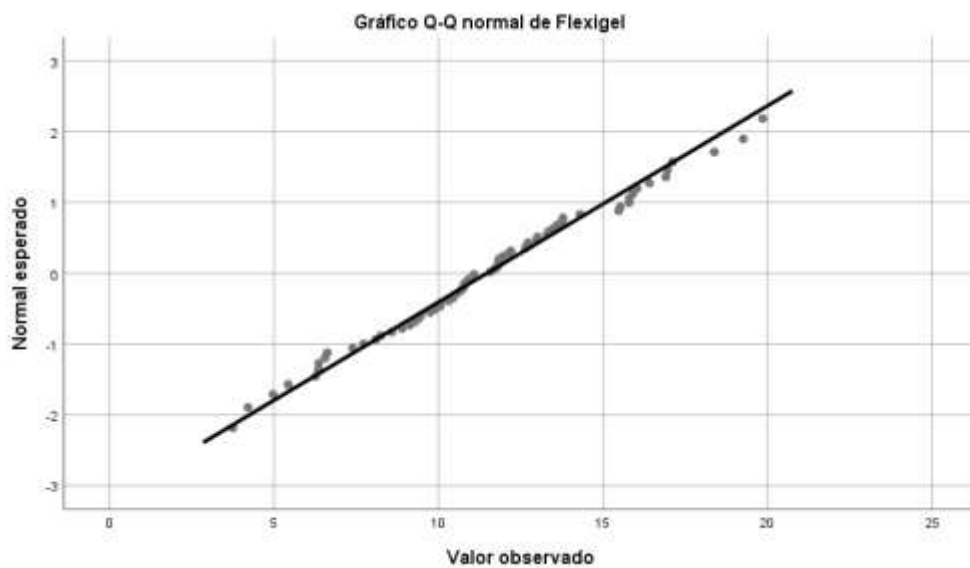


Figura 53 Gráfico q-q Flexigel.

Fuente: Elaboración propia.

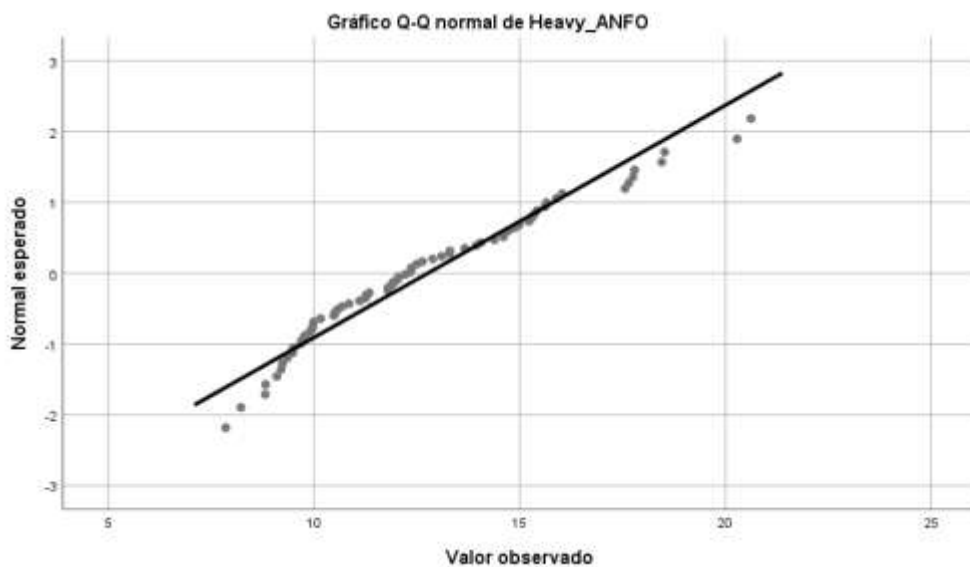


Figura 54 Gráfico q-q Heavy ANFO.

Fuente: Elaboración propia.

En ambos casos se pueden observar en las figuras 53 y 54 que los datos de ambos agentes de voladura se asocian a una línea recta con lo que se puede estimar que los datos aproximadamente se ajustan a una distribución normal, de esta forma

queda indicado que podemos analizar nuestros datos mediante pruebas estadísticas convencionales.

5.2.2. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

Partiendo nuevamente del supuesto establecido también se procede a realizar la prueba paramétrica de esta hipótesis a fin de asegurar de manera precisa la normalidad de los datos correspondientes a cada una de las variables a analizar es decir necesariamente se tiene que verificar de manera exacta si los datos presentan una distribución normal, para lo cual se realiza la Prueba de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov para datos mayores a 50 elementos, con una confianza del 95% y para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ siendo la hipótesis de ello la siguiente:

H₀: Nivel de significancia > 0.05 , se acepta que la muestra (datos de fragmentación obtenidos respecto al P80) si presenta una distribución normal.

