

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas
comerciales para la construcción de una carretera**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

Jonathan Jesús Ramírez Torres

 [0009-0002-2161-0871](https://orcid.org/0009-0002-2161-0871)

Asesor

MBA. Eder León Salazar Dulanto

 [0000-0002-1400-3144](https://orcid.org/0000-0002-1400-3144)

LIMA – PERÚ

2023

Citar/How to cite	Apellido Apellido [1]
Referencia/Reference	[1] N. Apellido Apellido, “ <i>Guía para la presentación de trabajos formales conducentes a la obtención de grados o títulos</i> ” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2022.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Apellido, 2022)
Referencia/Reference	Apellido, N. (2022). <i>Guía para la presentación de trabajos formales conducentes a la obtención de grados o títulos</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

Primero a Dios y después a mis padres, Víctor y Bertha, y hermanos

Gracias a ellos he logrado concluir mi carrera.

A mi hermana, Pamela; a mis Tíos, Alberto

Y Dionisio; y a mi esposa, Sonia

Ellos están presente a mi lado brindándome

Apoyo y consejos para hacer de mí una

Mejor persona y buen profesional.

Resumen

El objetivo de este estudio es reducir la fragmentación de la roca con dimensiones mayores a 1m^3 utilizando la energía que producida por mezclas explosivas comerciales para la construcción de una carretera, considerando las voladuras de gran importancia en la industria de la construcción civil en particular. Por lo que, su valiosa aplicación será de gran utilidad en la empresa contratista para lograr la cantidad de energía que genera según la proporción más conveniente de mezclas explosivas comerciales.

La investigación realizada es de tipo aplicada y utiliza un diseño cuasi experimental. Se realizó en dos muestras dependientes en una misma progresiva, Pk: 15+560 @ 15+640, realizando la ejecución de voladuras en macizos rocosos fracturados con resistencia intermedia sobre diferentes banquetas, para la construcción de la carretera. Se utilizó la observación como técnica principal y las fotografías como instrumento. Estas fotografías permitieron diferenciar la fragmentación gruesa mayor a 1m^3 de la fragmentación menor a 1m^3 .

Al realizar la prueba t student para muestras dependientes con un valor de 7.92 y nivel de significancia de 0.05, se concluye que, a pesar de tener un Factor de Carga mayor al utilizar emulsión encartucha en lugar de mezcla explosiva comercial, ocurre lo contrario con el Factor de Energía. Esto significa que, al utilizar la mezcla explosiva comercial, MEC-46, se obtiene un mejor resultado en la fragmentación de rocas producida por la voladura.

Palabras clave — Energía del explosivo, mezcla explosiva comercial, fragmentación de roca, roca fracturada y resistencia intermedia.

Abstract

The objective of this study is to reduce the fragmentation of rock with dimensions greater than 1m^3 using the energy produced by commercial explosive mixtures for the construction of a highway, considering blasting of great importance in the civil construction industry in particular. Therefore, its valuable application will be very useful in the contractor company to achieve the amount of energy that it generates according to the most convenient proportion of commercial explosive mixtures.

The research carried out is of an applicative type and uses a quasi-experimental design. It was carried out in two dependent samples in the same progressive, Pk: 15+560 @ 15+640, carrying out the execution of blasting in fractured rock masses with intermediate resistance on different benches, for the construction of the highway. Observation was used as the main technique and photographs as the instrument. These photographs made it possible to differentiate coarse fragmentation greater than 1m^3 from fragmentation less than 1m^3 .

When performing the t-student test for dependent samples with a value of 7.92 and a significance level of 0.05, it is concluded that, despite having a higher Load Factor when using cartridge emulsion instead of commercial explosive mixture, the opposite occurs with the Energy Factor. This means that when using the commercial explosive mixture, MEC-46, a better result is obtained in the fragmentation of rock produced by blasting.

Keywords — Explosive energy, commercial explosive mixture, rock fragmentation, fractured rock and intermediate strength.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Introducción.....	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	3
1.3 Formulación del problema de investigación.....	5
1.3.1 Problema General.....	5
1.3.2 Problemas Específicos.....	5
1.4 Objetivos del estudio.....	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6
1.5 Hipótesis del Estudio.....	6
1.5.1 Hipótesis General.....	6
1.5.2 Hipótesis Específicos.....	6
1.6 Antecedentes investigativos.....	6
Capitulo II. Marcos teórico y conceptual.....	10
2.1 Marco Teórico.....	10
2.1.1 Mezcla explosiva comercial.....	10
2.1.1.1 Definición.....	10
2.1.1.2 Explosivo.....	10
2.1.1.2.1 Definición.....	10

2.1.1.2.2 Proceso de Reacción.....	10
2.1.1.2.3 Mecanismo de la Detonación.....	12
2.1.1.2.4 Características.....	14
2.1.1.3 Energía.....	16
2.1.1.3.1 Potencia por Peso.	16
2.1.1.3.2 Potencia por Volumen.	17
2.1.1.3.3 Energía teórica disponible.	17
2.1.1.3.4 Rendimiento energético de las voladuras.	18
2.1.1.3.5 Factor de eficiencia del explosivo.	19
2.1.2 Macizo rocoso	19
2.1.2.1 Definición.....	19
2.1.2.2 Roca.....	19
2.1.2.3 Estructura.....	20
2.1.2.4 Geomecánica.	20
2.1.2.4.1 Clasificaciones más importantes.....	20
2.1.3 Fragmentación de la roca	24
2.1.4 Producción de la excavadora.....	26
2.1.4.1 Carga útil del cucharón.....	26
2.1.4.1.1 Capacidad del cucharón.....	26
2.1.4.1.2 Factor de llenado.....	27
2.1.4.2 Tiempo de ciclo.	27
2.1.4.3 Factor de eficiencia.	28
2.1.5 Costos operativos por voladura secundaria.....	29

2.1.5.1 Contabilidad de costos.	29
2.1.5.1.1 Costos por procesos.....	29
2.2 Marco Conceptual	30
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	35
3.1 Metodología de Investigación	35
3.1.1 Tipo de Investigación.....	35
3.1.2 Método de Investigación.....	35
3.1.3 Diseño Investigación	35
3.2 Antecedentes	38
3.2.1 Alcance	38
3.2.2 Ubicación	38
3.2.3 Coordenada.....	39
3.2.4 Flanco Andino	39
3.2.5 Unidades Litoestratigráficas	40
3.3 Geología local	40
3.4 Trabajos preliminares	42
3.4.1 Equipo de perforación	42
3.4.2 Polvorín	43
3.4.3 Parámetros iniciales	44
3.5 Sustitución de explosivo	47
3.6 Propuesta y aplicación de la energía de los explosivos	49
3.6.1 Diseño propuesto	50
3.6.2 Rediseño de voladura.....	52

3.7	Resumen de cálculos y resultados	54
3.7.1	Resumen de cálculos con distintos explosivos	54
3.7.2	Resumen de cálculos simulados con diferente diámetro de perforación	56
3.7.3	Resumen de cálculos simulando con explosivo de mayor energía	58
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados.....	62
4.1	Análisis de resultados.....	62
4.2	Discusión técnica.....	62
4.3	Discusión económica.....	64
4.4	Contrastación de Hipótesis.....	64
	Conclusiones.....	67
	Recomendaciones.....	69
	Referencias Bibliográficas	70
	Anexos	1

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Distribución de la energía en diferentes eventos	18
Tabla 2: Grado de aprovechamiento de la energía de diversos explosivos	19
Tabla 3: Clasificación de la roca según su resistencia a compresión	20
Tabla 4: Determinación de la clase del macizo rocoso.....	21
Tabla 5: Clasificación de Deere (1967) del espaciado de las juntas.....	22
Tabla 6: Clasificación de Barton et al. (1974) de los macizos rocoso	23
Tabla 7: Factor del cucharón para retroexcavadora	27
Tabla 8: Tiempo de Ciclo Estándar para Retroexcavadora (seg)	28
Tabla 9: Factor de conversión de la retroexcavadora.....	28
Tabla 10: Factor de Eficiencia.....	28
Tabla 11: Valores Típicos del Consumo Específico	33
Tabla 12: Variables e Indicadores.....	36
Tabla 13: Ubicación Geográfica.....	39
Tabla 14: Rango de diámetros de perforación	43
Tabla 15: Tipo de Contenedor	43
Tabla 16: Lista de material explosivo utilizado en el proyecto	44
Tabla 17: Diámetro de perforación recomendado	45
Tabla 18: Malla de perforación recomendada	45
Tabla 19: Diseño inicial.....	46
Tabla 20: Características técnicas de los explosivos	48
Tabla 21: Parámetros de SUPERFAM DOS y Emulfan 300S	48
Tabla 22: Proporción de la mezcla explosiva comercial, MEC-28	51
Tabla 23: Proporciones de las mezclas explosivas comerciales	51
Tabla 24: Rediseño de voladura	53

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Rocas sobredimensionadas o bolonería producto de la voladura	5
Figura 2: Tipo de reacción en función de la cinética química	12
Figura 3: Zonas del proceso de detonación	12
Figura 4: Presión de detonación (Pd) y presión de burbuja de dos tipos de explosivo	14
Figura 5: Estimación del RQD a partir de testigos de sondeo. Fotografía y montaje: David Córdova	21
Figura 6: Variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de las junta y de la resistencia a compresión simple de la roca (Bieniawski, 1976)	22
Figura 7: Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados (Hoek y Marinos, 2000)	24
Figura 8: Capacidad del cucharón	27
Figura 9: Ubicación en la Regionalización Geográfica Transversal	38
Figura 10: Resolución de Gerencia por la SUCAMEC	44
Figura 11: Equipo adicional para acelerar la limpieza del área de voladura	47
Figura 12: Bolonerías producto de la voladura con Emulfan 300S	49
Figura 13: Macizo rocoso fracturado y con alta resistencia	50
Figura 14: Resultado de la fragmentación del nuevo diseño, MEC-46	52
Figura 15: Resultado de la fragmentación del rediseño de voladura	53
Figura 16: Cantidad de peso para cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación ..	54
Figura 17: Factor de carga para cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación	55
Figura 18: Factor de energía para cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación ..	56
Figura 19: Simulación del factor de energía para cada explosivo con 3,5" de diámetro de perforación	57
Figura 20: Simulación del factor de energía para cada explosivo con 4,0" de diámetro de perforación	58

Figura 21: Simulación de la cantidad de peso por cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación.....	59
Figura 22: Simulación del factor de carga por cada explosivo con 3,5" de diámetro de perforación.....	60
Figura 23: Simulación del factor de energía por cada explosivo con 4,0" de diámetro de perforación.....	61
Figura 24: Prueba t-Student para dos muestras dependientes.....	65
Figura 25: Estadístico de prueba para muestras dependientes.....	65
Figura 26: Prueba estadístico t de student.....	66

Introducción

El presente trabajo, Tesis titulada “Aplicación de la energía producida por las mezclas explosivas comerciales para la construcción de una carretera”, se realizó en el Proyecto Minero Quellaveco de una empresa contratista de construcción que brinda servicio en la industria de la minería y construcción civil, Conalvías Construcciones S.A.S. Sucursal Perú, en su Contrato 2.MAY.1040 “Construcción Camino de Acceso Principal Tramo II”, en el departamento de Moquegua, tomando como referencia la energía que produce cada explosivo.

Desde mi punto de vista, el interés se justifica, por la gran cantidad de rocas sobredimensionadas o bolonerías mayor a 1 m^3 productos de la detonación y como consecuencia afecta todo el proceso constructivo, siendo el primer resultado en visualizar después de culminado el proceso de voladura.

Motivado por esta condición, intento promover la aplicación de la energía que produce las mezclas explosivas comerciales, de ANFO a granel con Emulsión encartuchada frente al uso de solo ANFO a granel o solo Emulsión encartuchada en macizos rocosos fracturados y resistentes, tomando en cuenta la importancia de cuantificar el rendimiento del explosivo y la cantidad de energía para obtener una fragmentación deseada, menor a 1 m^3 , con la finalidad de continuar eficientemente el avance del proceso constructivo.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Una empresa constructora que se dedica a la construcción de carreteras; sea en la industria minera o construcción civil, y en su proceso de movimiento de tierras al momento de excavar material rocoso en terrenos competentes no pueda aplicar por medios mecánicos entonces le será necesario aplicar la técnica de perforación y voladura de rocas.

Esa técnica, consiste en realizar taladros mediante perforaciones sobre la roca para luego introducir explosivos sea a granel y/o encartuchado y después mediante la detonación transfiere la energía necesaria para fragmentar la roca.

En la presente Tesis se ahondará más en la técnica de diseño de malla de perforación y voladura, el cual interesa a cualquier empresa constructora como obtener una buena fragmentación de rocas, mediante la energía producida por mezclas explosivas comerciales para un mismo diseño que se ha realizado.

Así pues, la investigación busca reducir la fragmentación gruesa mayor a 1 m^3 valiéndose de la energía que produce las mezclas explosivas comerciales que utiliza la industria de la minería y su aplicación al sector construcción civil que realiza las voladuras de rocas en la construcción de una carretera. Compréndase como mezcla explosiva comercial al agregado de más de un tipo de explosivo a ser usada según la naturaleza en particular (Agreda, 1992), que puede causar que la voladura alcance los objetivos trazados por la energía que produce.

Asimismo, una inadecuada proporción de mezcla explosiva comercial puede generar una fragmentación no deseada, siendo este factor una de las principales causas de rocas sobredimensionadas o bolonería con dimensiones mayor a 1 m^3 . Es decir, ahí es donde radica la importancia de esta investigación, pues él no abordar la causa que pueda provocar una inadecuada proporción de mezcla explosiva comercial pueda reflejarse en problemas económicos para las empresas contratistas de la industria minera.

También, investigar sobre la energía que produce las mezclas explosivas comerciales nos facilitara comprender el procedimiento de dichas variables en las diferentes empresas contratistas que realizan perforación y voladura de rocas para la construcción de una carretera, de esta manera identificaremos las dimensiones y/o indicadores que presenten practicas por deficiente en la fragmentación de rocas según lo requerido por el área de movimiento de tierras.

En el ámbito académico, en el anexo N°1 se explica mediante la Matriz de Consistencia la importancia de identificar las variables, incluso a nivel de dimensiones, pues nos permitirá conocer a más profundidad sobre la problemática de las rocas sobredimensionadas o bolonerías de dimensiones mayor 1 m³ producto de la detonación y sus consecuencias. Desde la perspectiva empresarial, contribuirá a las empresas contratistas como la del presente estudio, a tener instrumento de apreciación, y valorar como elemento causante la energía que produce las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas con resistencia intermedias que mejora la fragmentación de rocas en sus procesos de detonación y así redimir y sobrepasar sus objetivos.

Esta investigación de enfoque mixta, ósea; cuantitativa y cualitativa, de diseño cuasi experimental y de tipo aplicativo, se sustenta en que la energía de un explosivo comparado con la de otro explosivo es muy diferente que citado por el Mg. Ing. Víctor Ames, el cual determino que se puede reducir los costos de perforación y voladura con un explosivo más energético, así como también se mejoró la fragmentación obtenida usando ANFO.

Por otra parte, la población en estudio se compuesta por las voladuras realizadas durante la construcción de una carretera. Se obtuvieron dos muestras mediante los protocolos de voladura, pero en rocas fracturadas y resistencia intermedia, según el estudio geomecánico, de una empresa contratista encargada de la perforación y voladura de roca en el sur del país. Se utilizó la técnica de muestreo estratificado en los protocolos de voladuras y se tomaron fotografías con coherencia interna para la variable en estudio.

Por último, se presenta 05 capítulos resumido de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presenta una introducción que aborda de manera general la tesis. Además, se incluye una descripción y formulación detallada del problema, los objetivos e hipótesis del estudio, así como un resumen de cuatro antecedentes investigativos.

En el capítulo II, se procederá a desarrollar el marco teórico, el cual incluirá las definiciones de las variables directas e indirectas. Además, se presentará el marco conceptual, en el cual se expondrán 12 conceptos fundamentales que serán utilizados en la investigación.

En el capítulo III, se presentará un resumen detallado del desarrollo del trabajo de investigación, abarcando los siguientes aspectos: la metodología utilizada en el trabajo, los antecedentes y la geología local, los trabajos preparatorios y la sustitución del explosivo empleado, la propuesta formulada sobre la aplicación de la energía de los explosivos, y, por último, se presentará un resumen de tres cálculos realizados con sus correspondientes resultados obtenidos.

En el capítulo IV, se llevará a cabo un análisis y una discusión fundamentada tanto desde el punto de vista técnico como económico, con el fin de evaluar los resultados obtenidos. Además, se contemplará la posibilidad de confirmar la hipótesis general como parte integral de este análisis.

1.2 Descripción del problema de investigación

En relación con la construcción de una carretera utilizando explosivos para fragmentar la roca y maquinaria como excavadoras con orugas o cargadores frontales con neumáticos, se deben analizar los efectos resultantes de la voladura, como la fragmentación, vibración, *fly rocks* y ondas aéreas. Estos factores pueden tener un impacto en el proceso constructivo de cualquier empresa contratista especializada en Movimiento en Tierras, siendo la fragmentación gruesa mayor a 1m^3 el factor más importante a considerar.

Otro inconveniente es la limitada disponibilidad de explosivos comerciales en el polvorín, tales como los ANFO's Pesados y Agentes de voladura empleando camiones

fábrica. Así pues; en campo, bancos de 10mts de altura en promedio se utilizaba como cebo, un booster de 150g, para asegurar la velocidad de detonación del explosivo. Comúnmente era el SUPERFAM DOS, se obtenía los resultados esperados en la fragmentación de la roca, porque el macizo rocoso presentaba superficie de discontinuidad (muy fracturado). Por otro lado, solo se contemplaba el uso solo de emulsión encartuchada en caso de presencia de lluvias y/o taladros con agua.

Entonces, los problemas surgieron cuando se produjo un cambio en el macizo rocoso en determinadas secciones. Por ejemplo; entre el Km 15+560 y Km 15+640, se observaron características geomecánicas que indicaban una resistencia intermedia a baja de la roca, debido a su mayor grado de fracturación. Estos hallazgos contradicen la información proporcionada en el expediente técnico del proyecto.

Para empezar, la alta presencia de rocas de gran tamaño o fragmentos superiores a 1m^3 se debe a la persistencia en utilizar el mismo diseño de carga explosiva, que consiste únicamente en la utilización de ANFO a granel. Posteriormente, cuando se optó por reemplazar este explosivo por Emulsión encartuchada, no se tuvo en cuenta su aplicación en macizos rocosos fracturados con resistencia intermedia.