H₁: Nivel de significancia ≤ 0.05 , se rechaza la hipótesis nula. Entonces la muestra (datos de fragmentación obtenidos respecto al P80) no presenta una distribución normal.

Teniendo presente que es necesario verificar el supuesto de normalidad para realizar el posterior contraste de la hipótesis general se ingresan los datos de los registros obtenidos con cada agente de voladura al software estadístico SPSS a fin de proceder a determinar la normalidad de las variables, y como se mencionó anteriormente en nuestro caso se determinó la normalidad de la distribución de los

datos aplicándose la prueba de Kolmogorov-Smirnov, cuyos resultados son como se muestran a continuación:

Tabla 22 Prueba de normalidad.

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico	gl	Sig.
Heavy_ANFO	,095	70	,196
Flexigel	,059	70	,200*

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 22, en la columna Sig. (nivel de significancia), se tiene que el resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov en lo que concierne al valor de la significancia es mayor a 0,05 en el caso de ambas mezclas explosivas Heavy ANFO y Flexigel, con ello se puede afirmar que dichas muestras poseen una distribución normal y con ello se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alterna establecidas para cada una de las muestras.

5.3 Contrastación de la Hipótesis general

Al comprobar la normalización de ambas variables, es decir que tanto la muestra de Heavy ANFO y Flexigel presentan una distribución normal, se procede al contraste de la siguiente hipótesis:

H₀: El valor de P80 con el uso del Flexigel y Heavy ANFO no presenta una diferencia significativa.

H₁: El valor de P80 con el uso del Flexigel en el proceso de fragmentación de voladuras de control es menor al obtenido con el uso del Heavy ANFO.

Para probar la presente hipótesis se tomó en cuenta los resultados de la medición directa de los datos de fragmentación P80 tanto con Flexigel como del Heavy ANFO, tomando los valores de cada serie de mediciones para las dos muestras, y se aplicó la prueba T de Student de una cola.

Tabla 23 Prueba T de Student de una cola.

	<i>Heavy ANFO</i>	<i>Flexigel</i>
Media	12.892	11.547
Varianza	10.021	13.371
Observaciones	70	72
Coefficiente de correlación de Pearson	0.497	
Diferencia hipotética de las medias	0.000	
Grados de libertad	69	
Estadístico t	3.263	
P(T<=t) una cola	0.001	
Valor crítico de t (una cola)	1.667	
P(T<=t) dos colas	0.002	
Valor crítico de t (dos colas)	1.995	

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la tabla 23, al ser el estadístico t (3.263) mayor al valor crítico de t para una cola (1.66) se rechaza la hipótesis nula por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa, es decir que el valor de fragmentación P80 con el uso del Flexigel en el proceso de voladuras de control es menor al obtenido con el uso del Heavy ANFO, la cual es básicamente nuestra hipótesis general del presente trabajo de investigación es decir la Hipótesis del investigador establecida en el capítulo 1.

5.4 Discusión de resultados

El análisis y la discusión de los resultados es una parte importante del presente trabajo de investigación ya que involucra la mayor parte de las variables que llegan a participar en el proceso de voladura al comparar las mezclas explosivas específicamente en el proceso de fragmentación permitiéndonos ver ciertos comportamientos y factores que puedan estar relacionados entre sí y que al mismo tiempo puedan estar afectando la granulometría obtenida y los beneficios que conllevan reducir el valor de P80 que se obtenga en cada disparo.

5.4.1 Características de los datos obtenidos de fragmentación P80

Luego de someter a ambas muestras de datos a la eliminación de los valores atípicos y corroborar la normalidad de los mismos a partir de la elaboración de los histogramas para cada mezcla explosiva según las figuras 51 y 52, se pudo apreciar el comportamiento de los elementos de cada muestra a través de una de las medidas de forma conocida como coeficiente de curtosis cuyos valores en el caso del Heavy ANFO y Flexigel fueron -0.109 y -0.210 respectivamente con ello se afirma que ambas muestras tienen un comportamiento gráfico del tipo platicúrtico con apuntamiento menor que una distribución normal con los datos distribuidos hacia las colas.

En cuanto a los valores obtenidos respecto a otra medida de forma llamada coeficiente de asimetría tanto para el Heavy ANFO y Flexigel se obtuvieron los valores de 0.689 y 0.165 con ello se puede afirmar que ambas muestras poseen asimetría positiva con los valores de sus elementos con tendencia a la izquierda de la media en ambos agentes de voladura, todo ello de acuerdo a la tabla 21.

Como las muestras tienen un número de elementos mayores a 50 entonces se realizó la Prueba de Normalidad de Kolmogorov-Smirnov, con una confianza del 95% y para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ siendo los valores obtenidos de 0.196 y 0.200 para ambos agentes de voladura de acuerdo a la tabla 22 y al ser estos valores mayores a 0,05 se puede afirmar definitivamente y de manera precisa que dichas muestras poseen una distribución normal.

5.4.2 Fragmentación y costo

Como resultados importantes dentro de esta investigación se pudo observar que en relación al comportamiento del valor P80 generado por el Flexigel y el Heavy ANFO, al ser el estadístico t (3.263) mayor al valor crítico de t para una cola (1.66) se rechaza la hipótesis nula por lo tanto se acepta la hipótesis alternativa, es decir que el valor de P80 con el uso del Flexigel en el proceso de fragmentación de voladuras de control es menor al obtenido con el uso del Heavy ANFO, obteniendo mejores resultados el Flexigel quien redujo el P80 de 12.9” a 11.5” con lo que se aceptaría la hipótesis de investigación.

Asimismo, que el uso del agente de voladura Flexigel aumentó el costo del explosivo por tonelada rota obtenido en el disparo del proyecto SR 2378-522, en comparación con el uso del agente de voladura Heavy ANFO usado en el disparo del proyecto SR2365-517, de acuerdo a los resultados mostrados en las tablas 10 y 11, el aumento de dicho fue de \$ 0.154/TM a \$ 0.160/TM teniendo un aumento del \$ 0.06/TM lo que representa un incremento del 3.9 %.

Esto se puede comprar con investigaciones como las de Chambi (2018), el cual indicó que el uso de Flexigel aumenta el coste de los explosivos en un 5,74% en

comparación con el uso de HA37, siendo los beneficios mayores, ya que se ahorra en la trituración para el chancado secundario, se reduce la cantidad de pellets, la carga y el transporte, además de un mayor ahorro en todo el proceso de trituración y molienda debido a la reducción de la fragmentación; se recomienda el cambio. Esto indica que la relación calidad costo con respecto al HA37 es mejor para el Flexigel, además de demostrar que posee mejores resultados que el Heavy ANFO.

5.4.3 Rendimiento de equipo de excavación, flujo de chancado

En cuanto a los resultados obtenidos de acuerdo a las tablas 12 y 14 se tiene que el rendimiento promedio de minado de la Pala 12 en material disparado con el agente de voladura Flexigel es superior al rendimiento con el agente de voladura Heavy ANFO, esto se puede denotar de acuerdo al siguiente gráfico:

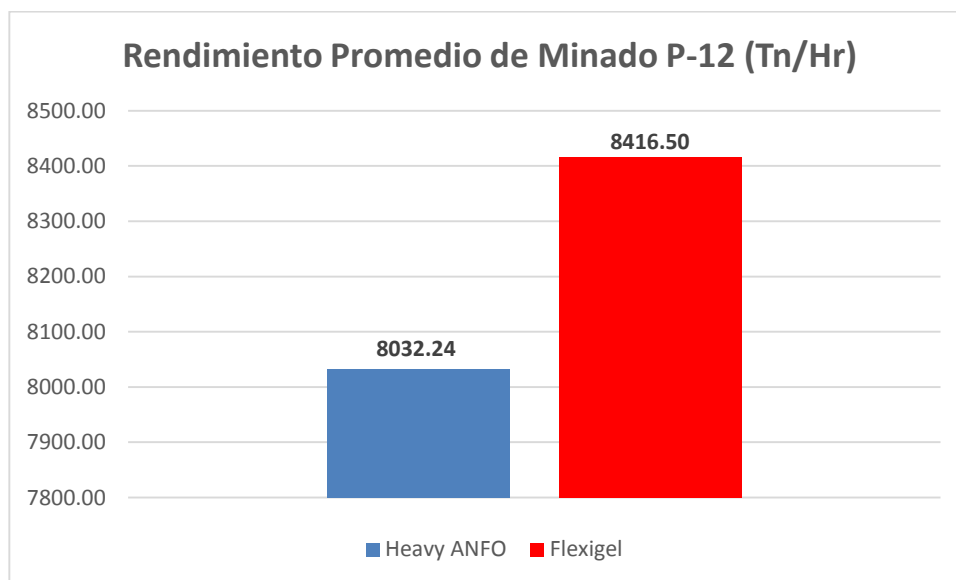


Figura 55 Gráfico Rendimiento promedio de la pala.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos de acuerdo a las tablas 13 y 15 se tiene que el flujo promedio pasante en chancadora del material disparado con el Flexigel es superior al flujo promedio registrado con el Heavy ANFO, y el consumo de energía es menor, esto se puede mostrar de acuerdo a los siguientes gráficos:

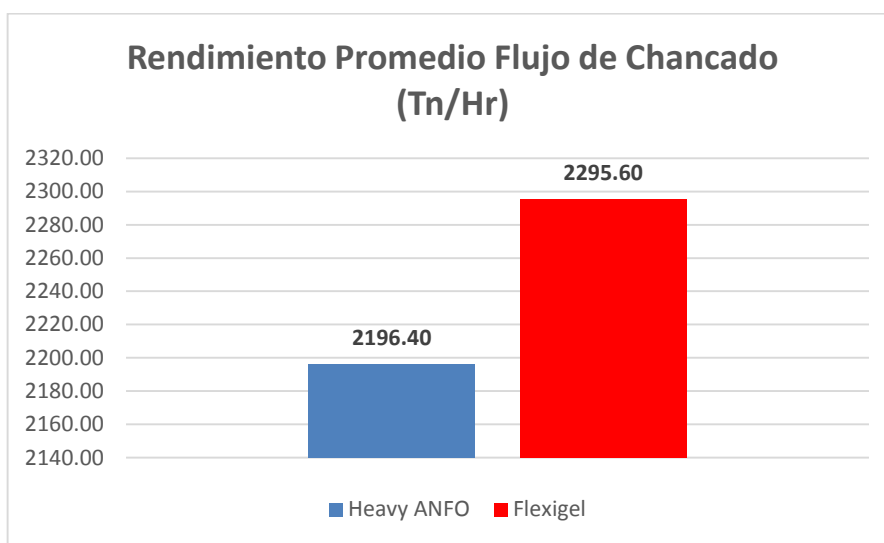


Figura 56 Gráfico Rendimiento promedio flujo de chancado.

Fuente: Elaboración propia.

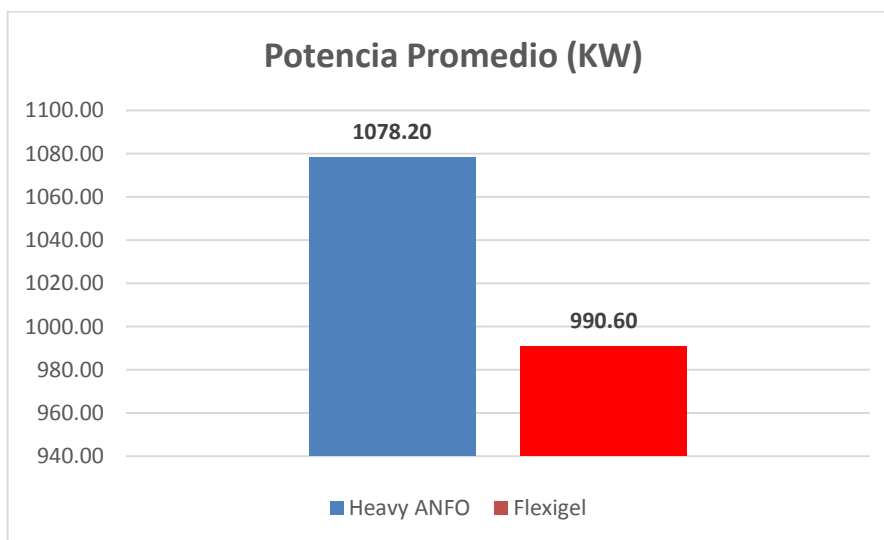


Figura 57 Gráfico Potencia promedio consumida.

Fuente: Elaboración propia.

En base a estos resultados se puede llegar a comparar con investigaciones como la de Rodríguez (2020) que indica que el uso de un mejor explosivo mejora cuantitativamente el proceso de fragmentación de la roca ya que fragmenta adecuadamente la roca dentro de los límites prescritos con resultados de tamaño de partícula, lo que se toma como una mejora en los requisitos operativos, el rendimiento, el tiempo y el costo para el manejo y transporte de materiales. Esto coincide con lo encontrado en esta tesis donde la emulsión gasificada en lugar del Heavy ANFO mostró, no sólo mejorar el valor de P80, sino que esto impactó positivamente en los procesos posteriores.

Asimismo, se puede hacer referencia de comparación también a la tesis de Alcalde (2019) quien tuvo que la fragmentación P80 promedio obtenida con HA55 es de 9.46'' cuyo valor está por encima de las 9'' aceptadas por planta, en cambio con la emulsión gasificada SAN-G APU la fragmentación P80 promedio llegó a 7.18''. Es decir que los proyectos disparados con emulsión gasificada de SAN-G APU han generado una disminución en la fragmentación del 24% con respecto al HA55.

En relación a la presente investigación se puede afirmar que la contante búsqueda de mejores explosivos ayuda al procesamiento de los minerales de una mejor forma. Asimismo, se observa que otro explosivo de interés que puede ser comparado el Flexigel es con la emulsión gasificada SAN-G APU.

Asimismo, el uso del Flexigel tuvo un impacto positivo en las actividades de carguío y chancado al poseer un valor menor de P80, lo que se traduce en una reducción de costos posteriores.

5.4.4 Niveles de vibración y ángulo de talud obtenido

Dada las pruebas realizadas se tuvo un registro de vibraciones por parte de geófonos instalados en las cercanías de los disparos realizados y opiniones del geotecnista de la zona cuya apreciación visual de campo sobre daños al talud, a las estructuras o sobrequeiebres resultaron a favor del uso del agente de voladura Flexigel.