A continuación; después de completar el proceso de voladura se reanudan los trabajos de Movimientos de Tierras que, en efecto, la presencia de rocas sobredimensionadas o bolonería de dimensión mayor a 1m^3 , disminuye la producción en un 42,3%. Esta reducción en el rendimiento se debe a la disminución de los factores de producción al excavar la roca, tanto en términos del porcentaje de la capacidad rocosa llena como en la eficiencia de la operación, medida en términos de minutos trabajados por hora. Esto sucede cuando la roca está mal fragmentada.

Adicional y finalmente; es importante mencionar que los costos operativos adicionales se generan tanto por los equipos de línea amarilla, que permanecen en *stand by* debido al proceso de voladura diariamente, como por la realización de voladuras secundarias (por las bolonerías con dimensión mayor a 1m^3), lo cual incrementa los gastos

del área de perforación y voladura en aproximadamente s/ 8,201.38 al día, al no contemplar una estructura de costos para dicha actividad.

Figura 1

Rocas sobredimensionadas o bolonería producto de la voladura.



Nota: Elaboración propia.

1.3 Formulación del problema de investigación

1.3.1 Problema General

- ¿En qué medida inadecuado uso de la energía que produce las mezclas explosivas comerciales sobre el macizo rocoso fracturado y resistencia intermedia en la construcción de una carretera que se hará una fragmentación de rocas con dimensiones mayores a 1m³?

1.3.2 Problemas Específicos

- ¿De qué manera influye la producción de movimiento de tierras al usar mezclas explosivas comerciales sobre las rocas fracturadas y resistencia intermedia para la construcción de una carretera?
- ¿Qué efecto genera el sobrecosto operativo por voladura secundaria al no considerar las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas y resistencia intermedia para la construcción de una carretera?

1.4 Objetivos del estudio

1.4.1 Objetivo General

- Reducir la fragmentación de rocas con dimensiones menores a 1m^3 aplicando la energía producida por las mezclas explosivas comerciales sobre el macizo rocoso fracturado y resistencia intermedia para la construcción de una carretera.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Verificar el aumento del rendimiento de la excavadora usando un correcto confinamiento de la energía que produce las mezclas explosivas comerciales sobre las rocas fracturadas y resistencia intermedia, con el fin de acelerar la construcción de una carretera.
- Evaluar el precio unitario por voladura secundaria considerando la energía producida por las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas y resistencia intermedia para la construcción de una carretera.

1.5 Hipótesis del Estudio

1.5.1 Hipótesis General

- Si se aplican las mezclas explosivas comerciales sobre el macizo rocoso fracturado y resistencia intermedia, entonces se obtendrá favorablemente una fragmentación de rocas con dimensiones menores a 1m^3 para la construcción de una carretera.

1.5.2 Hipótesis Específicos

- Si se usan las mezclas explosivas comerciales sobre las rocas fracturadas y resistencia intermedia, en tal caso influirá ventajosamente en la mejora del rendimiento de la excavadora para la construcción de una carretera.
- Si se consideran las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas y resistencia intermedias, por ende, impactará positivamente en la estructura de costos para la construcción de una carretera.

1.6 Antecedentes investigativos

Ames (2008) en su tesis de grado titulada "Diseño de las mallas de perforación y voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas". Su objetivo

general fue analizar y aplicar la energía de una mezcla explosiva para el diseño de una malla de perforación y voladura correctamente. Para el desarrollo de la investigación se utilizó el método de investigación análisis y comparación, como método general, y observación y medición, como método específico, el diseño de la investigación es observar mediante la muestra, para la recolección de datos, se tiene mediante los catálogos de fabricantes de explosivos nacionales y extranjeros, datos técnicos sobre operaciones de perforación y voladura que cuenta la empresa y para tener un fundamento científico se referencio al artículo "More Power to the Pop" escrito por W. Crosby y M. Pinco. El autor analiza que sus resultados presentados anteriormente se pueden deducir que el cambio del Anfo Pesado por ANFO ha llevado a obtener resultados satisfactorios en el aspecto técnico porque se puede apreciar que en la primera prueba el 69% de los fragmentos tienen dimensiones menores a 0,15m y en la segunda prueba el 90,7% de los fragmentos eran menores que dicha tamaño. La investigación requerida se vincula a la planteada por una propuesta de emplear mezclas explosivas comerciales de mayor energía en un mismo taladro y así obtener un resultado deseado concerniente a la fragmentación.

Carhuancho (2011) en su tesis de pregrado titulada "Optimización de la fragmentación aplicando valores de energía en voladura al tajo Vidal, Nivel 4190 Cantera de caliza Cerro Palo Cemento Andino S.A.". Su objetivo general fue lograr la reducción del material a un diámetro máximo de 1m, a través del uso del factor de energía del explosivo mediante la aplicación de valores de energía en voladura y así optimizar la fragmentación. La metodología de la investigación se utilizó el tipo aplicativo, el método de la investigación es cuantitativa, para el procesamiento de la información, es mediante las técnicas y procedimientos de recolección de datos como: análisis bibliográficos, obtención de catálogos de fabricantes de explosivos y trabajo en campo; además de técnicas de procesamiento y análisis de datos como: datos técnicos que dispone la empresa y trabajo de gabinete. El autor

recomienda que para la aplicación de valores de energía en voladura es necesario conocer las características geomecánicas del macizo rocoso, las propiedades del explosivo y la distribución de energía del explosivo; ya que estos parámetros nos darán una fragmentación deseada. La investigación mencionada se enlaza a la planeada ya que implica la interpretación de los resultados de la fragmentación y cómo impacta estos resultados con los valores de energía.

Yaranga (2021) en su tesis de pregrado titulada “Análisis de la fragmentación de mineral producto de la voladura y su influencia en el rendimiento de equipos de carguío en una mina a tajo abierto, 2021”. Su objetivo general fue determinar la influencia de la fragmentación del mineral producto de la voladura en el rendimiento de los equipos de carguío en una mina atajo abierto. El tipo y nivel de la investigación es de tipo aplicativo y explicativo respectivamente, el diseño de la investigación es descriptivo longitudinal, para la recolección de datos se empleó las siguientes técnicas: observación en campo, recolección bibliográfica, data en campo y análisis de data de voladura, e instrumentos: tablas de Excel, libros y revistas, información de internet, lap top, otros. El autor concluye que el resultado del análisis de la fragmentación de mineral producto de la voladura durante los periodos enero a junio y su optimización y mejora en el periodo de julio a diciembre en el rendimiento de los equipos de carguío fueron una mejora en el *dig rate* en 97.59 t/h y una mejora en la fragmentación del mineral en el P80 en 0,34 pulgadas. La investigación referida se sujeta a la presentada porque implica la fragmentación como resultado de una voladura y cómo impacta estos resultados con el rendimiento de equipos de carguío.

Cheppe (2021) en su tesis de pregrado titulada “Evaluación técnica – económica de la aplicación del Anfo Pesado Ártico para reducir los índices P80 de fragmentación en el tajo Susan, minera IRL – unidad Corihuarmi”. Uno de sus objetivos específicos fue de mitigar la ejecución de voladuras secundarias constantes, ya sea por plasteo o cachorro. La metodología de la investigación se

utilizó el tipo explicativo – experimental con enfoque cuantitativo, el método de la investigación es del tipo analítico - inductivo, para los instrumentos de investigación, se realizó lo siguiente: selección de datos a partir de los reportes de voladura presentada por la empresa, validación siendo presentado y sustentados al área de operaciones mina para su autenticidad y confiabilidad se garantiza mediante recolección de datos *in situ* y apoyados bajo los análisis digitales de fotografías en campo. El autor indica que a partir de la evaluación, se muestran efectos positivos en su aplicación, reduciendo la producción de material grueso, eliminación de voladuras secundarias y por consiguiente reducción en los costos de voladura; además concluye que considerando el costo de voladura de plasteo de 1.06 \$/t y el costo promedio de los proyectos primarios equivalente a 0.54 \$/t, se obtiene un costo total de 1.6\$/t, empleando única y exclusivamente el explosivo Emulnor 5000 y evaluando con la aplicación del nuevo producto, cuyo costo de voladura promedio es 0.61\$/t, indicaría una sólida y considerable reducción en un 61.9% del costo. La investigación mencionada está relacionada con la presente tesis en curso, ya que se enfoca en el resultado de sustituir el explosivo que provoca ese cambio, así como los costos operativos asociados a las voladuras secundarias.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco Teórico

2.1.1 *Mezcla explosiva comercial*

2.1.1.1 Definición. Entre las definiciones se mencionará el siguiente:

El Dr. Agreda (1992) define como “las composiciones comerciales de los explosivos son mezclas formuladas para ser usadas en condiciones específicas. Cada una tiene su diseño, características, ventajas y desventajas” (p. 28).

Para este caso; esta investigación propone equilibrar y aprovechar la energía de los gases que produce el ANFO a granel con la energía de tensión que produce la emulsión encartuchada para aplicar en macizos rocosos fracturados y de resistencia intermedias.

2.1.1.2 Explosivo.

2.1.1.2.1 Definición. De las definiciones propuestas, se menciona lo siguiente, los materiales explosivos son sustancias o compuestos químicos en estado sólido, líquido o gaseoso, que por medio de reacciones químicas de óxido-reducción, son capaces de transformarse en un tiempo muy breve, del orden de una fracción de milisegundo, en grandes volúmenes de productos gaseosos y con la correspondiente liberación de energía. (EXSA, 2019, p.9)

Así que; de lo último, sería recomendarle cuantificar esta energía y analizar los tipos de materiales explosivos que podrían ser utilizados. Además, podría ser beneficioso equilibrar la cantidad de explosivos empleados en un mismo taladro mediante la utilización de más de un tipo.

2.1.1.2.2 Proceso de Reacción. Como se mencionó al inicio, la reacción química del explosivo es por oxido-reducción y se propaga como una onda de choque por medio de la columna explosiva.

Para ello, la energía liberada en esta reacción exotérmica, en forma de onda de presión y alta temperatura, provoca la sucesiva disociación de las moléculas adyacentes, de forma que la reacción se propaga a todas las partículas. Por otro

lado, la velocidad con que se efectúa esta propagación puede estabilizarse hasta alcanzar un cierto valor. (Bernaola et al., 2013, p.66)

Conviene subrayar; además, incluir en esa reacción química la energía en forma de calor para cumplir con la ley de conservación de la materia y de la energía.

Por lo tanto; según la velocidad de propagación de su reacción química, se puede dividir en tres tipos:

a) Combustión

EXSA (2019) enfatiza que “combustión puede definirse como tal a toda reacción química capaz de desprender calor pudiendo o no, ser percibida por nuestros sentidos, y que presenta un tiempo de reacción bastante lento” (p. 9). Por ejemplo, al encender el palo de fósforo.

b) Deflagración

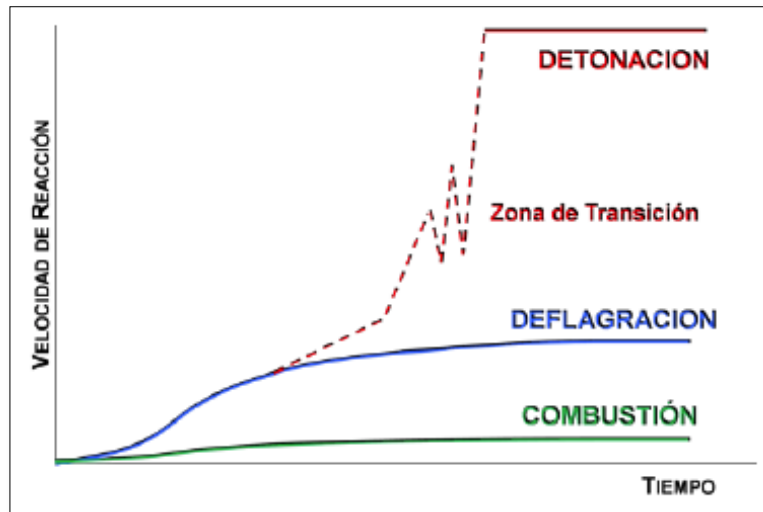
Bernaola et al. (2013) indica que “una deflagración es una combustión súbita con llama a baja velocidad de propagación, sin explosión. Se suele asociar erróneamente con las explosiones, usándose a menudo como sinónimo” (p. 67). Por dar un ejemplo la pólvora negra.

c) Detonación

EXSA (2019) describe que “es un proceso físico-químico caracterizado por su gran velocidad de reacción y por la formación de gran cantidad de productos gaseosos a elevada temperatura, que adquieren una gran fuerza expansiva (que se traduce en presión sobre el área circundante)” (p. 9). Siendo el más conocido la dinamita.

Figura 2

Tipo de reacción en función de la cinética química.



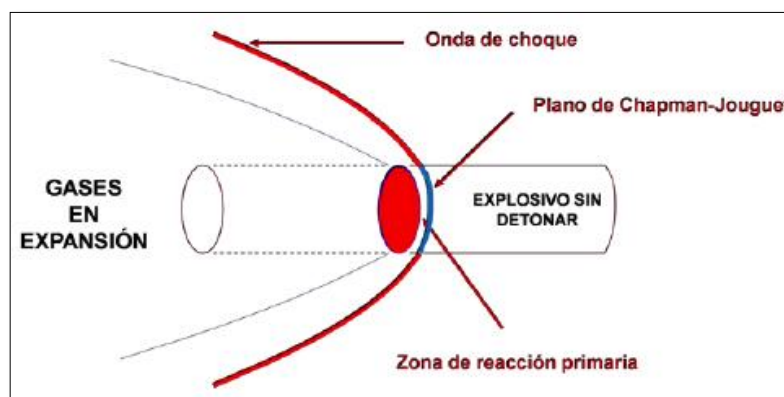
Nota: fuente Bernaola et al., Perforación y Voladura de Rocas en Minería, 2013.

2.1.1.2.3 Mecanismo de la Detonación. En este punto se menciona el Postulado de Chapman – Jouguet que supone la reacción química y la onda de choque se esparcen juntas.

Esto significa, para entender el funcionamiento del fenómeno de la detonación, conviene conocer como son las diferentes zonas de reacción que se producen durante la misma. Si se considera una carga cilíndrica que se detona por unos de sus extremos, se pueden distinguir las zonas de siguientes (figura 3):

Figura 3

Zonas del proceso de detonación.



Nota: fuente Bernaola et al., Perforación y Voladura de Rocas en Minería, 2013.

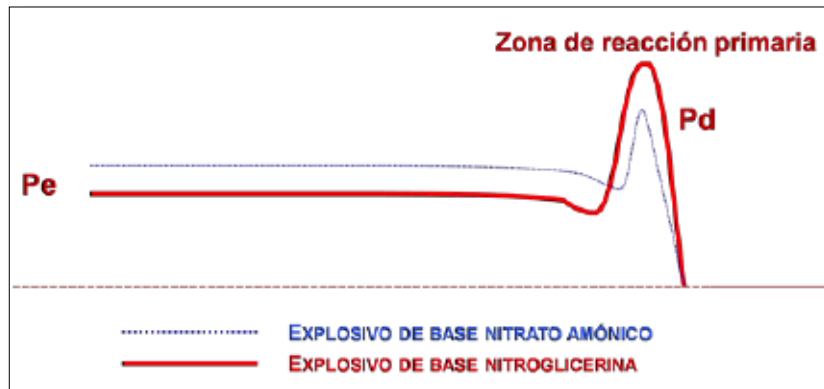
- Una zona de explosivo que todavía no ha detonado.

- Una zona de reacción primaria, que se propaga a una velocidad de varios miles de metros por segundo (velocidad de detonación), en la cual tienen lugar las reacciones más rápidas y violentas. Este movimiento se propaga en forma de onda de choque de muy alta presión a todo el medio circundante. Dicha presión se denomina presión de detonación.
- Una zona de reacción secundaria, donde se acumulan los productos de explosión, más lentos en su desplazamiento que la onda de choque, y se producen una serie de reacciones complementarias que se piensa dan lugar a gran parte de los gases producidos en la reacción. Se caracteriza por una presión inferior a la anterior, que se denomina presión de explosión o presión de burbuja, originada por la expansión de todos estos productos gaseosos.
- La superficie de separación entre las zonas primaria y secundaria, aunque no es exactamente plana, se conoce con el nombre de "Plano de Chapman-Jouget".

La composición y características del explosivo, entre otras variables, determinan la velocidad de detonación, así como las presiones de burbuja y detonación. Tal como se indica en la figura 4, un explosivo de base nitroglicerina, por ejemplo, tendría alta velocidad de detonación, y también alta presión de detonación. En cambio, es relativamente bajo volumen de gases que produce la detonación de la nitroglicerina determina que la presión de burbuja sea también baja. Por el contrario, un explosivo de base nitrato amónico, cuya detonación es más lenta pero produce mayor cantidad de gases, tendría una presión de detonación más baja, pero una presión de burbuja más alta. (Bernaola et al., 2013, p. 68-69)

Figura 4

Presión de detonación (P_d) y presión de burbuja de dos tipos de explosivo.



Nota: fuente Bernaola et al., Perforación y Voladura de Rocas en Minería, 2013.

Así pues; se tiene como ejemplos típicos al ANFO que contiene explosivo de base nitrato amónico y a la dinamita que contiene explosivo de base nitroglicerina.

2.1.1.2.4 Características. En cuanto a las características del explosivo se considerará en señalar como: rompedoras, energéticas y prácticas:

a) Presión de Detonación

EXSA (2019) define que, “es la presión que existe en el plano “CJ” detrás del frente de detonación, en el recorrido de la onda de detonación. Es función de la densidad y del cuadrado de velocidad” (p. 12).

ENAEEX (1994) considera que “a esta presión de detonación como la responsable del fracturamiento de la roca alrededor del pozo de tronadura” (p. 8).

De hecho; esta característica se percibe en campo mediante la fragmentación de la roca, prácticamente como menciona ENAEEX.

b) Velocidad de Detonación

EXSA (2019) define que, “es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo, y por tanto es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía” (p. 12)

Bernaola et al. (2013) considera que, “es importante distinguir entre la velocidad de detonación (de la reacción química) y de la onda de choque (transmisión física)” (p. 77).

Así pues; a esta característica se tendrá en consideración con la segunda definición, al emplear doble cebo en un mismo taladro para más de un tipo de explosivo.

c) Densidad

Bernaola et al. (2013) da a conocer que, “la densidad relativa de los explosivos está comprendida normalmente entre 0,8 y 1,5. Existen algunos explosivos de menor densidad con aplicaciones muy determinadas y cuyo uso implica una baja energía por unidad de volumen con aplicación en voladuras de recorte” (p. 80).

d) Energía (Calor de Reacción)

EXSA (2019) define que, “es un valor teórico, el cual da una indicación sobre el potencial energético de un explosivo, siendo claramente entendido que solo una parte de este potencial sirve durante la voladura; el resto se pierde” (p.31).

e) Volumen de gases

EXSA (2019) define que, “es el volumen que ocupan los gases producidos por un kilogramo de explosivo en condiciones normales. El volumen o mol de la molécula-gramo de cualquier gas, en condiciones normales es 22,4 litros” (p.15).

f) Presión de explosión

EXSA (2019) define que, “es la presión de los gases producidos por la detonación, cuando estos todavía ocupan el volumen inicial del explosivo antes de cualquier expansión. Nuevamente dentro de (...) la presión de explosión es igual al 50% de la presión de detonación” (p. 12).

g) Sensibilidad

Bernaola et al. (2013) define que, “el mayor o menor grado de energía de iniciación que hay que transmitirle para que se produzca su iniciación y, a continuación, su detonación” (p. 82).

h) Fuerza o Potencia

Bernaola et al. (2013) define:

Como la capacidad que posee el explosivo para quebrantar y proyectar la roca. En realidad, se trata de la energía del mismo aprovechado en la voladura. Esta

característica depende fundamentalmente de la composición de explosivo, pudiendo optimizarse con la adecuada técnica de voladura. (p. 71)

i) Calidad de los Humos

Bernaola et al. (2013) comenta que, “los humos residuales son el conjunto de productos gaseosos resultantes de la reacción de detonación del explosivo entre los que se hallan vapores nitrosos (NO_x), vapor de agua, monóxido de carbono (CO) y anhídrido carbónico (CO_2)” (p. 82).

j) Resistencia al agua

ENAEEX (1994) define que, “los explosivos varia extensamente según su composición, y empaquetamiento. Los explosivos con nitrato de amonio/petróleo (ANFO) tienen una resistencia al agua muy pobre, (...). Finalmente se puede reducir la sensibilidad al punto donde el producto no detonará” (p. 9).

k) Estabilidad

ENAEEX (1994) define que, “se usa este término para determinar el tiempo que un producto explosivo puede permanecer en un pozo de tronadura sin que ocurra un cambio en su composición química o física, especialmente cuando se trata de emulsiones y acuageles” (p. 6).

En pocas palabras, de todas las características mencionadas, las primeras tres serían a las características rompedoras, las siguientes tres serían a las características energéticas y los últimos cinco serían a las características prácticas.

2.1.1.3 Energía. Antes de contrastar la capacidad de los explosivos entre sí; se estudia la fuerza o potencia pero en un sentido relativo, que frecuentemente interesa la energía; donde se efectúa el trabajo en expansión dentro del macizo rocoso:

2.1.1.3.1 Potencia por Peso. Se puede definir según:

Dr. Agreda (1992) menciona que, “es un medio antiguo de comparar la potencia relativa de un explosivo; en un inicio la dinamita pura o la nitroglicerina fueron tomados como estándar de comparación de potencia de otras dinamitas” (p. 7).

2.1.1.3.2 Potencia por Volumen. Se puede definir según:

Dr. Agreda (1992) define que, “es una medida de comparación del número de cartucho de un explosivo que hacen trabajo equivalente a un cartucho de dinamita pura 1 1/2”x8” (p. 7).

2.1.1.3.3 Energía teórica disponible. En cuanto a este punto se averigua la coherencia existente entre la energía empleada en fragmentar la roca y la energía teórica disponible en el explosivo.

a) Formulas Empíricas

- La fórmula sueca propuesta para determinar la *Potencia Relativa en Peso* <PRP> de un explosivo es como vemos en la primera ecuación:

$$PRP = \frac{5}{6}x \frac{Q_e}{Q_0} + \frac{1}{6}x \frac{VG}{VG_0} \quad (1)$$

Donde:

Q_0 = Calor de explosión de 1 kg de explosivo LFB (5MJ/Kg) en condiciones normales de presión y temperatura.

Q_e = Calor de explosión de 1 kg del explosivo a emplear.

VG_0 = Volumen de los gases liberados por 1 kg de explosivo LFB (0.85 m³/kg).

VG = Volumen de los gases liberados por el explosivo a emplear.

- Paddock (1987) sugiere comparar los explosivos mediante el denominado *Factor de Potencia*, definido como vemos en la ecuación 2:

$$FP = PAP_x \times VD \times \rho_e \quad (2)$$

Donde:

PAP_x = Potencia absoluta en Peso del explosivo (x) (cal/g).

VD = Velocidad de detonación (m/s).

ρ_e = Densidad de explosivo (g/cm³).

- Otra expresión empleada para calcular la *Potencia Relativa en Peso* es como vemos en la tercera ecuación:

$$PRP = \left(\frac{\rho_e \times VD^2}{\rho_0 \times VD_0^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

Donde:

ρ_e = Densidad de explosivo (g/cm³).

VD = Velocidad de detonación (m/s).

ρ_0 y VD_0 se refieren al explosivo patrón. (López et al., 2003, p. 109 - 110)

En otras palabras; cual sea el caso por emplear regularmente, las fórmulas empíricas, se tiene que discernir notoriamente la teórica en confirmarse con los diferentes cálculos.

2.1.1.3.4 Rendimiento energético de las voladuras. Entre las interpretaciones se mencionan a:

Hagan, 1977 (como se citó en López et al., 2003) estima que, “solamente un 15% de la energía total generada en la voladura es aprovechada como trabajo útil en los mecanismos de fracturamiento y desplazamiento de la roca” (p. 178).

Además; Rascheff y Goemans, 1977 (como se citó en López et al., 2003) afirman: Aproximadamente el 53% de la energía del explosivo va asociada a la onda de choque. Este valor depende de las condiciones de experimentación y pueden encontrarse resultados muy dispares que van desde el 5% al 50% de la energía total, según los distintos tipos de roca que se desean fragmentar y la clase de explosivo empleado. (p. 178)

Tabla 1

Distribución de la energía en diferentes eventos.

EVENTO	%
Desmenuzamiento de la pared del taladro	5
Formación de fractura (radial y de tensión)	10
Corte	5
Calor y luz	20
Movimiento de la masa rocosa	15
Vibración del terreno	30
Presión del aire	15
TOTAL	100

Nota: adaptado de Explosives and Rock Blasting, Atlas Power. 1987.

2.1.1.3.5 Factor de eficiencia del explosivo. Una buena explicación sería:

Desde el punto de vista de EXSA (2019), “es también interesante para un criterio de selección, además de la composición y características, tener en cuenta aspectos prácticos como el factor de eficiencia o grado de aprovechamiento de la energía” (p. 24).

Tabla 2

Grado de aprovechamiento de la energía de diversos explosivos.

MEZCLA EXPLOSIVO	EFICIENCIA (%)
Explosivos moleculares (Nitroglicerina, pentrita, TNT y otros)	95 a 100%
Emulsiones	90 a 95%
Quantex MEQ	75 a 90%
ANFOs pesados bombeables (sobre 60% emulsión)	75 a 90%
ANFOs pesados vaceables (bajo 50 o 60% emulsión)	65 a 85%
Hidrogeles	55 a 70%
ANFO	60 a 80%
SANFO	50 a 70%

Nota: adaptado del Manual Práctico de Voladura, EXSA. 2019.

2.1.2 Macizo rocoso

2.1.2.1 Definición. Entre las descripciones se menciona como:

Se define MACIZO ROCOSO como la forma en la que se presentan las rocas en el medio natural. Así pues, un macizo rocoso estará definido por la roca y la estructura, que a su vez contendrá planos de estratificación, fallas, juntas, pliegues y otros caracteres estructurales. (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 1)

2.1.2.2 Roca. De las descripciones se tiene como:

Se define ROCA como un agregado sólido, formado por uno o varios minerales, que se encuentra ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre. En mecánica de rocas se habla en muchas ocasiones de ROCA o ROCA INTACTA para referirse a un elemento (trozo, bloque, probeta) de roca que no presenta discontinuidades observables. (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 1)

La clasificación de las rocas según su resistencia a compresión uniaxial, propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (Brown, 1981), es la siguiente: (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 47)

Tabla 3

Clasificación de la roca según su resistencia a compresión.

Resistencia (MPa)	Clasificación
>250	Extremadamente alta
100-250	Muy Alta
50-100	Alta
25-50	Media
5-25	Baja
1-5	Muy baja
0,25-1	Extremadamente baja

Nota: adaptado de Mecánica de Rocas, Ramírez & Alejano. 2004.

2.1.2.3 Estructura. Se interpreta como:

“Se denomina estructura del macizo rocoso al conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región del mismo” (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 181).

a) Dominio Estructural

“Es la parte del macizo rocoso, generalmente delimitada por discontinuidades geológicas, dentro de la cual la estructura es prácticamente homogénea” (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 181).

b) Discontinuidad

Es una superficie del macizo rocoso que está abierta o puede abrirse fácilmente, sin ofrecer resistencia a tracción, al actuar sobre ella las tensiones inducidas en el macizo por la excavación. Las superficies de discontinuidad pueden aparecer durante la formación del macizo rocoso o posteriormente, por causas tectónicas. Al primer tipo corresponden los planos de estratificación, las laminaciones y la foliación primaria de las rocas plutónicas. Son del segundo tipo: la esquistosidad, las fallas y las juntas. (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 181)

2.1.2.4 Geomecánica.

2.1.2.4.1 Clasificaciones más importantes. Se nombra los siguientes:

Las tres clasificaciones más utilizadas actualmente son la de Bieniawski (RMR), al de Barton, Lien y Lunde (Q) y la de Hoek-Brown (GSI). Las dos primeras utilizan un

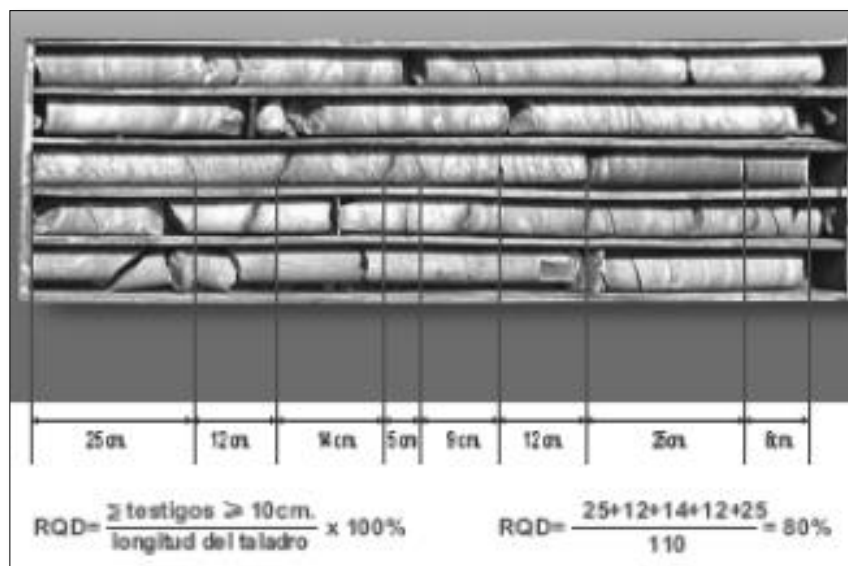
parámetro, RQD (Rock Quality Designation), que constituye la base de la clasificación de Deere. (Pedro Ramírez y Leandro Alejano, 2004, p. 147)

a) Clasificación de Deere (1967)

Propuso un sistema de diseño de sostenimientos basado en el RQD. Este parámetro se obtiene a partir del porcentaje de trozos de testigo mayores de 10 cm recuperado en un sondeo, tal y como muestra la Figura 2.4 y permite estimar el grado de fracturación del macizo rocoso. (Ramírez y Alejano, 2004, p. 147)

Figura 5

Estimación del RQD a partir de testigos de sondeo. Fotografía y montaje: David Córdova.



Nota: fuente Mecánica de Rocas, Ramírez & Alejano. 2004.

b) Clasificación de Bieniawski (1973, 1976, 1989)

“Para determinar la calidad del macizo rocoso, se divide este en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas, dentro de las cuales la estructura es prácticamente homogénea” (Ramírez y Alejano, 2004, p. 149).

Tabla 4

Determinación de la clase del macizo rocoso.

VALOR TOTAL DEL RMR	81-100	61-80	41-60	21-40	<20
CLASE NUMERO	I	II	III	IV	V
DESCRIPCION	MUY BUENO	BUENO	MEDIO	MALO	MUY MALO

Nota: adaptado de Mecánica de Rocas, Ramírez & Alejano. 2004.

La resistencia del macizo rocoso se va reduciendo al aumentar el número de juntas, ósea, cuando disminuyen los espaciados de cada familia. En la figura 2.6 se muestra gráficamente la variación de resistencia del macizo, en función del espaciado de las juntas y de la resistencia a compresión simple del material rocoso. Existen muchas clasificaciones del espaciado de las juntas. La utilizada por Bieniawski es la propuesta por Deere en su clasificación de 1967 que se presenta en la Tabla 2.4. (Ramírez y Alejano, 2004, p. 150)

Tabla 5

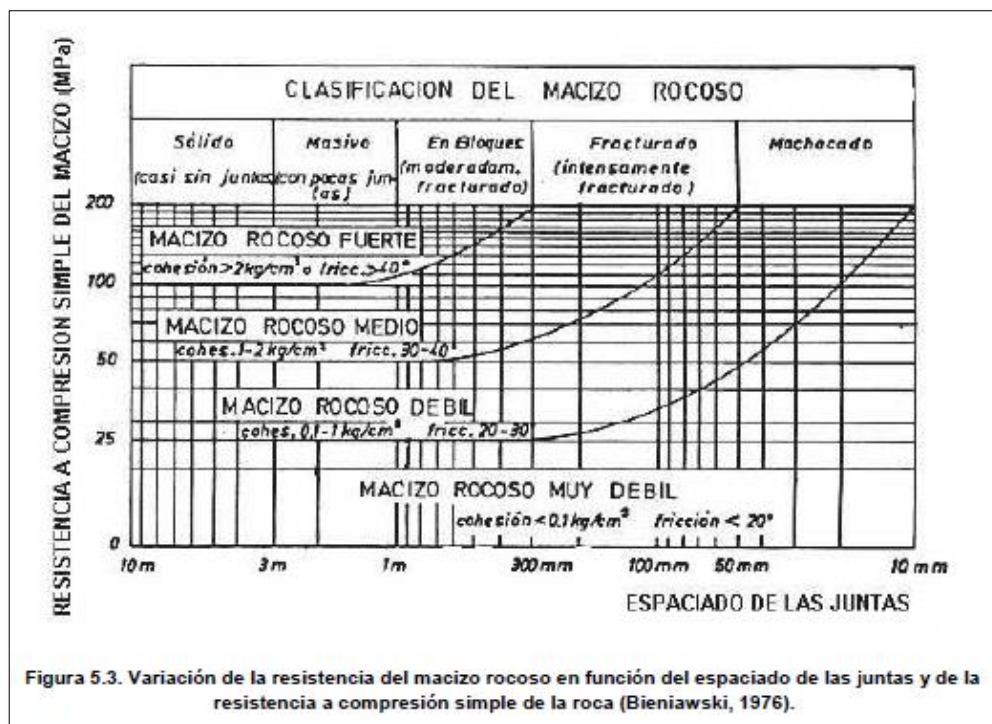
Clasificación de Deere (1967) del espaciado de las juntas.

Descripción	Espaciado de las juntas	Tipo de macizo rocoso
Muy ancho	>3 m	Sólido
Ancho	1-3 m	Masivo
Moderadamente cerrado	0,3-1 m	En bloques
Cerrado	50-300 mm	Fracturado
Muy cerrado	<50 mm	Machacado

Nota: adaptado de Mecánica de Rocas, Ramírez & Alejano. 2004.

Figura 6

Variación de la resistencia del macizo rocoso en función del espaciado de la junta y de la resistencia a compresión simple de la roca (Bieniawski, 1976).



Nota: fuente Ramírez & Alejano, Mecánica de Rocas, 2004.

c) Clasificación de Barton et al. (1974)

“El índice Q tiene un alto grado de fiabilidad, ya que está basado en un elevado número de casos que comprenden muy diversos tamaños de túneles, tipos de excavación, profundidades y calidades de macizos rocosos” (Ramírez y Alejano, 2004, p. 162).

Tabla 6

Clasificación de Barton et al. (1974) de los macizos rocoso.

TIPO DE MACIZO	VALOR DE Q
Excepcionalmente malo	$10^{-3} - 10^{-2}$
Extremadamente malo	$10^{-2} - 10^{-1}$
Muy malo	$10^{-1} - 1$
Malo	1 - 4
Medio	4 - 10
Bueno	10 - 40
Muy bueno	40 - 100
Extremadamente bueno	100 - 400
Excepcionalmente bueno	400 - 1000

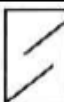





Nota: adaptado de Mecánica de Rocas, Ramírez & Alejano. 2004.

d) Clasificación GSI (Geological Strength Index)

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geomecánicas de las superficies de discontinuidad existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El GSI combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades. (Ramírez y Alejano, 2004, p. 165)

Figura 7

Índice de resistencia geológica (GSI) para macizos rocosos fracturados (Hoek y Marinos, 2000).

ESTRUCTURA DEL MACIZO ROCOSO	CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES				
	MUY BUENA	BUENA	MEDIA	MALA	MUY MALA
 INTACTO O MASIVO Muestras intactas de roca o macizos rocosos masivos con pocas discontinuidades muy espaciadas.	90			N/A	N/A
 FORMADO POR BLOQUES Macizo rocoso consistente en bloques cúbicos delimitados por tres familias de discontinuidades, con los bloques bien encajados.	80				
 FORMADO POR MUCHOS BLOQUES Macizo rocoso formado por bloques angulares de muchas caras delimitados por cuatro o más familias de discontinuidades. Los bloques están encajados pero sólo parcialmente.		60			
 FORMADO POR MUCHOS BLOQUES, DISTORSIONADO Y BANDEADO Plegado con muchos bloques angulares formados por la intersección de muchas familias de discontinuidades. Planos de estratificación o de esquistosidad persistentes.			40		
 DESINTEGRADO Macizo rocoso muy fracturado con una mezcla de bloques angulares y redondeados débilmente encajados.				20	
 LAMINADO Y CIZALLADO Debido a la existencia de numerosos planos débiles muy próximos de esquistosidad o de cizalla, no existen bloques.	N/A	N/A			10

ENCAJE DECRECIENTE ENTRE LOS TROZOS DE ROCA

NOTAS SOBRE LAS CONDICIONES DE LOS LABIOS DE LAS DISCONTINUIDADES

MUY BUENA : superficies muy rugosas y sanas
 BUENA : superficies rugosas, ligeramente meteorizadas y teñidas de óxido
 MEDIA : superficies lisas y moderadamente meteorizadas y alteradas
 MALA : superficies con espejos de falla y altamente meteorizadas, con rellenos de fragmentos angulares o con recubrimientos compactos
 MUY MALA : superficies con espejo de falla altamente meteorizadas con recubrimientos o rellenos de arcillas blandas

Nota: fuente Mecánica de Rocas, Ramírez & Alejano. 2004.