Tabla 24 Niveles de vibración registrados

VPP (m/s)	Heavy ANFO	Flexigel	% Reducción
VPP_R	12.00	8.72	27.33%
VPP_V	17.70	9.74	44.97%
VPP_T	24.10	8.15	66.18%
VPP	26.90	12.30	54.28%

Fuente: Elaboración propia.

De la tabla 24 se puede apreciar que el nivel de registros reportados en ambos disparos es como se detalla a continuación:

- ✓ En la onda longitudinal, existe un 27.33% menos en el valor de VPP con el explosivo Flexigel.
- ✓ En la onda vertical, existe un 44.97% menos en el valor de VPP con el explosivo Flexigel.
- ✓ En la onda transversal, existe un 66.18 % menos en el valor de VPP con el explosivo Flexigel.
- ✓ En el vector suma, existe un 54.28 % menos en el valor de VPP con el explosivo Flexigel.

En cuanto al ángulo de talud obtenido luego de efectuado los disparos y culminado el minado del material volado se puede observar gráficamente, según el escaneo

topográfico a partir de la reconciliación geotécnica realizada en campo, que la zona que se alinea más con el ángulo de diseño establecido de 80° para ese sector de la mina es el que corresponde al disparo realizado con el agente de voladura Flexigel el cual presenta un ángulo de diseño del talud de 71° , de acuerdo a la reconciliación mostrada en el Anexo 2, a diferencia del disparo realizado con el agente de voladura Heavy ANFO el cual presenta un mayor desapego de la línea de diseño del perfil con un ángulo de talud de 65° de acuerdo a la reconciliación mostrada en el Anexo1, presentando incluso cierto daño en la cara del talud dentro de la zona cercana a la cresta de acuerdo a la gráfica de perfil de talud promedio mostrada en la siguiente figura.

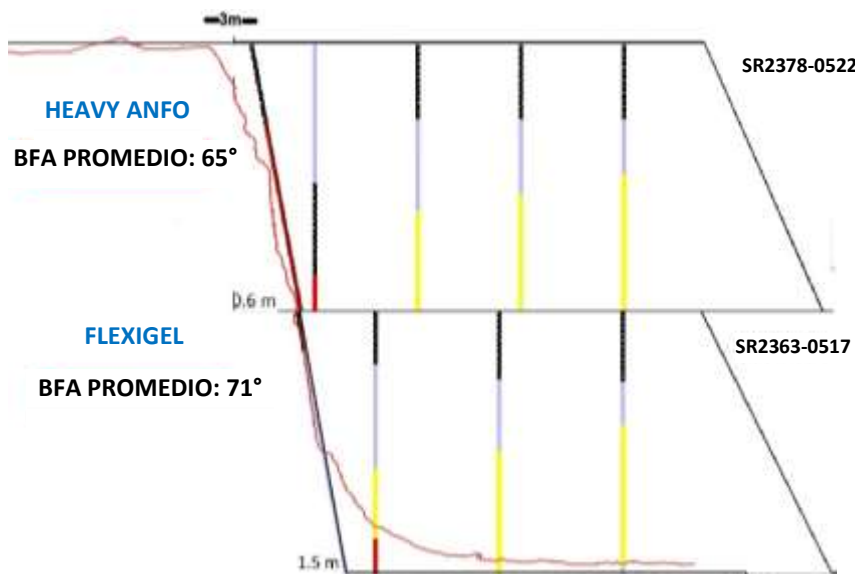


Figura 58 Perfil de talud promedio según escaneo.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en concordancia con Bravo (2018), se puede corroborar que una buena voladura permite reducir las vibraciones y por ende supone unos costes bajos para un mejor control de los daños.

5.5 Nuevas líneas de investigación

En este apartado se pretende mostrar nuevas líneas de investigaciones futuras, los aspectos que resultaron ser potencialmente muy interesantes para el desarrollo de nuevos trabajos deben ser analizados en un futuro próximo, ya que su alcance va más allá de lo previsto inicialmente. Además, como ya se ha mencionado, cualquier nuevo análisis de las ideas aquí expresadas puede ser fuente de nuevas interpretaciones o soluciones a diversos problemas, lo cual se muestra en la siguiente lista.

- Es necesarios hacer un análisis a fondo de la rentabilidad del uso de Flexigel en empresas mineras cuyos procesos contemplan el uso de otro explosivo, para poder de esta forma conocer el impacto económico de la implementación del mismo.
- Es necesario hacer un estudio donde se pueda experimentar con el comportamiento de la combinación de los dos explosivos para conocer si es posible, y de serlo que efectos genera en una voladura de control.
- Se debe investigar y comprobar los valores de fragmentación P80 de todos los explosivos comerciales que se usan en la industria minera para tener un panorama más amplio al momento del análisis.
- Se debe investigar el impacto de los explosivos en relación a la estabilidad de talud y su influencia en la seguridad del trabajador.