2.1.3 Fragmentación de la roca

Con respecto al mecanismo de la fragmentación de la roca, en la detonación de un explosivo podrían diferenciarse dos fases:

- Una primera fase, representada por la presencia de una onda de detonación de mayor o menor velocidad, característica representativa en gran medida del poder rompedor del explosivo, y
- Una segunda fase, representada por la formación de un gran volumen de gases a elevada temperatura. (Bernaola et al., 2013, p. 131)

Además; este mecanismo aún no está plenamente definido, existiendo varias teorías que tratan de explicarlo entre los que mencionamos a:

- Teoría de reflexión (ondas de tensión reflejadas en una cara libre).
- Teoría de expansión de gases.
- Teoría de ruptura flexural (por expansión de gases).
- Teoría de torque (torsión) o de cizallamiento
- Teoría de craterización.
- Teoría de energía de los frentes de onda de compresión y tensión.
- Teoría de liberación súbita de cargas.
- Teoría de nucleación de fracturas en fallas y discontinuidades. (EXSA, 2019, p.114)

Conviene subrayar; que la descripción de las fases o de las teorías del fenómeno se supone que el macizo rocoso es un sólido continuo, homogéneo, isótropo y elástico.

Asimismo; una explicación sencilla, comúnmente aceptada, que resume varios de los conceptos considerados en estas teorías, estima que el proceso ocurre en varias etapas o fases que se desarrollan casi simultáneamente en un tiempo extremadamente corto, de pocos milisegundos, durante el cual ocurre la completa detonación de una carga definida, comprendiendo desde el inicio de la fragmentación hasta el total desplazamiento del material volado.

Estas etapas son:

- Detonación del explosivo y generación de la onda de choque.
- Transferencia de la onda de choque a la masa de la roca iniciando su agrietamiento.
- Generación y expansión de gases a alta presión y temperatura que provoca el fracturamiento y movimiento de la roca.
- Desplazamiento de la masa de roca triturada para formar la pila de escombros o detritos. (EXSA, 2019, p.114)

Igualmente; a tener en cuenta sobre las etapas mencionadas, porque se considerará en suma de las propiedades del macizo rocoso y de las características de sus discontinuidades para poder diseñar y obtener la fragmentación que uno se propone.

Por otro lado, “una mala fragmentación puede hacer necesario la realización de voladuras secundarias o taqueos, o bien, la necesidad de romper los sobre tamaños mediante medios mecánicos, con el sobre coste añadido que supone. El tamaño máximo deseado en voladuras a cielo abierto en canteras de áridos vendrá definido por la capacidad de la planta de tratamiento, en concreto por el tamaño máximo de admisión del triturador primario.

Del mismo modo, con una fragmentación adecuada es posible la optimización de los equipos de carga y transporte, pudiendo trabajar ambos a plena capacidad sin pérdidas de tiempo de ciclo ni viajes a media carga por tener que transportar grandes bloques de roca. (Bernaola et al., 2013, p. 194-195)

Así pues; como se describe en el planteamiento del problema se busca reducir la cantidad de rocas con dimensiones de mayores a 1m^3 con el objetivo principal de lograr una fragmentación óptima. De esta manera, se evitará que afecte la producción de movimientos de tierras y genere costos adicionales debido a la voladura secundaria.

2.1.4 Producción de la excavadora

“El cálculo de producción de las excavadoras depende también de la carga útil media del cucharón, el tiempo medio del ciclo y la eficiencia del trabajo” (Jorge Solanilla, 2003, p. 163).

2.1.4.1 Carga útil del cucharón. Se explica de la siguiente manera:

“Es la cantidad de material que el cucharón carga en cada ciclo de excavación. Depende de su tamaño y forma, de la fuerza de excavación, de las características del suelo y del factor de llenado de ese tipo de material” (Solanilla, 2003, p. 38).

2.1.4.1.1 Capacidad del cucharón. Se determina según como:

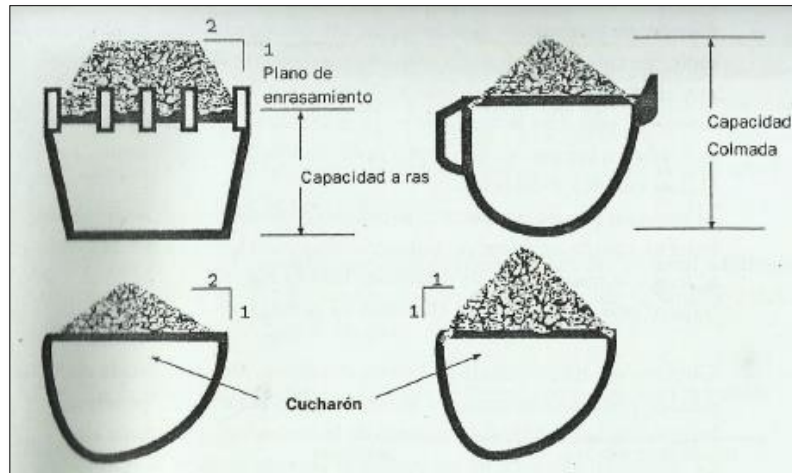
“Se puede medir en términos de capacidad a ras o capacidad colmada” (Solanilla, 2003, p. 36).

a) Capacidad a ras

“Es el volumen del cucharón hasta el nivel del plano de enrasamiento (ver figura)” (Solanilla, 2003, p. 36).

Figura 8

Capacidad del cucharón.



Nota: fuente Gerencia de equipos para obras civiles y minería, Solanilla. 2003.

b) Capacidad colmada

“Es la suma del volumen de la capacidad a ras más el volumen de material amontonado encima del plano de enrasamiento a un ángulo de reposo determinado” (Solanilla, 2003, p. 37).

2.1.4.1.2 Factor de llenado. La determinación será como:

“Depende de las características del material a trabajar, si está seco o húmedo, si esta revuelto con otros materiales, de su tamaño y del sitio donde está depositado para el cargue” (Solanilla, 2003, p. 39).

Tabla 7

Factor del cucharón para retroexcavadora.

MATERIAL	FACTOR DE LLENADO (% de la capacidad colmada)
Suelo natural arcilloso, arcilla arenosa, tierra suave	100 – 120 %
Tierra seca, tierra arenosa	95 – 110 %
Suelo natural arenoso con grava, arcilla dura y compacta	80 – 90 %
Roca bien fragmentada por voladura	60 – 75 %
Roca mal fragmentada por voladura	40 – 50 %

Nota: adaptado de la Gerencia de equipos para obras civiles y minería, Solanilla. 2003.

2.1.4.2 Tiempo de ciclo. Se explica como:

Para determinar el tiempo total del ciclo de una excavadora se puede hacer por medio de tomas de tiempo del ciclo estándar sobre la obra, o haciendo el cálculo con base en las tablas del tiempo del ciclo estándar, de acuerdo al peso de la

maquina a la capacidad del cucharon, al ángulo de giro de la operación, y afectando este dato con el factor de conversión de la retroexcavadora. (Solanilla, 2003, p. 165)

Tabla 8

Tiempo de Ciclo Estándar para Retroexcavadora (seg).

PESO DE LA MAQUINA TON.	CAPACIDAD DEL CUCHARON m ³	ANGULO DE GIRO	
		45° A 90°	90° A 180°
6	Hasta 0.35	10 a 13	13 a16
8 a 12	Hasta 0.60	11 a 14	14 a 17
15 a 20	Hasta 1.20	13 a 16	16 a 19
20 a 23	Hasta 1.26	14 a 17	17 a 20
23 a 36	Hasta 1.80	15 a 18	18 a 21
36 a 44	Hasta 2.20	16 a 19	19 a 22
65 a 70	Hasta 4.30	18 a 21	21 a 24
95 a 105	Hasta 6.30	22 a 25	25 a 28
160	Hasta 11.0	24 a 27	27 a 30

Nota: adaptado de la Gerencia de equipos para obras civiles y minería, Solanilla. 2003.

Tabla 9

Factor de conversión de la retroexcavadora.

Condición de excavación	Condición de la obra			
	Fácil	Normal	Moderada	Difícil
Hasta 40%	0.7	0.9	1.1	1.4
40% a 75%	0.8	1.0	1.3	1.6
Más de 75%	0.9	1.1	1.5	1.8

Nota: adaptado de la Gerencia de equipos para obras civiles y minería, Solanilla. 2003.

2.1.4.3 Factor de eficiencia. Se interpreta como:

“Se puede escoger de la siguiente tabla, pero si se desea una cifra más real de la producción, se puede determinar la eficiencia de acuerdo a las condiciones reales de la operación” (Solanilla, 2003, p. 168).

Tabla 10

Factor de Eficiencia.

Condiciones de operación	Eficiencia del trabajo
Buenas	0.83
Promedio	0.75
Moderada	0.67
Deficiente	0.58

Nota: adaptado de la Gerencia de equipos para obras civiles y minería, Solanilla. 2003.

Es conveniente subrayar que Solanilla estable que las retroexcavadoras pueden ser tanto excavadoras sobre orugas como sobre neumáticos.

2.1.5 Costos operativos por voladura secundaria

2.1.5.1 Contabilidad de costos. Una de las definiciones es según:

La contabilidad de costos crea un puente entre la contabilidad financiera y la contabilidad administrativa, toda vez que se integra con la contabilidad financiera al suministrar información sobre los productos y/o servicios para los estados financieros y con la contabilidad administrativa mediante el suministro de una parte de la información cuantitativa de los costos básicos que necesitan los administradores. (Lujan, 2009, p. 7)

“La contabilidad de costos constituye el complemento amplificado y necesario de la contabilidad financiera, que tiene por objeto brindar información de los hechos en el momento preciso para tomar decisiones respecto a maximizar beneficios o minimizar costos” (Lazo, 2013, p. 26).

Así; se puede enmarcar la contabilidad en función de tres ítems: costos, administrativos y financieros; siendo el primer ítem el intermedio de los tres y se acostumbra en las tomas de decisiones para durante el proceso operativo.

2.1.5.1.1 Costos por procesos. Se puede describir como:

Para estos efectos se supone que la producción consiste en unidades iguales, que resultan de un mismo proceso, empleándose la misma cantidad de material, de mano de obra y costos indirectos de fabricación. Se usa este sistema de costos en industrias de producción ininterrumpida y repetitiva. (Lujan, 2009, p. 123)

“El objetivo de todo sistema de costos es la obtención del costo unitario de un producto o el costo de una orden de trabajo” (Lujan, 2009, p. 55).

Acerca de, costos por procesos, es aplicable en cualquier empresa que brinde servicios sobre trabajos por perforación y voladura de rocas.

a) Costo Unitario

“Para determinar el costo unitario es necesario repartir los costos totales entre todas las unidades trabajadas en el proceso, para lo cual se toma en cuenta la producción del periodo” (Lujan, 2009, p. 128).

“Se calcula un costo unitario (también llamado costo promedio) al dividir algún costo total (el numerador) entre algún número de unidades (el denominador)” (Lazo, 2013, p. 35-36).

De hecho; a través del costo unitario, es posible determinar el gasto operativo diario, mensual o anual del proyecto en cuestión. Además, brinda la información sobre si se ha logrado o no un ahorro con respecto al costo total calculado.

2.2 Marco Conceptual

a) SUPERFAM DOS (ANFO)

Es un agente explosivo granular compuesto con Nitrato de Amonio en prills grado ANFO, un combustible líquido y un colorante (...). Se utiliza principalmente en minería superficial como también en minería subterránea, obras civiles y donde el tipo de roca sea blanda o semidura. (Famesa Explosivos S.A.C, 2016)

b) Emulfan (Emulsión / hidrogel encartuchado)

Es un agente explosivo a base de emulsión explosiva que se encuentra dentro de una envoltura plástica conteniendo sustancias sensibilizadoras y energizantes (...). Ha sido diseñado para trabajar en taladros de diámetros intermedios (diámetros superiores a 2.5” y menores a 3.5”) (...).

Presenta las siguientes ventajas:

- Posee una alta densidad.
- Genera grandes volúmenes y presiones de gases
- Desarrolla un alto nivel de energía por unidad de volumen cuando trabaja con taladros de 2 ½” a 3 1/2” de diámetro.
- Tiene una excelente resistencia al agua y soporta altas presiones hidrostáticas. * Proporciona rendimientos notablemente superiores al ANFO.
- Es seguro frente a estímulos de golpe, fuego y caída. (Famesa Explosivos S.A.C, 2016)

c) Anfo Pesado

Es un agente de voladura de alto nivel de energía con componentes sensibilizantes que le permiten obtener una alta velocidad de detonación y presión de detonación, es seguro, resistente al agua y proporciona una buena calidad de los gases de voladura, que asegura como efecto una mejora en los avances y en los volúmenes de rotura.

Ha sido diseñado para trabajar en diámetros superiores a 4" como carga de columna en taladros inundados o con abundante agua que no es posible evacuar o donde no se puede cargar en forma mecanizada. (Famesa Explosivos S.A.C, 2016)

d) Diámetro de perforación

La selección del diámetro de taladro es crítica considerando que afecta a las especificaciones de los equipos de perforación, carga y acarreo, también al burden, espaciamiento, distribución de la carga explosiva, granulometría de la fragmentación, tiempo a emplear en la perforación y en general a la eficiencia y economía de toda la operación. (EXSA, 2004, p. 168)

e) Altura de banco

“Distancia vertical desde la superficie horizontal superior (cresta) a la inferior (piso)”
(EXSA, 2019, p. 170).

f) Burden

“Distancia entre el barreno y la cara libre” (Bernaola et al., 2013, p. 140).

Con criterios más técnicos se ha propuesto varias fórmulas para el cálculo del burden, que involucran parámetros de la perforación y de la roca, pero todas al final señalan valores entre 25 a 40 \varnothing , dependientes principalmente de la calidad y resistencia de la roca. (EXSA, 2019, p. 171)

Antes; lo primero se hará de forma empírica y después, en la próxima área de perforación, se ajustará mediante lo mencionado por EXSA.

g) Espaciamiento

“Distancia entre dos barrenos adyacentes en la misma fila” (Bernaola et al., 2013, p. 140).

“El mejor es el que forma triángulos equiláteros, ya que es el que proporciona la mejor distribución de la energía del explosivo en la roca... Este esquema produce la mejor fragmentación, con un espaciamiento que va de $S=1,15B$ para barrenos verticales” (López et al., 2003, p. 346).

Sobre, presenciar rocas fracturadas, podemos obtener una idea de la presencia de rocas blandas y su posible espaciamiento en forma cuadrática o triangular. Sin embargo, en nuestro caso, el macizo rocoso también presenta rocas resistentes intermedias. Por lo tanto, es crucial asegurarnos de aplicar un espaciamiento en forma de triángulos equiláteros.

h) Sobreperforación

“También es usual la relación: $SP = 0.3B$, en donde B es el burden” (EXSA, 2019, p. 169).

i) Taco

“Es el material inerte añadido en la cima del pozo de tronadura para efectuar el confinamiento de los gases de la explosión y prevenir una proyección y sobre presión excesiva” (ENAEX, 1994, p. 10).

Si se tiene en cuenta al burden y resistencia de la roca, el taco variara entre $T=0.7B$ para material muy competente, como granito homogéneo, o en radio de taco o burden que puede aproximarse a 1, es decir: $T=B$ para material incompetente con fisuras y fracturas abiertas. (EXSA, 2019, p. 169)

Alrededor de; todos los diseños se elige el tamaño del taco igual al burden, ya que esto se visualiza las fracturas en el macizo rocoso y asegura el confinamiento de la energía de los gases generados por la detonación.

j) Columna explosiva

“Es la parte activa del taladro de voladura, también denominada “longitud de carga” donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes del taladro” (EXSA, 2019, p. 173).

k) Carga Específica

Llamado también consumo específico o factor de carga (powder factor).

Es la cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1m³ o yd³ de roca. Se expresa en kg/m³ o lb/yd³” (EXSA, 2019, p. 174).

$$CE = \frac{\text{total de explosivo utilizado, en kg}}{\text{total de m}^3 \text{ rotos cubicados}} \quad (4)$$

La cantidad de explosivo necesaria para fragmentar 1m³ o 1t de roca es el parámetro conocido por Consumo Especifico CE. De acuerdo con la opinión de numerosos especialistas, este parámetro no constituye la mejor y única herramienta para diseñar las voladuras, a no ser que se refiera a un explosivo patrón o se exprese como consumo energético, fundamentalmente porque la distribución espacial de las cargas de explosivo dentro del macizo rocoso tiene una gran influencia sobre los resultados de las voladuras. (López et al., 2003, p. 352)

Tabla 11

Valores Típicos del Consumo Específico.

TIPO DE ROCA	CONSUMO ESPECIFICO (kg/m ³)
Rocas masivas y resistentes	0,6 – 1,5
Rocas resistencia media	0,30 – 0,6
Rocas muy fracturadas, alteradas o blandas	0,10 – 0,30

Nota: adaptado al Manual de Perforación y Voladura de Rocas, López et al. 2003.

l) Factor de energía

Este término es similar al Factor de carga, pero la energía del explosivo se expresa en relación con el peso o volumen de la roca quebrada (o sea. MJ/m³ o MJ/ton o Kcal/ton). El factor de Energía es por eso el producto de Factor de carga y la energía por peso del explosivo. (ENAEX, 1994, p. 7)

$$Fe = Fc * \frac{\text{Energía}}{1000} \text{ o, } Fe = 0,00912 * Fc * E \quad (5)$$

Donde E = potencia en peso (%), Fc = factor de carga (gr/ton)

Por lo tanto; uno de los propósitos de la presente tesis es determinar de manera cuantitativa el consumo energético generado por las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas con resistencia intermedia. Este consumo será expresado a través del factor de energía donde se utiliza la ecuación 4 en la ecuación 5.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Metodología de Investigación

3.1.1 Tipo de Investigación

Tipo Aplicativo.

3.1.2 Método de Investigación

Método de Observación y Cuasi experimental.

3.1.3 Diseño Investigación

a) Población y Muestra

Población: Voladura realizadas en la construcción de una carretera al sur del país.

Muestra: Protocolos de voladuras en roca fracturada con resistencia intermedia, de una Empresa Contratista que realiza perforación y voladura de rocas en un proyecto minero al sur del país.

b) Variables e Indicadores de la Investigación

Tabla 12*Variables e Indicadores.*

Variable	Descripción	Indicador
X ₁	Geología del proyecto de la carretera	Tipo de roca, adimensional Tipo de discontinuidades, adimensional Resistencia compresiva de la roca (MPa) Estructura del macizo rocoso, adimensional Espaciamiento entre fracturas (fracturas/m) Resistencia de estructuras (MPa)
X ₂	Propiedades del Explosivo	Densidad (g/cm ³) Diámetro del explosivo encartuchado (pulg) Velocidad de detonación (m/s) Potencia y Energía (ANFO=100) Calor de explosión (Kcal/kg)
X ₃	Parámetro de la malla de perforación y voladura de rocas	Altura de banco (m) Diámetro del taladro (m) Burden (m) Espaciamiento (m) Sobreperforación (m) Taco (m) longitud de taladro (m) Altura de carga explosiva (m)
X ₄	Distribución de Energía del Explosivo	Peso (m ³) Factor de Carga (kg/m ³) Factor de Energía (Kcal/ m ³)
Y ₁	Fragmentación de la roca	Fotografía
Y ₂	Equipo de carguío	Capacidad del cucharón (m ³) Producción (m ³ /hr)
Y ₃	Costo por voladura secundaria	Costos Unitarios por voladura secundaria (\$/m ³)

Nota: Elaboración propia.

c) Modelo de Observación

$$Y_i \rightarrow X_i$$

d) Unidad de Observación

Peso (kg), Factor de Carga (kg/m³) y Factor de Energía (Kcal/m³), Fragmentación (fotografía).

e) Diseño Metodológico

$$\text{Muestra} \rightarrow \text{Observación}$$

- f) Técnicas y procedimientos de recolección de datos
- Se cuenta con catálogos de FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C., fabricantes y comercialización de explosivos, para señalar las principales propiedades de los explosivos.
 - El trabajo de campo se lleva *in situ* que consiste en: definir área de perforación y diseñar la malla de perforación; toma de tiempos para: traslado para carga y descarga de material explosivo, desde el polvorín hasta el área de voladura y viceversa; en carguío y atacado de taladros con explosivos, barrido con vigías de voladura, en amarre de los taladros con explosivos; y detonación. Después de verificar la voladura se evalúa visualmente con la supervisión de movimiento de tierra sobre la fragmentación y, además; toma de fotografías del antes, durante y después de la voladura.
 - Para la elaboración de este trabajo se tomó como referencia a la Tesis de Post grado del Mg. Ing. Víctor Ames.
- g) Técnicas, procesamiento y análisis de datos
- La empresa contratista dispone del expediente técnico del proyecto de la carretera que proporciona información sobre la caracterización del macizo rocoso; de modo que se cerciora en campo.
 - El trabajo de gabinete abarca los distintos diseños de voladura y las simulaciones de las mezclas explosivas proporcionadas por la información de campo.
 - Como instrumento, se utilizan los datos de los protocolos de voladuras junto con la ayuda de programadas de computadora y fotografías para visualizar la fragmentación de rocas durante el proceso constructivo de la carretera.
- h) Materiales y Equipos a utilizar
- Los materiales que se utilizaron fueron: reportes de perforación e informes post-voladuras.
 - Los equipos fueron: laptop y cámara fotográfica.

3.2 Antecedentes

3.2.1 Alcance

Para este informe se tiene presente a lo largo de la vía comprendida entre las progresivas Km 0+000 al Km 27+260 del Expediente Técnico “Desvió Moquegua – Desvió Papujune - Mina Quellaveco”, constituida por rocas ígneas y rocas sedimentarias.

Rocas de origen volcánico que en su composición mineralógica predomina el cuarzo dándole una consistencia dura que requiere para su explotación la utilización de explosivos.

3.2.2 Ubicación

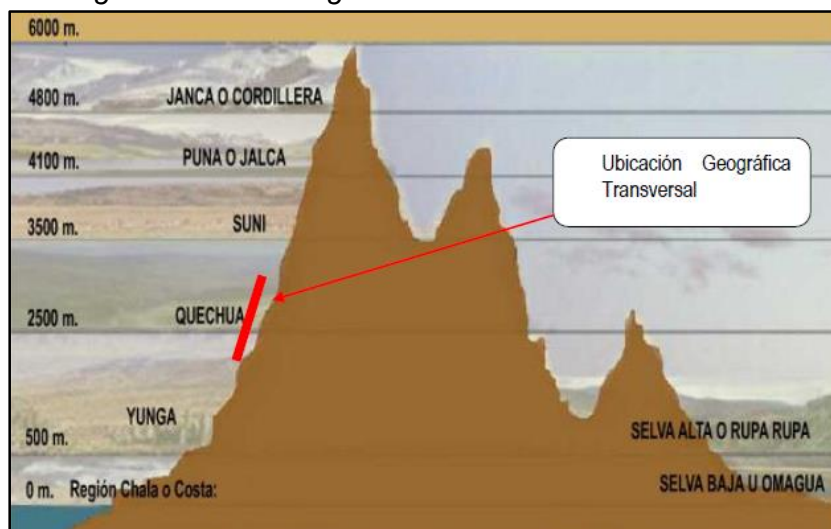
Políticamente el proyecto de la carretera “Desvió Moquegua – Desvió Papujune - Mina Quellaveco”, se encuentra ubicado en:

- Distrito : Mariscal Nieto – Torata
- Provincia : Mariscal Nieto
- Región : Moquegua

El proyecto de desarrollo minero de la mina de cobre de Quellaveco de Anglo American Quellaveco S.A., se localiza en el sector montañoso de la vertiente de la Cordillera Occidental, al noreste de la ciudad de Moquegua en la provincia Mariscal Nieto.

Figura 9

Ubicación en la Regionalización Geográfica Transversal.



Nota: fuente del Expediente Técnico “Desvió Moquegua – Desvió Papujune - Mina Quellaveco.

3.2.3 Coordenada

La ubicación geográfica, geográficamente la zona del proyecto se encuentra ubicada en la cuenca del Océano Pacífico, Sub Cuenca del Río Torata localizándose al Noreste del Distrito de Moquegua, Provincia Mariscal Nieto, Región Moquegua y al Sur del Perú.

Tabla 13

Ubicación Geográfica.

Tramo	Punto del trazo	Kilometraje	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud (msnm)
Tramo I	Inicio (empalme carretera Tramo I)	Km 0+156.2	301859	8113132	2463
Tramo II	Fin Tramo II	Km 27+259.8	302082	8114078	2309 - 3114

Nota: adaptado del Expediente Técnico "Desvió Moquegua – Desvió Papujune - Mina Quellaveco.

3.2.4 Flanco Andino

Es una zona formada por rocas volcánicas y macizos intrusivos con una topografía abrupta y disectada, observándose un notable cambio de pendiente entre la Planicie y el Flanco Andino. Siendo la primera de topografía relativamente suave y la segunda de topografía bastante empinada en la parte baja y frontal.

El Flanco Andino se divide en dos zonas: la zona baja, está próxima a la Planicie costera, su topografía es muy accidentada de pendientes elevadas con altitudes que van de 3,100 a 3400 m.s.n.m. En esta zona se encuentra el sistema de fallas de Incapuquio, la que en cierto modo modificó la topografía tallando depresiones alargadas, con direcciones NNW-SSE. La zona alta, la cual sigue inmediatamente al frente abrupto empinado, es un terreno de superficie moderadamente ondulada y se inclina hacia el SW, en algunos sectores es casi plana, cubierta por tufos volcánicos de la Formación Huaylillas. Probablemente el origen del flanco andino se debe en parte al levantamiento andino que se dio durante el Plioceno-Pleistoceno.

Esta unidad es la parte terminal de la Cordillera Occidental de los Andes. Encontrándose contenida el trazo de la vía. El material de este sector está conformado por rocas ígneas intrusivas.

En términos generales semeja a una ladera disectada por numerosas quebradas mayormente profundas, con cauces angostos, flancos de corto recorrido y fuertes gradientes, dando lugar a una cadena montañosa de rocas volcánicas que datan del cretáceo medio al terciario inferior. Es en esta topografía que se desarrolla el trazo de carretera.

3.2.5 Unidades Litoestratigráficas

Las rocas más antiguas de la zona de estudio corresponden al Jurásico superior, corresponde a la Formación Guaneros. En el Cretáceo Superior a Paleógeno inferior se depositan las rocas volcánico - sedimentarias del Grupo Toquepala, representado por las Formaciones: Volcánico Quellaveco, Volcánico Paralaque, Formación Inogoya, Formación Toquepala; en el Paleógeno - Neógeno (Oligoceno – Mioceno Inferior) se depositan sedimento continentales del Grupo Moquegua, mientras que en el Mioceno medio se tiene a la Formación Huaylillas, y del Plioceno medio a superior a la Formación Millo; y finalmente los depósitos cuaternarios a recientes.

Se han distinguido las siguientes unidades Litoestratigráficas: Formación Guaneros (Js-gu), Grupo Toquepala (KTi-to) Grupo Moquegua (Ts-mo), Formación Huaylillas (Ts-yhu), Formación Milo (Np-mi) y depósitos cuaternarios.

3.3 Geología local

En el área de estudio comprendido en el tramo II de la carretera se encuentran ampliamente distribuidos unidades estratigráficas, así tenemos en el Cretáceo Superior a Paleógeno inferior se depositan rocas volcánicas del Grupo Toquepala, representado por las Formaciones: Formación Quellaveco; en el Paleoceno - Neógeno (Oligoceno – Mioceno Inferior) se depositan sedimentos continentales del Grupo Moquegua Superior; mientras que en el Plioceno media a superior a la Formación Milo; y finalmente los deposito cuaternarios a recientes.

a) Formación Quellaveco

Aflora en las faldas del Cerro Chilca, cerca de la quebrada Papujune, Cerro Cruz Laca. El volcánico Quellaveco se caracteriza por representar una intercalación de

derrames de composición andesítica, riolítica de color gris blanquecino, gris verdoso, con contenido de cuarzo y ortosa. La matriz es silíceo con derrames Riolítica gris rosados algo brechoides intercalados con piroclastos gris rosados, la riolita presenta disyunción columnar.

Por su posición estratigráfica se le asigna una edad Paleoceno del Terciario Inferior.

b) Andesita – Dolerita Carpanto (Ksp – ca/do)

Esta subunidad de la Formación Quellaveco, aflora en el sector de Calientes, a partir del cruce de la quebrada Capillune, quebrada Papujune y hasta la parte final del proyecto (Km 27+259.8). Corresponde una secuencia pseudoestratificada de rocas volcánicas de composición intermedia (andesitas dacitas y doleritas).

Litológicamente se trata de andesitas gris verdosas, de grano fino fanero - afanítica. De acuerdo al análisis macroscópico petrográfico, se observa fenocristales de plagioclasa, presenta una fuerte alteración clorítica, algunas ocasiones borra sus características ópticas. De igual forma los cristales de hornblenda, presentan características subhedrales a anhedrales fuertemente alterados a cloritización. La pasta es un agregado microgranular de cuarzo, vidrio volcánico y máficos.

Geomecanicamente presenta alta a muy alta resistencia en capas gruesas y en condición de roca fracturada y muy fracturada baja su resistencia.

c) Riolita Yarito (KsP – ya/ri)

Esto aflora en la parte intermedia del proyecto, en el Cerro Cruz hasta el cruce de la quebrada Capillune y sobre la margen izquierda de esta quebrada.

De amplia distribución en la zona de estudio, se aprecia afloramientos de roca de composición Riolítica. Su descripción macroscópica y mineralógica es la siguiente: roca de color gris rosácea a verdusca de brillo vítreo, presenta una estructura porfirítica vesicular que es rellenada por vitrófidos y fragmentos líticos, con textura de flama, la cual consiste en un lineamiento de lentes alargados de vidrio que define la foliación de capas paralelas, atribuidas posiblemente a una compactación diagenética de fragmentos de vidrio, mientras

estos estaban aún calientes. Feldespato alcalino (microclina), plagioclasa sódica, biotita, hornblenda, cuarzo (5%), piroxenos y óxidos de hierro.

Por la acción de agentes erosivos presenta una coloración gris parduzca en superficie alterada. Se fractura en bloques medianos. Presenta un rumbo N65E y un buzamiento 35SE.

Geomecanicamente presenta una alta a muy alta resistencia y en condición de roca fracturada a muy fracturada baja su resistencia, es afectada por tres (3) sistemas de discontinuidades.

3.4 Trabajos preliminares

Antes de nada, al realizar un diseño inicial o preliminar no teniendo en cuenta antecedentes previos, como las variables no controlables: propiedades físico-mecánica de la roca, según la resistencia del tipo de roca; geología del proyecto, según la litología y fracturas preexistentes; y, así pues, será muy fácil y se deja casi todo al azar.

Al contar con variables controlables ya establecidas; por ejemplo, cuando se ingresa a laborar, se tendrá que acondicionar con los recursos disponibles.

3.4.1 Equipo de perforación

En primer lugar, en la industria minera o construcción civil se construye una carretera y emplea material explosivo, se tendrá que realizar taladros con equipos de perforación: martillo neumático manual y/o track drills. Este último para aumentar la producción en movimiento de tierras.

Al disponer equipos perforación de superficie con martillo en cabeza y la selección del diámetro de perforación, por ejemplo, modelos Sandvik, se lleva a cabo de manera práctica como en la tabla 14, rango de diámetros de perforación según modelo del equipo y resistencia de la roca:

Tabla 14*Rango de diámetros de perforación.*

Modelo Sandvik	Diámetro recomendable		
DX-500	2.5"	3.0"	3.5"
DX-700	3.0"	3.5"	4.0"
DX-800	3.5"	4.0"	4.5"
Resistencia de la roca	Dura	Semidura	Blanda

Nota: Elaboración Propia.

Después de analizar los resultados de la voladura, se podrá ir ajustando el cambio de diámetro de perforación si los resultados no son los esperados.

3.4.2 Polvorín

En segundo lugar, todo proyecto minero y/o construcción que almacene material explosivo en su concesión deben contar con Licencia de Funcionamiento, como en la tabla 15. Para la presente Tesis se cuenta con tres (3) polvorines tipo Contenedor para el almacenaje de Explosivos y Accesorios y ubicados en la dirección: Pampa Calacaja, Distrito de Torata, Provincia de Mariscal Nieto, Departamento de Moquegua.

Tabla 15*Tipo de Contenedor.*

TIPO_1	TIPO_2	TIPO_3	LARGO	ANCHO	ALTO	ÁREA
Explosivo			5.9	2.34	2.4	13.8
	Accesorio		5.9	2.34	2.4	13.8
		Explosivo	5.9	2.34	2.4	13.8

Nota: adaptado de la Resolución de Gerencia N°00486-2016-SUCAMEC/GEPP.

Además; con la autorización ante la SUCAMEC se realizó la gestión de compras de material explosivo con la Empresa Famesa Explosivo.

De la tabla 16, se lista algunos productos con las siguientes presentaciones:

Tabla 16

Lista de material explosivo utilizado en el proyecto.

Producto	Presentación	Unidades
SUPERFAM DOS	Bolsa de 25	Kg
Emulfan 300S @2.5"x16"	Caja de 16	Pza
Emulfan 300S @3.0"x16"	Caja de 12	Pza
Booster 150g	Caja @ 120	Pza
Dinamita Semigelatina @ 65 1"x8"	Caja @ 208	Pza
Cordón detonante 5P @ 750m	Caja @ 2	Rollo
Fanel Dual @ 15m 17/800MS	Caja @ 50	Pza
Fanel CTD @ 6m	Caja @ 100	Pza
Línea silenciosa de encendido @ 500m	Caja @ 4	Pza

Nota: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 10, es la Resolución de Gerencia por la SUCAMEC quien autoriza para la adquisición y uso de explosivos y materiales relacionados que otorga a favor; en este caso a la empresa contratista:

Figura 10

Resolución de Gerencia por la SUCAMEC.

Nombre	Cantidad	Unidad Medida
EMULSIÓN ENCARTUCHADA	7.369,41	KILOGRAMOS
DETONADOR	155.242,6	UNIDADES
CEBO INICIADOR ESPECIAL	4.630,5	UNIDADES
CORDON DETONANTE	689.615,96	METROS
DETONADOR NO ELECTRICO	262,73	UNIDADES
ANFO	141.291,12	KILOGRAMOS
DINAMITA	28.996,52	KILOGRAMOS
MECHA LENTA	527.824,84	METROS
RETARDO	27.594,04	UNIDADES

Los explosivos y materiales relacionados cuya adquisición y uso se autoriza serán almacenados en los siguientes polvorines / almacenes:

Nro. Resolución	Fecha	Dirección	Dep. / Prov. / Dist.
N°00486-2016-SUCAMEC/GEPP	01/03/2016	PAMPA CALACAJA	MOQUEGUA / MARISCAL NIETO / TORATA

Nota: adaptado de la Resolución de Gerencia N°00486-2016-SUCAMEC/GEPP.

3.4.3 Parámetros iniciales

Por último, del área operativa, la geometría de una voladura de rocas involucra el uso de varios parámetros y su estudio es muy importante debido que tiene gran influencia en los resultados de la voladura. Se menciona los parámetros geométricos de la malla de perforación y voladura de rocas:

a) Diámetro de perforación (\emptyset)

Para empezar, en el proyecto se tiene equipos DX-700 para realizar los taladros y según expediente técnico se tendrá tipos de rocas fracturadas y resistencia dura; lo cual se recomienda como en la tabla 17.

Tabla 17

Diámetro de perforación recomendado.

Tipo de roca	Semidura	Dura
Modelo	Diámetro recomendado	
DX-700	3.5"	3.0"

Nota: Elaboración propia.

b) Malla de perforación (BxE)

A continuación, de la tabla 18, se recomienda las posibles mallas de perforación según resistencia de la roca de manera práctica; siendo la primera estimación la regla nemotécnica, según como vemos en la sexta ecuación:

$$B = 40 * D \leftrightarrow B(\text{metros}) = D(\text{pulgadas}) \quad (6)$$

Tabla 18

Malla de perforación recomendada.