Con ello el investigador en líneas generales deja abierta la posibilidad de que el presente trabajo pueda servir de base para la comparación de futuras mezclas explosivas que van saliendo en el mercado minero, tomando como punto de partida el análisis estadístico de los valores de la fragmentación, evaluando los beneficios que se puedan obtener al ser implementados en disparos de control.

CONCLUSIONES

- Mediante el análisis estadístico de los datos de los valores obtenidos de fragmentación P80 para cada una de las muestras de Heavy ANFO y Flexigel se pudo validar la hipótesis general corroborando que con el uso del Flexigel en el proceso de fragmentación de voladuras de control se obtiene un valor menor de P80 en comparación con el obtenido al usar el Heavy ANFO, dicha media de valores se reduce de 12.9” a 11.5” obteniendo mejores resultados de fragmentación con el Flexigel en un 10.85%.
- Al usar el agente de voladura Flexigel se influye de manera positiva en el rendimiento del equipo de excavación ya que al reducir el valor de P80 de 12.9” a 11.5” se corrobora también que se llega a incrementar el rendimiento de la Pala electromecánica en 4.78 % de mejora en el proceso de carguío de mineral.
- Los beneficios de usar el agente de voladura Flexigel también se traducen en beneficios que no competen al minado propio sino al beneficio en el proceso de chancado en el cual se pudo comprobar que el consumo de energía del sistema de chancado se reduce de 1078.20 KW a 990.60 KW, lo que representa un mejora del 8.12%, pasando en el circuito de chancado de mejor manera el material a reducir con un rendimiento en el flujo de chancado que se incrementa de 2196.40 TM/Hr a 2295.60 TM/Hr es decir se incrementó en 4.52%.
- Se pudo comprobar una marcada reducción en los niveles de vibración en promedio mayores al 30%, dicho porcentaje de reducción se registró con el empleo del Flexigel, asimismo se pudo corroborar que el daño potencial producto de la vibración de las ondas registradas resulta mayor con el empleo

del Heavy ANFO. Esto guarda relación con los resultados del escaneo y reconciliación geotécnica realizadas en donde se puede determinar que el disparo realizado con el agente de voladura Flexigel se alinea más con el diseño del perfil de talud con un ángulo de talud de 71° a diferencia del disparo realizado con el agente de voladura Heavy ANFO el cual genera un mayor desapego de la línea de diseño del perfil con un ángulo de talud de 65° el cual está más alejado de los 80° del diseño según el precorte disparado, presentando incluso cierto daño en la cara del talud dentro de la zona cercana a la cresta.

- En cuanto a los costos se determina que el costo del explosivo por tonelada rota se incrementa en un 3.9% respecto al uso del Heavy ANFO, sin embargo, se valida el empleo del mismo al comprobar mejoras en la fragmentación, incrementos en los rendimientos del equipo de carguío, mejoras en el flujo de chancado y energía consumida así como una mejor respuesta en el daño potencial a la pared del talud producto de las ondas generadas en el proceso de detonación tal como se detalla en los ítems anteriores.

RECOMENDACIONES

- Continuar invirtiendo en conjunto con la empresa especializada de voladura acerca de nuevas tecnologías para el desarrollo e incorporación de nuevas mezclas explosivas a fin de obtener cada vez mejores resultados relacionados a la disminución de los valores de P80, ya que esto se traduce en una reducción de costos en los procesos posteriores como el transporte y chancado.
- Estandarizar el uso de la agente de voladura Flexigel en las voladuras de control ya que como se ha demostrado en el presente trabajo de investigación, esto asegura un mayor cuidado de las paredes de los taludes al generar una menor cantidad de vibraciones y responde mejor produciendo una fragmentación con valores de P80 más bajos generando también mayores beneficios en los procesos de carguío y chancado.
- Realizar una mayor cantidad de voladuras comparando el impacto ambiental que tiene el uso de este nuevo agente de voladura Flexigel en relación a la generación de gases nitrosos para complementar la justificación integral del uso de esta nueva mezcla explosiva.