Diámetro de perforación	Resistencia de la roca		
	Dura	Semidura	Blanda
3.0"	2.2x2.5	2.6x3.0	3.0x3.5
3.5"	2.6x3.0	3.0x3.5	3.5x4.0

Nota: Elaboración propia.

c) Sobreperforación (J)

Por un lado, es importante para mantener la rasante del piso. Si esto es corto, generara lomos; pero si es excesiva, habrá sobre excavación con incremento de vibraciones y por ende sobrecostos en la perforación. Según Konya y la Técnica Sueca, $J=0.3B$

d) Taco (T)

Por otro lado, según EXSA, $T=B$, para un material incompetente con fisuras y fracturas abiertas; además se recomienda que el material estéril debe ser gravilla o piedra chancada anguloso de 1 - 2 pulg.

e) Altura de carga explosiva (H_c)

Para terminar, aquí es importante la distribución de explosivo a lo largo del taladro que puede ser continua o segmentada (espaciada, alternada o con cámara de aire) y en este informe se aplicó lo primero y para dos tipos de explosivos.

Asimismo, una información preliminar, se puede constatar mediciones en campo como: tiempos de perforación e inspección *in situ* del macizo rocoso del área de perforación; confirmar o simular otros tipos de diseño. Este último caso, es decir; se encuentra en la misma progresiva o se esté bajando en banquetas.

En definitiva; la tabla 19 es el diseño inicial para un solo explosivo como se ejecutaba las voladuras anteriores, SUPERFAM DOS, con sus respectivos cálculos y resultados:

Tabla 19

Diseño inicial.

Diseño de la malla de perforación y voladura			
Diámetro de perforación	\varnothing	3.0	pulg
Burden	B	2.4	m
Espaciamiento	E	2.8	m
Altura de banco	H_b	10	m
Taco	T	2.4	m
Sobreperforación	S_p	0.7	m
Altura de carga	H_c	8.3	m
Cantidad de explosivo	W	30.4	Kg
Volumen por taladro	V_{tal}	66	m^3
Factor de Carga	FC	0.46	Kg/m^3
Factor de Energía	FE	413	$Kcal/m^3$

Nota: Elaboración propia.

En pocas palabras, los parámetros iniciales, se basó de la información como: roca fracturada, reducción del tiempo de perforación y atascamiento de barra; disminución de la resistencia de la roca, según recomendación geotécnica; y uso de material explosivo como el Anfo a granel, SUPERFAM DOS, que por consiguiente; se obtuvo como resultado la fragmentación de rocas con bolonerías o rocas sobredimensionadas y además; condujo retrasos en el proyecto debido a: disminución del rendimiento en la producción de la excavadora y requerimiento de equipo adicional. Este último, en la figura 11, un tractor

para empuje y acelerar la excavación de material rocoso, y la excavadora para realizar la tarea de carguío y acumular las rocas sobredimensionadas.

Así pues, se genera costos operativos por voladura secundaria de s/.8,201.38/día como se detalla en el anexo N°3; considerando en cada voladura que da origen a rocas sobredimensionadas un máximo del 3% del volumen total; siendo así se podría ahorrar desde un inicio del proyecto el monto de s/. 1'279,415.45, al no producir bolonerías.

Figura 11

Equipo adicional para acelerar la limpieza del área de voladura.



Nota: Elaboración propia.

3.5 Sustitución de explosivo

Así pues; en toda empresa de construcción que realiza las actividades de perforación y voladura de rocas, al ingresar a laborar, cuenta con variables controlables definidas; asimismo con información técnica de los equipos de perforación también se obtuvo información de los catálogos de los fabricantes de explosivos nacionales.

Por lo anterior, se cambió el diseño inicial con otro tipo de explosivo de mayor potencia rompedor, porque al visualizar *in situ* el macizo rocoso continuaba siendo fracturado y asimismo; presentaba alta resistencia. Sin embargo; el expediente técnico y la meteorización no afectó en demasiado al macizo rocoso.

De hecho, en la tabla 19, se llevó a la práctica con la sustitución del explosivo de Anfo a granel, SUPERFAM DOS, a emulsión encartuchada, Emulfan 300S, donde se superpone respectivamente sus características técnicas de la tabla 20:

Tabla 20

Características técnicas de los explosivos.

Explosivos	Densidad	Energía
SUPERFAM DOS	0.80 gr/cm ³	900 kcal/kg
Emulfan 300S	1.24 gr/cm ³	790 kcal/kg

Nota: adaptado del Catálogo de FAMESA EXPLOSIVOS SAC.

De igual manera en la tabla 21, se resume en contrastar los parámetros entre ambos explosivos comerciales utilizados en campo, sin modificar las variables controlables.

Tabla 21

Parámetros de SUPERFAM DOS y Emulfan 300S.

Parámetros		SUPERFAM DOS	Emulfan 300S
Cantidad de explosivo	W	30.4 Kg	32.7 kg
Volumen por taladro	V _{tal}	66 m ³	66 m ³
Factor de Carga	FC	0.46 Kg/m ³	0.49 Kg/m ³
Factor de Energía	FE	413 Kcal/m ³	390 Kcal/m ³

Nota: Elaboración propia.

De este modo, la figura 12 se visualiza todavía rocas sobredimensionadas o bolonerías debido al cambio de explosivo, de Anfo a granel a emulsión encartuchada. Tal vez, en opinión de este autor, la tabla 21 se puede analizar entre ambos explosivos sea normal el aumento tanto el peso del explosivo como del factor de carga; aunque disminuye el factor de energía al sustituir el explosivo inicial. A tener en cuenta que estos son cálculos para un diámetro de perforación de 3,0" y el Emulfan 300S de 2,5".

Figura 12

Bolonerías producto de la voladura con Emulfan 300S.



Nota: Elaboración propia.

3.6 Propuesta y aplicación de la energía de los explosivos

Por lo que se refiere al cambio de explosivo, de granel a encartuchada, se persiste con los problemas de bolonería y al visualizar *in situ* la zona de la voladura anterior; ósea, después del avance de la limpieza se observa una nueva información: roca fracturada y al mismo tiempo, esta presenta alta resistencia en todo el macizo rocoso.

Probablemente; debido a la sustitución del explosivo en la tabla 20 las características técnicas han disminuido la energía, de 900 a 790 kcal/gr, y al presentar la roca una alta resistencia, como la figura 13, por el contrario; se estimaba en aumentar la energía del explosivo.

Después de esto; se propone equilibrar la energía rompedora con la energía de burbuja, en similar uso a los ANFOS's Pesados a granel, mediante proporción de mezclas explosivas comerciales que se dispone en el polvorín.

Figura 13

Macizo rocoso fracturado y con alta resistencia.



Nota: Elaboración propia.

3.6.1 Diseño propuesto

Con respecto; al nuevo diseño para seleccionar y aplicar la proporción de la mezcla explosiva que mejor se adecue a las propiedades del macizo rocoso; es decir, observar desde el punto de vista físico y geológico, siendo primero que influye en la reacción del macizo rocoso con la energía que produce la detonación del explosivo, y segundo donde la voladura produce un cambio litológico brusco que obliga a reconsiderar el diseño tolerando en continuar con dos alternativas: igual diseño de carga explosiva, para los dos tipos de roca y variación de las cargas unitarias; o diseños distintos, pero con igual carga por taladro.

Así pues, del segundo punto, se decidió operativamente el primer diseño donde se replanteo y se evaluó tanto oficina como en campo.

En general, se analizó y se llegó a simular nuevos diseños de cargas explosivas utilizando las mezclas explosivas comerciales que se contaba en el polvorín, en similar proporción a los ANFOs Pesados pero el carguío en forma manual, ósea el SUPERFAM DOS a granel con el Emulfan 300S encartuchada.

Acerca de, la tabla 22 se muestra la cantidad total de energía que produce las mezclas explosivas comerciales, con el mismo diseño de malla de perforación y voladura, pero en relación de 80% y 20% del material explosivo a granel vs encartuchada respectivamente:

Tabla 22

Proporción de la mezcla explosiva comercial, MEC-28.

Proporción MEC-28	SUPERFAM DOS		Emulfan 300S		Total	
Cantidad de Explosivo	24	Kg	7	kg	31	kg
Factor de Energía	330	Kcal/m ³	78	Kcal/m ³	408	Kcal/m ³

Nota: Elaboración propia.

Con relación a, la tabla 23 se resume cantidades totales de energía que produce las diferentes proporciones de las mezclas explosivas comerciales, en similar proporción a los ANFO's Pesados:

Tabla 23

Proporciones de las mezclas explosivas comerciales.

Relación	SUPERFAM DOS		Emulfan 300S		Total	
MEC-37	289	Kcal/m ³	117	Kcal/m ³	406	Kcal/m ³
MEC-46	248	Kcal/m ³	156	Kcal/m ³	404	Kcal/m ³
MEC-55	206	Kcal/m ³	195	Kcal/m ³	401	Kcal/m ³
MEC-64	165	Kcal/m ³	234	Kcal/m ³	399	Kcal/m ³
MEC-73	124	Kcal/m ³	273	Kcal/m ³	397	Kcal/m ³
MEC-82	83	Kcal/m ³	312	Kcal/m ³	394	Kcal/m ³

Nota: Elaboración propia.

A causa de, equilibrar la energía rompedora con la energía de burbuja, se disminuye el material explosivo encartuchado y aumenta el explosivo a granel, conservando el volumen de explosivo en el taladro, por consiguiente; ira elevando el factor de energía de la mezcla explosiva comercial. En consecuencia; se explica que es mejor aplicar mezcla explosiva comercial en vez de la sustitución del explosivo, y como resultado se evidencia en la figura 14, que se utilizó la relación MEC-46.

Por consiguiente; la producción de movimiento de tierras se recuperó con el aumento del rendimiento de la excavadora al obtener buena fragmentación. Ante la mala fragmentación decreció la producción de la excavadora en 42,3% y después, al aplicar la MEC-46, de obtener a la fragmentación deseada, se incrementó al 40%. Del anexo N°2,

Producción de Movimiento de Tierras, se resalta las producciones de la excavadora según la fragmentación de roca obtenida.

Figura 14

Resultado de la fragmentación del nuevo diseño, MEC-46.



Nota: Elaboración propia.

3.6.2 Rediseño de voladura

En relación, con utilizar mezclas explosivas comerciales al diseño propuesto y obteniendo los resultados esperados, fragmentación de roca menores a 1m^3 , y retomar la producción estimada por el área de movimiento de tierras, entonces ¿es posible rediseñar la malla aplicando la energía producida por la mezcla explosiva para aumentar los parámetros de la malla y así recuperar la producción perdida de manera rápida?

En particular, la tabla 24, resume cálculos mediante el rediseño de voladura aplicando la ecuación modificada de su Tesis Magistral, Mg. Ing. Víctor Ames.

Tabla 24

Rediseño de voladura.

Material Explosivo	SUPERFAM DOS	Emulfan 300S	MEC-46
	En uso	A usar	
Burden inicial	2,4 m	-	
RBS	100	131	112,4
Nuevo burden	-	2,63	2,50

Nota: Elaboración propia.

Como resultado, la figura 15, también se visualiza la fragmentación deseada según la proporción de mezcla explosiva comerciales 60% SUPERFAM DOS y 40% Emulfan 300S, MEC-46, efectuando el rediseño de voladura. Ósea; cualquier proporción de la tabla 23 aumenta el burden inicial, pero se eligió el MEC-46 por tema operacional; así pues, se alcanza a disminuir el precio unitario de perforación y voladura en s/.0.62/m³, equivalente a 5,9%. En el anexo N°4, Propuesta Técnica - Económica, se puede analizar además, de este último, los costos de perforación y voladura de los diseños en particular que se realizó.

Figura 15

Resultado de la fragmentación del rediseño de voladura.



Nota: Elaboración propia.

3.7 Resumen de cálculos y resultados

En general, las siguientes figuras son las síntesis de los diversos cálculos obtenidos:

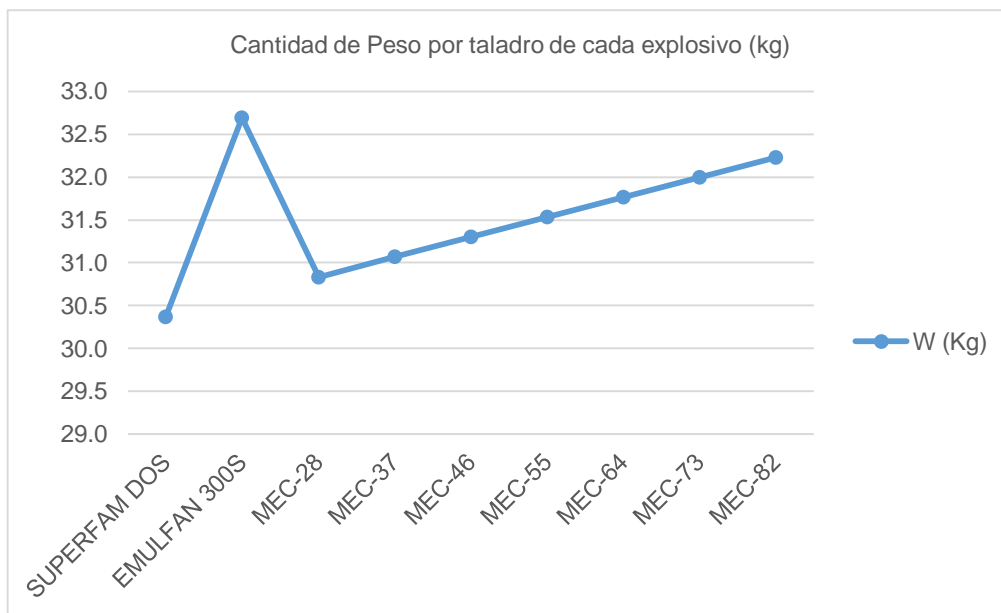
3.7.1 Resumen de cálculos con distintos explosivos

Estos son, tres (03) figuras, donde se resume los cálculos para un taladro de valores de cantidad en: peso, "W", factor de carga, "FC" y factor de energía, "FE"; con explosivos: a granel, SUPERFAM DOS, encartuchada de 2,5" de diámetro, Emulfan 300S y mezclas explosivas comerciales, con ambos explosivos, pero en diferente proporción; para diámetros de 3,0" de perforación.

Sobre la figura 16, se visualiza la cantidad de peso por taladro del SUPERFAM DOS es de menor cantidad que el Emulfan 300S; pero al utilizar mezcla explosiva, cada vez de mayor proporción en emulsión, ira aumentando el peso en el taladro hasta llegar al 100%, del Emulfan 300S.

Figura 16

Cantidad de peso para cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación.



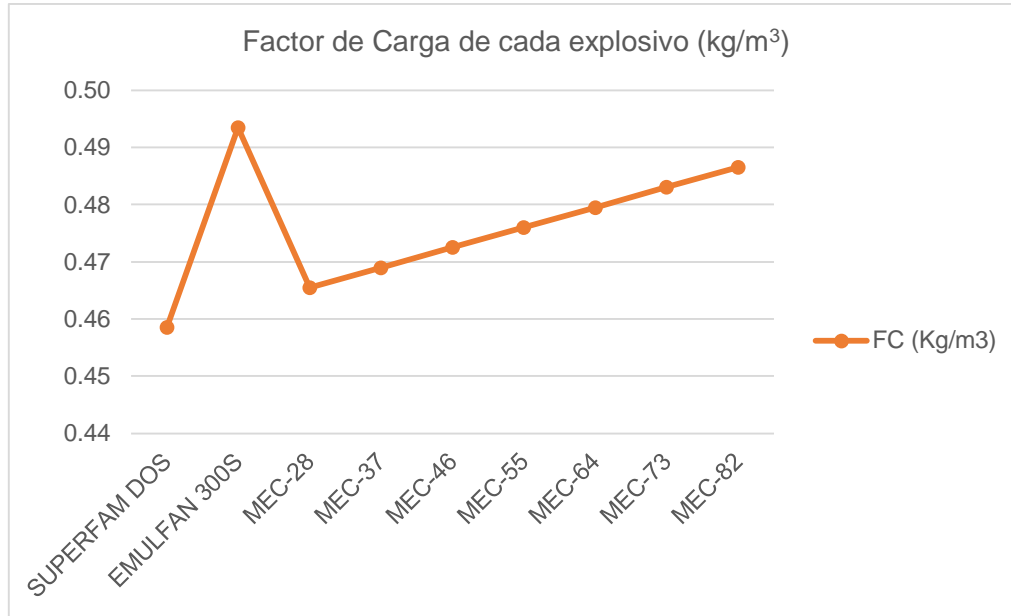
Nota: Elaboración propia.

A la vez; la figura 17 se cumple similar tendencia como la figura 16. El factor de carga del Emulfan 300S es de mayor cantidad que el factor de carga del SUPERFAM DOS,

en un mismo taladro, por contener mayor cantidad de peso e igual ocurre en las diferentes proporciones de mezclas explosivas comerciales.

Figura 17

Factor de carga para cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación.

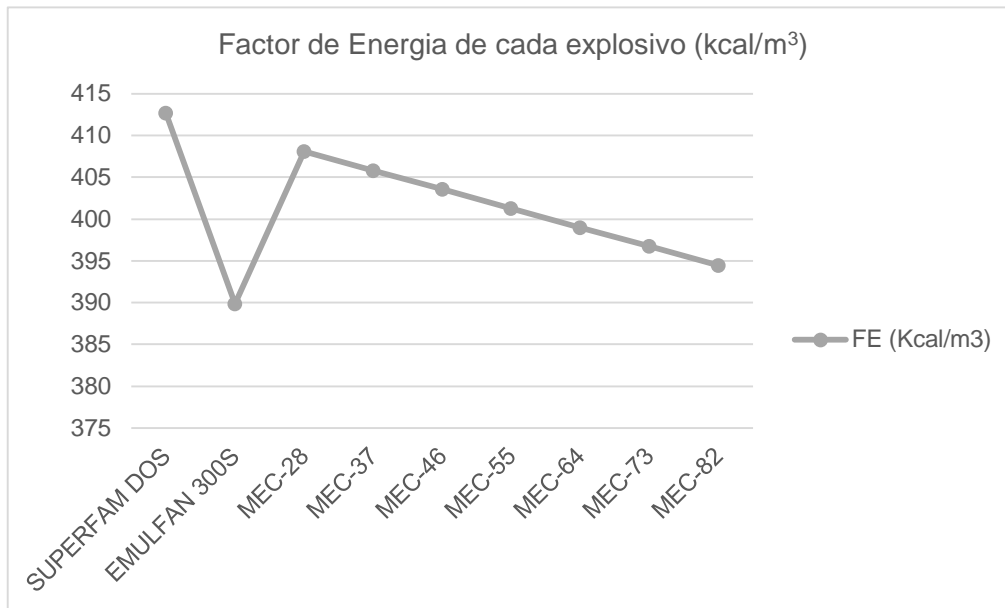


Nota: Elaboración propia.

Por último; la figura 18 muestra una tendencia inversa a las anteriores dos figuras, con el cambio de explosivo de ANFO a granel a emulsión encartuchada y las diversas proporciones de mezcla explosiva, que el factor de energía disminuye significativamente. Conviene subrayar; al disminuir la proporción de emulsión encartuchada, de la mezcla explosiva comercial, entonces aumenta su factor de energía hasta llegar al 0% de Emulfan 300S, conteniendo solo SUPERFAM DOS.

Figura 18

Factor de energía para cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación.



Nota: Elaboración propia.

De hecho, posiblemente es la razón de no obtener los resultados esperados al intercambiar la emulsión encartuchada por el ANFO a granel y, por el contrario; cuando se aplicó la mezcla explosiva comercial, MEC-46, se obtuvo la fragmentación deseada y así se pudo reestablecer la producción de Movimiento de Tierras.

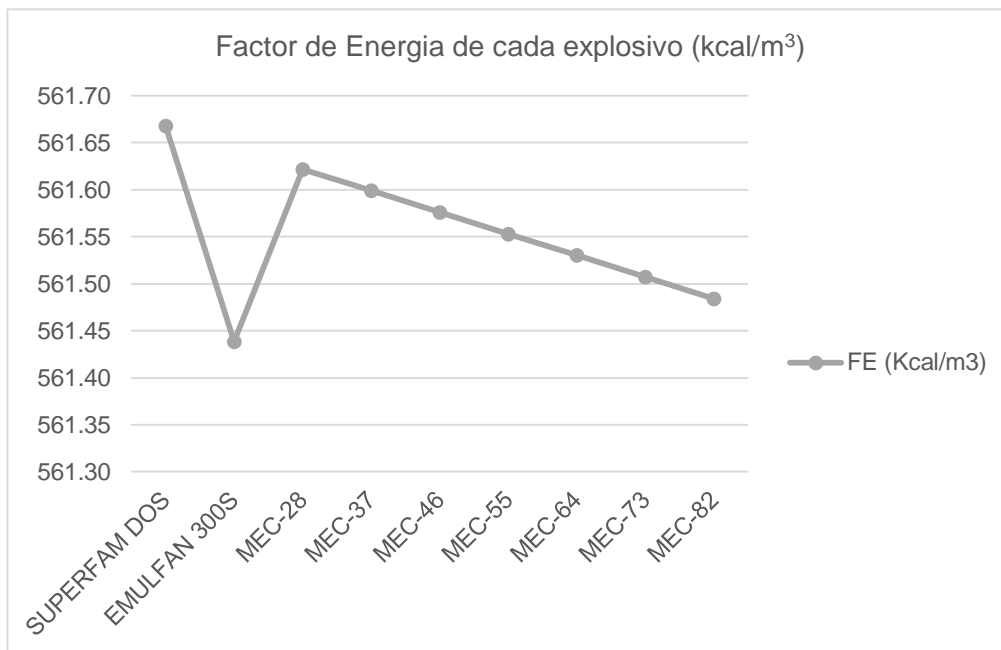
3.7.2 Resumen de cálculos simulados con diferente diámetro de perforación

Por otra parte, se resume en las figuras los resultados obtenidos para las diferentes simulaciones entre 3,5" y 4,0" de diámetros de perforación; pero manteniendo el mismo diseño de carga explosiva con 3,0" de diámetro de perforación, y en forma teórica el valor del factor de energía de: SUPERFAM DOS, Emulfan 300S, y las distintas proporciones de mezclas explosivas comerciales.

Ahora de la figura 19, para un taladro con diámetro de 3,5", se visualiza y se asemeja a la figura 18, pero si aproximamos en dos dígitos se mantendrá casi constante el factor de energía, con un valor aprox. de 561,5 kcal/ m³.

Figura 19

Simulación del factor de energía para cada explosivo con 3,5" de diámetro de perforación.

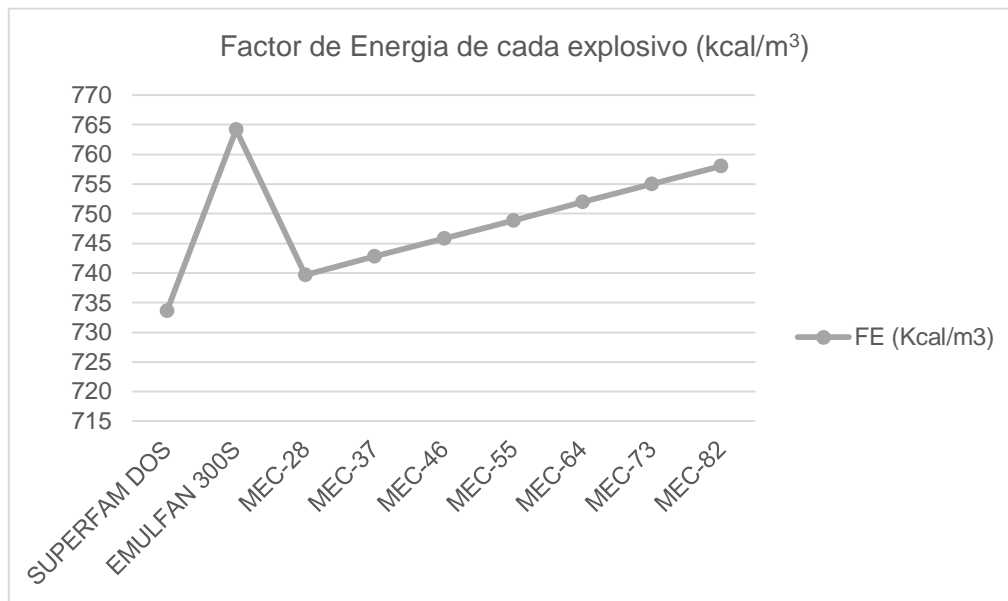


Nota: Elaboración propia.

Después en la figura 20, para un taladro con diámetro de 4,0", se visualiza que es inverso a la figura 18 y en efecto; tenemos conocimiento y se cumple que el factor de energía de una emulsión es mayor que el factor de energía del Anfo, para un mismo volumen en un taladro. De nuevo, para una mezcla explosiva comercial; cuando se disminuye la proporción de emulsión y aumenta la proporción del Anfo, entonces su factor de energía ira disminuyendo.

Figura 20

Simulación del factor de energía para cada explosivo con 4,0" de diámetro de perforación.



Nota: Elaboración propia.

Sea, por un lado, se usa el diámetro con 3,0" de perforación, su factor de energía del SUPERAM DOS es mayor que su factor de energía del Emulfan 300S; y por otro lado se puede decir lo mismo si se emplea un diámetro de 3,5" de perforación. No obstante; si se aplica diámetro de 4,0" de perforación porque el factor de energía del SUPERFAM DOS es menor que el factor de energía del Emulfan 300S. En definitiva; esta última simulación de diferente diámetro se cumple como si se emplearan los ANFO's Pesados a granel.

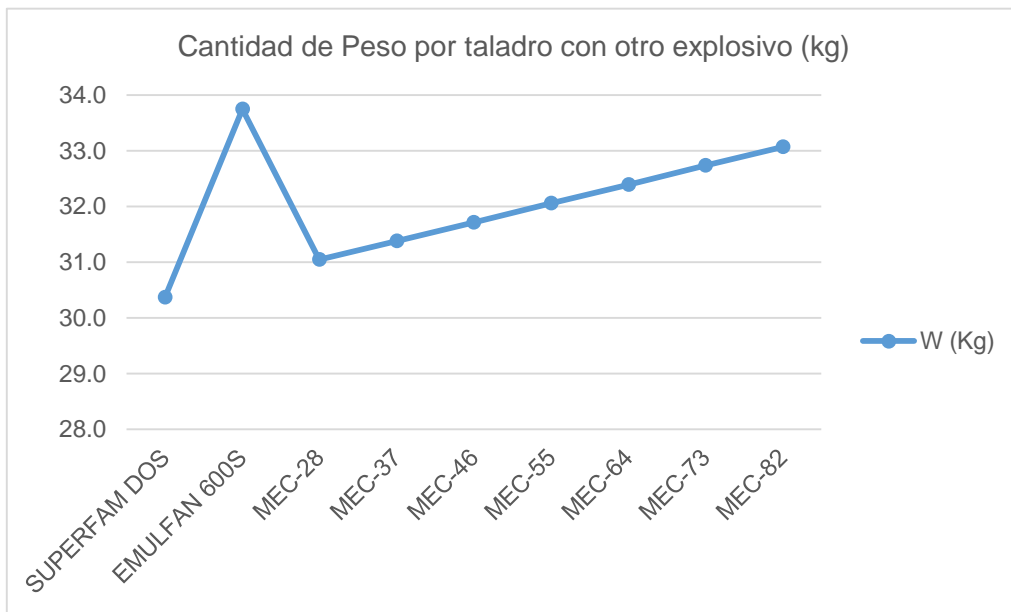
3.7.3 Resumen de cálculos simulando con explosivo de mayor energía

A continuación; se realizaron simulaciones con otro tipo explosivo de mayor energía teórica, Emulfan 600S (980 kcal/kg), de 2,5" de diámetro. En adelante se resume las figuras con los valores de: peso (W), factor de carga (FC) y factor de energía (FE), con los resultados obtenidos de las simulaciones con 3,0", 3,5" y 4,0" de diámetro de perforación; manteniendo el mismo diseño de la malla de perforación y voladura.

Entre tanto; la figura 21 muestra la cantidad de peso por taladro con otro explosivo y de 3,0" de diámetro de perforación. Al utilizar otro explosivo de mayor energía teórica, Emulfan 600S, se verifica que es análogo a la figura 16 y además; resulta en igual similitud la representación de diámetros con 3,5" y 4,0" de perforación.

Figura 21

Simulación de la cantidad de peso por cada explosivo con 3,0" de diámetro de perforación.

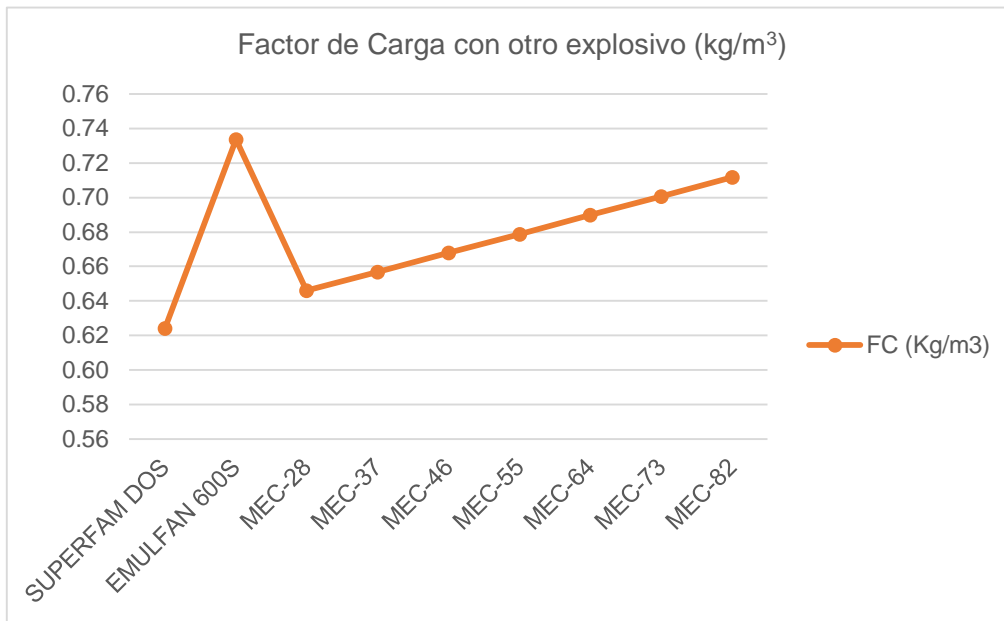


Nota: Elaboración propia.

Ahora con la figura 22, se muestra al factor de carga con otro explosivo y de 3,5" de diámetro de perforación. Al utilizar otro explosivo de mayor energía teórica, Emulfan 600S, se verifica que es análogo a la figura 17 y, además; resulta en igual similitud la representación de diámetros con 3,0" y 4,0" de perforación.

Figura 22

Simulación del factor de carga por cada explosivo con 3,5" de diámetro de perforación.

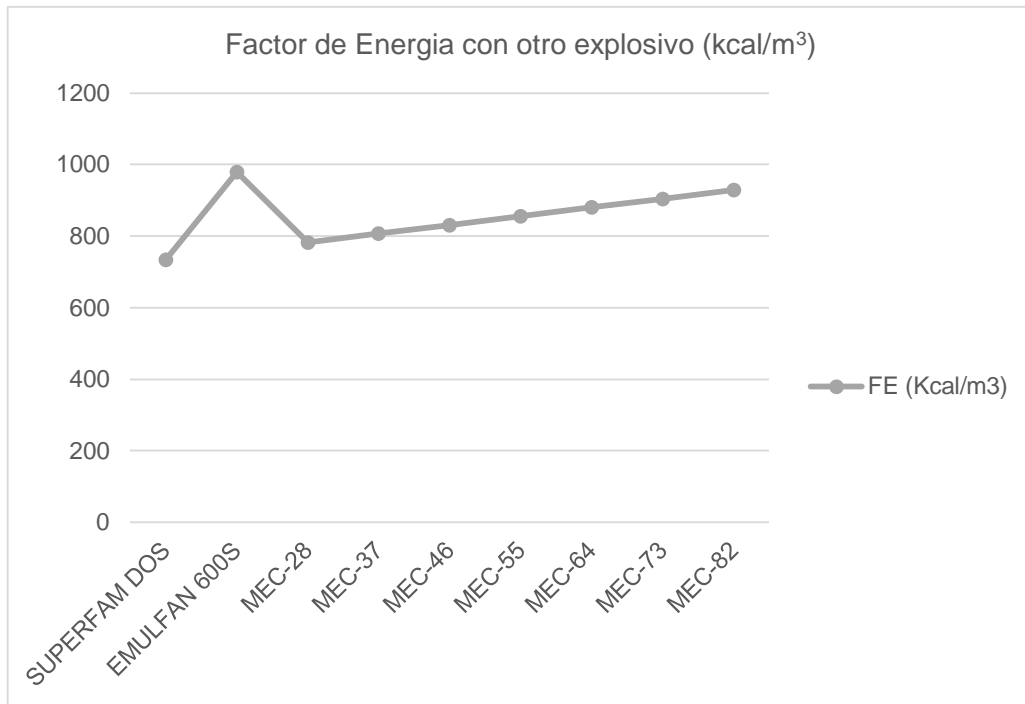


Nota: Elaboración propia.

Luego; de la figura 23 muestra al factor de energía con otro explosivo y de 4,0" de diámetro de perforación. Al utilizar otro explosivo de mayor energía teórica, Emulfan 600S, se constata que está inverso con las figuras 18 y 19 y además, resulta en igual similitud tendencia la representación de diámetros con 3,0" y 3,5" de perforación.

Figura 23

Simulación del factor de energía por cada explosivo con 4,0" de diámetro de perforación.



Nota: Elaboración propia.

Para concluir, se cumple y se demuestra que, si la emulsión encartuchada contiene mayor energía que el Anfo a granel entonces los valores de los parámetros como: cantidad de peso, cantidad de factor de carga y cantidad de factor de energía será siempre el Emulfan 600S mayor que el SUPERFAM DOS; siempre y cuando el diámetro de perforación es mayor e igual a 4,0".

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de resultados

Al realizar voladuras en macizos rocosos fracturados y resistencia intermedia, se ha observado un incremento en el factor de energía al utilizar la mezcla explosiva comercial, MEC-46, en comparación con el empleo exclusivo de un único tipo de explosivo, como la emulsión encartuchada. Esta mejora se aplica específicamente en la misma vía de la carretera en cuestión, ubicada en la progresiva, Pk: 15+560 @ 15+640.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en base al análisis anterior, que incluye la simulación respectiva llevada a cabo en el tramo de la progresiva, Pk. 15+560 @ 15+640. Los factores de energía registrados fueron de 390 Kcal/m³, 403 Kcal/m³ y 402 Kcal/m³ respectivamente. Para esta prueba se utilizó una mezcla explosiva comercial, MEC-46, compuesta por un 60% de emulsión encartuchada y un 40% de ANFO a granel. Los detalles de los resultados se describen en los siguientes anexos: N°5, N°6 y N°7.

4.2 Discusión técnica

Al sustituir un tipo de explosivo por otro, SUPRFAM DOS con Emulfan 300S, debido a que este último contiene mayor factor rompedor; aunque no necesariamente tiene éxito en la reducción de rocas sobredimensionadas en terrenos competentes con tipos de roca fracturada y con resistencia intermedia. En este caso, se está reduciendo el factor de energía en el taladro de 413kcal/m³ a 390kcal/m³ con el cambio respectivo, para un diámetro de perforación de 3,0" y el diámetro de la emulsión encartuchada de 2,5".

Proponer otro cambio de tipo de explosivo, de emulsión encartuchada a una, proporción contradictoria, de mezcla explosiva comercial, con el fin de equilibrar la energía generada por esta última. Esto permitiría reducir la cantidad de bolonerías o rocas sobredimensionadas de dimensiones mayores a 1m³. En efecto, la energía que produce esta mezcla explosiva comercial MEC-46 contiene 404 kcal/m³; lo cual supera la energía

producida por la emulsión encartucha para el mismo diámetro de perforación y diámetro de emulsión encartuchada de 3,0" y 2,5" respectivamente.

En particular, para diámetros de perforación de 3,5" y con cualquier tipo de explosivo: agente de voladura a granel, emulsión encartuchada o ambos en relación de mezcla explosiva comercial; quizás no habrá cambio en el resultado de la fragmentación en voladuras; es decir, los tres tipos de explosivos producen una energía teórica aproximadamente similar, de 561,5kcal/m³, en el mismo taladro.