BIBLIOGRAFÍA

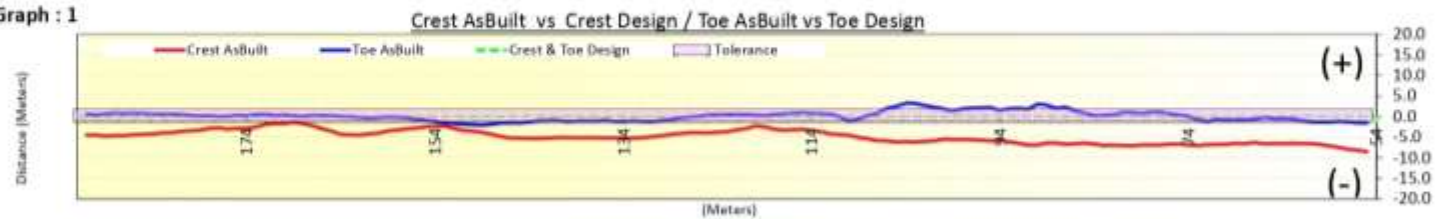
- Alcalde, J. (2019). *Emulsión gasificada en reemplazo de heavy anfo para reducir el P80 en la fragmentación e incrementar la productividad en carguío, acarreo y chancado en mina Hierro Perú*. [Tesis de Grado]. Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Bernaola, J., Gómez, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y Voladura de rocas en Minería*. (E. D. MADRID, Ed.) Madrid, España: Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas - Laboratorio de Tecnologías Mineras.
- Bravo, I. (2018). *Estudio de vibraciones inducidas por tronadura eb minera Spence*. [Tesis de Grado]. Santiago, Chile: Universidad de Chile.
- Chambi, D. (2018). *Aplicación de Flexigel en voladuras de control - Orica - Mina Cerro Verde*. [Tesis de Grado]. Perú: Universidad Nacional de San Agustín.
- Cruz, C. (2018). *Influencia del grado de fragmentación (P80) en el rendimiento de la excavadora Volvo EC750D en la unidad Isabelita de la Compañía Minera Los Andes Perú Gold S.A.C*. [Tesis de Grado]. Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.
- López Jimeno, C., & Lopez Jimeno, E. (1994). *Manual de perforación y voladura de rocas*. (I. G. España, Ed.) Madrid, España.
- Peralta Castelo, E. Y. (2019). *Estudio de los procesos de perforación y voladura y su implicancia en el rendimiento y seguridad en Sociedad Minera Cerro Verde*. [Tesis de Grado]. Perú: Universidad Nacional San Agustín.
- Rodríguez, L. (2020). *Beneficios en la Optimización de la Fragmentación de la roca mediante la aplicación de emulsión gasificada en voladura a tajo abierto en la empresa de explosivos Orica en el 2020*. [Tesis de Grado]. Perú: Universidad Privada del Norte.
- Romero Paucar, R. (2016). *Voladura con detonadores electrónicos para optimizar la fragmentación y seguridad en el tajo Toromocho - Minera Chinalco Perú S.A*. [Tesis de Grado]. Perú: Universidad Nacional del Centro.
- Salvador, N., Muñoz, C., Vergara, J., Avilés, D., & Lagos, M. (2016). Relación entre los parámetros de voladura y la estabilidad de zonas con restricción geotécnica. XIV Congreso Geológico Chileno.
- Sanchez, C. (2015). *Alineamientos del proceso de voladura Orica - SMCV. Procedimiento operacional de Orica*. Perú: Arequipa.
- Sheldom, R. (2018). *Introducción a la estadística*. Barcelona: Reverte.

ANEXOS

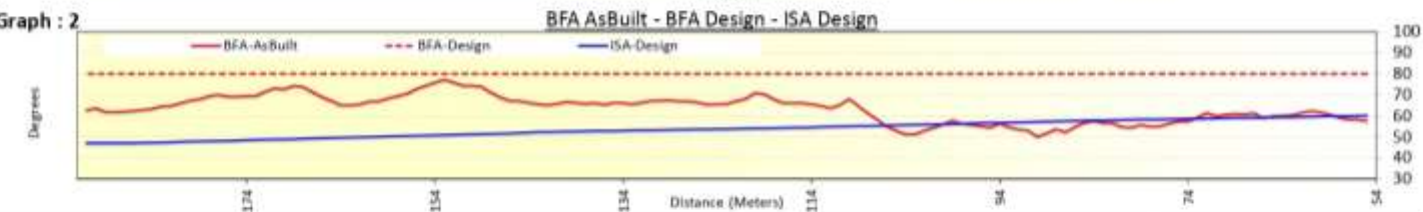
Geotechnical Reconciliation

PIE:	Santa Rosa, East Wall, Push Back SR4	Wall Dip Direction (deg):	212	ISA:	Inter-ramp Slope Angle
Level:	2399-2378	Minimum Catch Bench Width - Ritchie (m):	10.0	BFA:	Bench Face Angle
BPRM:	CV2378	Inter-ramp Slope Angle Design (°):	51	N° Profiles:	137
Project:	522	Geotechnical Domain:	1	Date:	27 - Set

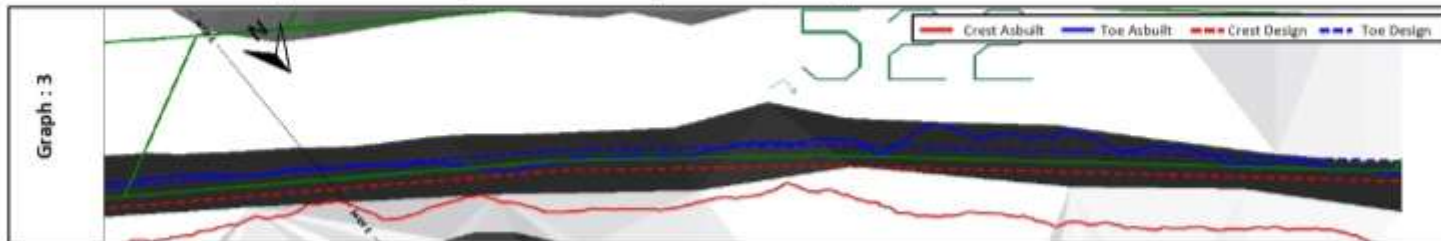
Graph : 1



Graph : 2



Graph : 3



Note:

- GRAPH 1 Positive (+) means the as-built feature (crest or toe) has been moved inward (towards the center of the pit).
- GRAPH 1 Negative (-) means the as-built feature (crest or toe) has been moved outward (away from the center of the pit).
- GRAPH 2 This sign convention was determined by looking at the change in BFA given the deviation in the upper crest. If the upper crest deviation is positive or above BFA Design, the BFA will be steeper; and if the upper crest deviation is negative or below BFA Design, the BFA will be shallower.

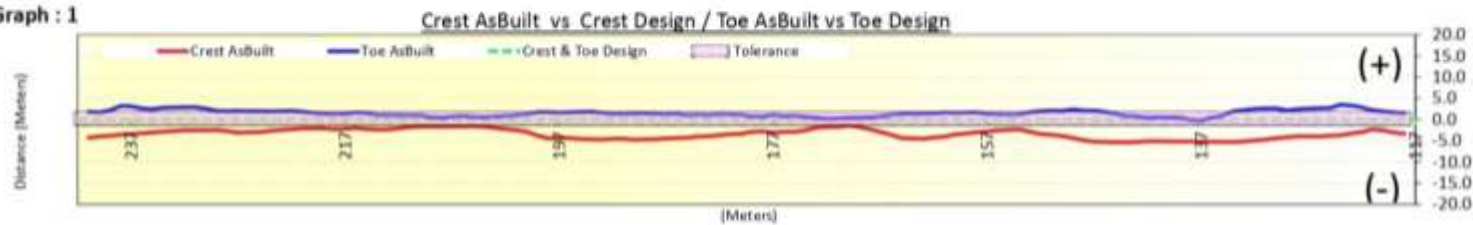
Anexo 1. Reconciliación Geotécnica SR2378-0522.

Fuente: Geotecnia Cerro Verde.

Geotechnical Reconciliation

Pit:	Santa Rosa, South Wall, Push Back SR4	Wall Dip Direction (deg):	208	ISA:	Inter-ramp Slope Angle
Level:	2399-2303	Minimum Catch Bench Width - Ritchie (m):	10.8	BFA:	Bench Face Angle
BPRM:	SR2363	Inter-ramp Slope Angle Design (°):	49	N° de secciones:	124
Project:	517	Geotechnical Domain:	1 y 3	Date:	28 - Oct

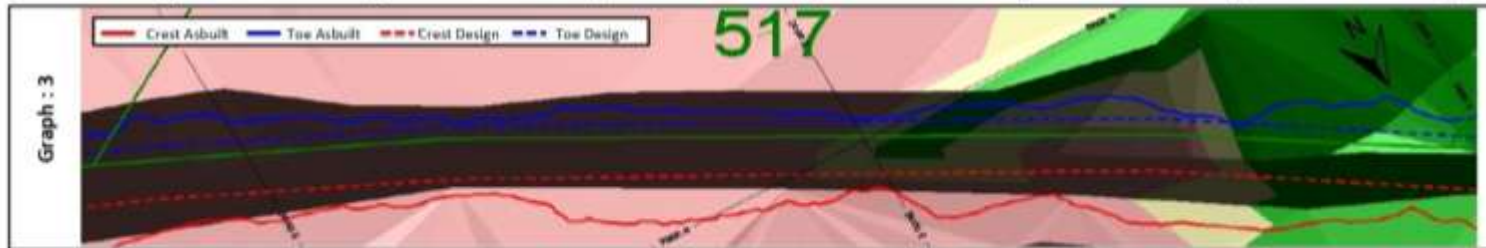
Graph : 1



Graph : 2



Graph : 3



Note:
 -GRAPH 1 Positive (+) means the as-built feature (crest or toe) has been moved inwards (towards the center of the pit).
 -GRAPH 1 Negative (-) means the as-built feature (crest or toe) has been moved outwards (away from the center of the pit).
 -GRAPH 2 This sign convention was determined by looking at the change in BFA given the deviation in the upper crest. If the upper crest deviation is positive or above BFA Design, the BFA will steepen, and if the upper crest deviation is negative or below BFA Design, the BFA will be shallower.
 NOTA: en la grafica 1, la curva de la cresta asbuilt corresponde a la cresta superior a la cresta del back break temporal utilizada en el calculo del BFA. La cresta del back break se puede plotear en el archivo daf de corrida del asbuilt.

Anexo 2. Reconciliación Geotécnica SR2365-0517.

Fuente: Geotecnia Cerro Verde.