Por el contrario, para diámetros de perforación con 4,0" y diferente energía teórica superior a la anterior; por ejemplo, aumentando la proporción de la mezcla explosiva comercial, que generalmente siempre produce más energía: 734kcal/m³, para el SUPERFAM DOS; 832kcal/m³, para la MEC-46; y 979kcal/m³, para el Emulfan 600S. Entonces se puede suponer que la cantidad de bolonería o rocas sobredimensionadas se reduce aplicando más energía teórica.

Se aplicó lo mismo que Ames (2008) para aplicar la potencia relativa en volumen (RBS) y así variar rápidamente las dimensiones originales de burden y espaciamiento. Sin embargo; no necesariamente puede usarse deliberadamente sin confinar la cantidad de peso que genera el nuevo tipo de explosivo. De la tabla 24, el burden aumentó de 2,40m utilizando SUPERFAM DOS, a 2,50m, con la nueva mezcla explosiva comercial, MEC-46, que genera más energía a partir del nuevo explosivo que el explosivo en uso. Logrando un resultado similar al reducir la fragmentación de la roca, como se muestra en la figura 15.

Se confirma, según Yaranga (2021), que optimizar la fragmentación mejora el desempeño de los equipos de carguío para una mina en operación y lo mismo ocurre para el área de movimiento de tierras. Con una excavadora Cat-360 y un cucharón de 2,6m³, tiene que producir aproximadamente 235m³/hr de material de voladura. Además; tras la detonación generada por la bolonería utilizando SUPERFAM DOS, su producción se reduce a un 42% aproximadamente; sin embargo, al aplicar mezclas explosivas comerciales, MEC-46, su producción aumenta aproximadamente un 40% con respecto a la fragmentación deseada.

En el caso de voladuras secundarias, al no contar con estructura de costos, se considera un porcentaje máximo del 3% del volumen estimado total para la generación de rocas sobredimensionadas. Si bien existen circunstancias que elevan este porcentaje, cuando el macizo rocoso presente es muy variable con respecto a sus discontinuidades, entonces ocasiona un costo adicional que se ha establecido en s/.71,07/m³. Este es el caso de Cheppe (2021) quien al eliminar la voladura secundaria reduce los costos de las voladuras, de lo contrario utilizarían la voladura de plasteo pero en los proyectos de carreteras se utiliza la perforación neumática manual, razón por la cual el costo es elevado.

4.3 Discusión económica

Sobre, sustituyendo el Emulfan 300S por SUPERFAM DOS, el P.U. incremento en s/.1,95/m³ equivalente a un 20% adicional.

Así, se propuso la MEC-46, que disminuía el P.U. en s/.1,15/m³ equivalente al 11%, en comparación con Emulfan 300S.

Por otro lado; al aplicar el rediseño de la voladura, esta también se disminuyó en s/.0,62/m³ equivalente al 6%, respecto a la MEC-46.

Con respecto a Yaranga (20021) y Cheppe (2021), sobre la mejora en la fragmentación y la eliminación de voladuras secundarias respectivamente, al cumplirse estos resultados en esta investigación no generaría costos operativos adicionales de aproximadamente en s/.8,200.38/día.

4.4 Contrastación de Hipótesis

Para contrastar la hipótesis general, se observa que el cambio de explosivo se tiene una disminución en el factor de carga pero un notable aumento en la generación de energía al utilizar una mezcla explosiva comercial, denominada MEC-46, en comparación con el uso exclusivo de un único tipo de explosivo, denominado Emulfan 300S, durante la construcción en la misma progresiva de una carretera en el sur del país. Este enfoque se aplica específicamente en macizos rocosos fracturados y resistencia intermedia.

Así pues, se realiza el proceso para contrastar la hipótesis siendo que los cálculos se evidencian en el Anexo N°8:

- Establecer la hipótesis nula y alterna:

$H_0: \mu_d = 0$ (La energía generada mediante el uso de la mezcla explosiva comercial, MEC-46, y con emulsión encartuchada son iguales)

$H_a: \mu_d > 0$ (La energía generada a partir de la mezcla explosiva comercial, MEC-46, es superior a la de la emulsión encartuchada)

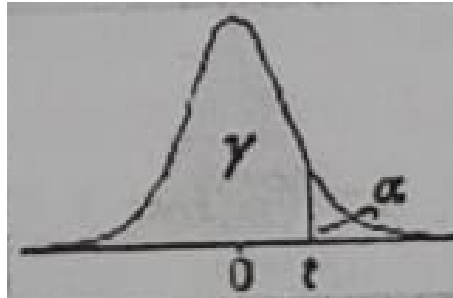
Siendo:

μ_d : Diferencia de las medias ($\mu_{FE_MEC-46} - \mu_{FE_Emulfan300S}$)

- Definir el tipo de prueba y el nivel de probabilidad

Figura 24

Prueba t-Student para dos muestras dependientes.



Nota: adaptado de Probabilidad y estadística para ingeniería, México, 2010.

Prueba de extremo superior; que proporciona la H_a , $\mu_d > 0$

Daremos un nivel de confianza, $\delta = 95\%$; entonces el nivel de probabilidad es de $\alpha = 0.05$

- Calcular el estadístico de prueba:

Figura 25

Estadístico de prueba para muestras dependientes.

$$t = \frac{\bar{x}_d - \mu_d}{\frac{s_d}{\sqrt{n}}}$$

Nota: adaptado de Probabilidad y estadística para ingeniería, México, 2010.

$$t = \frac{13.35 - 0}{\frac{13.057}{\sqrt{60}}} = 7.92$$

- Calcular el valor crítico y establecer la regla de decisión:

Para ello se tiene que, la probabilidad es de 0.05, y su grado de libertad = $n - 1 = 60 - 1 = 59$

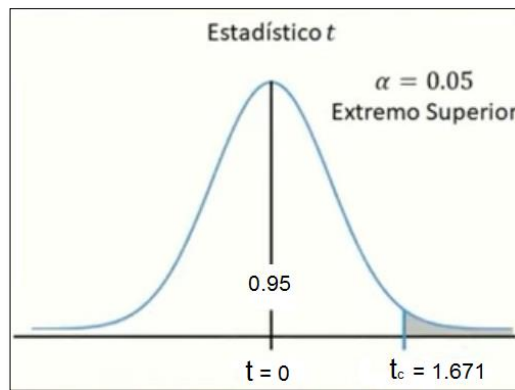
Entonces el valor crítico es: $t_{(\alpha, gl)} = t_{(0.05, 59)} = 1.671$, ver Anexo N°8.

Regla de decisión será, si el valor de t calculado es mayor de $t_c = 1.671$, la hipótesis nula se rechaza.

- Decisión: Aceptación o Rechazo de la H_0 :

Figura 26

Prueba estadístico t de student.



Nota: Elaboración propia

Como el valor de t calculado es mayor al valor de $t_c = 1.671$, la hipótesis nula se rechaza.

Se puede afirmar, con una significancia del 0.05 (5%), que la media de la energía producida después de usar MEC-46 será mayor que la media de la energía producida al usar emulsión encartuchada.

Conclusiones

Definitivamente, sustituir un explosivo en un taladro con mayor potencia relativa en volumen que otro no necesariamente reduce la bolonería en tipos de rocas fracturadas con resistencia intermedia. Esto se puede observar, por ejemplo, en el cambio del uso de ANFO a granel a emulsión encartuchada, para un diámetro de perforación de 3,0" y diámetro del explosivo encartuchado de 2,5".

De hecho, con valores de energía adecuados para las voladuras, se puede reducir la cantidad de rocas sobredimensionadas o bolonerías con dimensiones mayores a 1m³ al emplear mezclas explosivas comerciales. Estas mezclas son capaces de generar la energía necesaria para equilibrar las fuerzas de tensión y gas dentro de los macizos rocosos fracturados con resistencia intermedia. En este caso particular, se utilizó una proporción de 40% Emulfan 300S y 60% de SUPERFAM DOS, simplificada como una mezcla explosiva comercial de MEC-46.

Por otro lado, si es posible incrementar la producción de Movimiento de Tierras en un 40% respecto a la producción estándar al aplicar mezcla explosiva comercial, MEC-46. De hecho, al lograr una buena fragmentación de la roca mediante voladuras, se mejora el rendimiento de la excavadora. Esto se refleja en el factor del cucharón, que pasa de 0,60 a 0,75 o en el factor de eficiencia que aumenta del 67% a 75%.

Sin embargo, si no se aprovecha la energía producida por la mezcla explosiva comercial, MEC-46, hay una alta probabilidad de incurrir en sobre costo operativo diario de s/.8,200.38. Ese gasto se debe a que se utilizarían equipos neumáticos manuales para llevar a cabo la perforación y voladura secundaria, con el objetivo de reducir las rocas sobredimensionadas o bolonería que tienen dimensiones mayores a 1m³.

En relación al uso de la mezcla explosiva comercial, MEC-46, se ha observado que se obtiene una fragmentación de rocas satisfactoria. Por lo tanto, se ha decidido llevar a cabo un rediseño de la malla de perforación, pasando de 2.40mx2.80m a 2.50mx2.90m.

Esta modificación resultó en una reducción del 6.3% en los costos de perforación y voladura, manteniendo la fragmentación de rocas deseada por debajo de 1m^3 .

En resumen, para lograr los resultados esperados en campo, es fundamental aplicar la teoría de la energía producida por mezcla explosiva comercial en macizos rocosos fracturados con resistencia intermedia. Además, es necesario utilizar la cantidad y distribución adecuadas de la carga explosiva para visualizar la fragmentación de roca gruesa menor a 1m^3 después de la detonación.

Por último, hay evidencia estadística con un 5% de significancia, de que usar la mezcla explosiva comercial, MEC-46, produce un mejor resultado en la fragmentación de rocas producto de la detonación para una carretera.

Recomendaciones

En primer lugar, las empresas constructoras encargadas de trabajos de perforación y voladura de rocas deben gestionar la adquisición de programas de software especializados para estas actividades. Por ejemplo: es fundamental contar con sistemas de análisis digital de imágenes como también con programas de simulación de voladuras y monitoreo de vibraciones.

Para empezar, al utilizar una altura de banco de 10m, se recomienda emplear dos iniciadores o booster situados en cada extremo. Esto permitirá producir el máximo de su VOD en las mezclas explosivas comerciales.

Al momento de realizar el carguío y amarre de taladros, con más de un tipo diferente de explosivo, se debe delegar solamente a los manipuladores u operarios de explosivos, pues tienen más conocimiento y experiencia que el resto del personal, como los oficiales y ayudantes.

En el caso de un taladro que contiene un explosivo se puede utilizar como parámetro el factor de carga, debido al peso del explosivo. Sin embargo, en el caso de un taladro que contiene dos o más tipos de explosivos, se sugiere utilizar el factor de energía como el mejor parámetro a tener en cuenta. Esto se debe a que los diferentes explosivos presentan variaciones en su nivel de energías.

Referencias Bibliográficas

- Agreda, C. (1992). *Introducción a la Tecnología de Explosivos*. Lima, Perú.
- Ames, V. (2008). *Diseño de las Mallas de Perforación y Voladura utilizando la energía producida por las mezclas explosivas* [tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Lima, Perú.
- Bernaola, J., Castilla, J., & Herrera, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. Madrid, España.
- Carhuancho, E. (2011). *Optimización de la Fragmentación aplicando valores de energía en voladura al Tajo Vidal, Nivel 4190 Cantera de Calzia Cerro Palo Cemento Andino S.A.* [tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Huancayo, Perú.
- Cheppe Aguirre, J. J. (2021). *"Evaluación técnico-económica de la aplicación del Anfo Pesado Ártico para reducir los índices P80 de fragmentación en el tajo Susan, minera IRL - unidad Corihuarmi"* [tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Cerro de Pasco, Perú.
- Enaex. (1994). *Manual de Tronadura*. Santiago, Chile.
- EXSA. (2019). *Manual Practico de Voladura*. Lima, Perú.
- Famesa Explosivos S.A.C. (2016). <http://www.famesa.com.pe>.
- Lazo Palacios, Merlin (2013). *Contabilidad de los Costos I*. Lima, Perú.
- López, C., López, E., & García, P. (2003). *Manual de Perforación y Voladura de Rocas*. Madrid, España.
- Lujan Albuquerque, Luis (2009). *Contabilidad de Costos*. Lima, Perú.
- Nieves A. & Domínguez F. (2010). *Probabilidad y estadística para ingeniería*. D.F., México.
- Ramirez P. & Alejano L. (2004). *Mecánica de Rocas; Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid, España.
- Solanilla, Jorge (2003). *Gerencia de equipos para obras civiles y minería*. Bogota, Colombia

Yaranga Toribio, R. J. (2021). *"Análisis de la fragmentación del mineral producto de la voladura y su influencia en el rendimiento de equipo de carguío en una mina a tajo abierto, 2021"* [tesis de pregrado, Universidad Continental]. Huancayo, Perú.

Anexos

	Pág.
Anexo 1: Matriz de Consistencia.....	2
Anexo 2: Producción de Movimiento de Tierras	3
Anexo 3: Producción de Movimiento de Tierras	4
Anexo 4: Propuesta técnico- económica	5
Anexo 5: Datos de Protocolo de Voladura	6
Anexo 6: Datos para similar Protocolo de Voladura	7
Anexo 7: Datos de campo para Protocolo de Voladura	8
Anexo 8: Prueba de Hipótesis.....	9

Anexo 1
Matriz de Consistencia

"APLICACIÓN DE LA ENERGIA PRODUCIDA POR LAS MEZCLAS EXPLOSIVAS COMERCIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UNA CARRETERA"

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	Variable Independiente: - Mezcla explosiva comercial. - Macizo rocoso. Dimensión: - Energía del explosivo. - Espaciamento entre fractura con resistencia de estructuras.	* Factor de Energía (kcal/m ³). * Roca muy fracturada y resistencia baja / roca fracturada y resistencia intermedia / poca a muy poca fracturada y resistencia alta.	Tipo de investigación: Investigación Aplicativo.
¿En qué medida inadecuado uso de la energía que produce las mezclas explosivas comerciales sobre el macizo rocoso fracturado y resistencia intermedia en la construcción de una carretera que se hará una fragmentación de rocas con dimensiones mayores a 1m ³ ?	Reducir la fragmentación de rocas con dimensiones menores a 1m ³ aplicando la energía producida por las mezclas explosivas comerciales sobre el macizo rocoso fracturado y resistencia intermedia para la construcción de una carretera.	Si se aplican las mezclas explosivas comerciales sobre el macizo rocoso fracturado y resistencia intermedia, entonces se obtendrá favorablemente una fragmentación de rocas con dimensiones menores a 1m ³ para la construcción de una carretera.			Nivel de investigación: Nivel Aplicativo.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	Variable Dependiente: - Detonación para una construcción Dimensión: - Fragmentación de la roca. - Producción de movimiento de tierras. - Costos operativos por voladura secundaria.	* Fotografías después de la detonación. * Factor de llenado del cucharón (seg) y factor de eficiencia de trabajo (%) de la excavadora. * Precio unitario por voladuras secundarias (\$/m ³).	Metodo de investigación: Observación y Cuasi experimental.
¿De qué manera influye la producción de movimiento de tierras al usar mezclas explosivas comerciales sobre las rocas fracturadas y resistencia intermedia para la construcción de una carretera?	Verificar el aumento del rendimiento de la excavadora usando un correcto confinamiento de la energía que produce las mezclas explosivas comerciales sobre las rocas fracturadas y resistencia intermedia, con el fin de acelerar la construcción de una carretera.	Si se usan las mezclas explosivas comerciales sobre las rocas fracturadas y resistencia intermedia, en tal caso influirá ventajosamente en la mejora del rendimiento de la excavadora para la construcción de una carretera.			Población: Voladuras realizadas en la construcción de una carretera al sur del país.
¿Qué efecto genera el sobre costo operativo por voladura secundaria al no considerar las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas y resistencia intermedia para la construcción de una carretera?	Evaluar el precio unitario por voladura secundaria considerando la energía producida por las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas y resistencia intermedia para la construcción de una carretera.	Si se consideran las mezclas explosivas comerciales en rocas fracturadas y resistencia intermedia, por ende impactará positivamente en la estructura de costos para la construcción de una carretera.			Muestra: Protocolos de voladuras en roca fracturadas con resistencia intermedia en un proyecto minero al sur del país.

Anexo 2

Producción de Movimiento de Tierras

"Producción de la excavadora"

Área mínima para voladura

Banqueta	10.0 m
Ancho	8.0 m
Largo	12.5 m

Información teórica

Factor de Eficiencia	
Favorable	0.83
Promedio	0.75
Moderada	0.67
Deficiente	0.58

Estado de material a trabajar		
Estado inicial	En banco	Suelto
Banco	1.00	1.80
Suelto	0.56	1.00

Disponibilidad mecánico	0.90
Eficiencia de trabajo	0.83

Factor del cucharón	0.75	Roca bien fragmentada por voladura
	0.60	Roca fragmentada por voladura
	0.40	Roca mal fragmentada por voladura

Producción estándar	600 m ³ /hr
---------------------	------------------------

Programación de trabajos de movimiento de tierras

Volumen en banco	1000.0 m ³ /turno
Tiempo de trabajo	10.0 hrs/turno
Cantidad de turnos	2.0 turno/día

Datos de campo

Capacidad de cucharón	2.6 m ³ /pase
Tiempo de ciclo estándar	16 seg/pase

Cálculos y resultados

Volumen suelto	3600 m ³ /día
Tiempo efectivo	7.5 hrs/turno

CASO I - Fragmentación deseada

Producción	235 m ³ /hr
	3513 m ³ /día

CASO II - Mala fragmentación

Producción	136 m ³ /hr
	2028 m ³ /día

CASO III - Buena fragmentación

Producción	329 m ³ /hr
	4916 m ³ /día

Anexo 3

Costo operativo por voladura secundaria

"Costo unitario con perforación neumática manual"

Proyección estimada

Volumen estimado	18000.00 m ³
Tiempo estimado	6 meses

Programación de trabajos de perforación neumática manual

Producción mensual	3000.00 m ³ /mes
Días al mes	26 días
Producción diaria	115 m ³ /día

Diseño de perforación y voladura secundaria

Diseño de Perforación		
Diámetro	Plg	1.50
Banco	m	1.50
Burden	m	0.50
Espaciamiento	m	0.50
Profundidad	m	1.00
Volumen de taladro	m ³ /tal	0.38

Diseño de Carga explosiva		
Densidad de explosivo	gr/cm ³	1.14
Longitud de perforación	m/tal	1.00
Taco	m/tal	0.50
Dinamita	pza/tal	2.50
	Kg/tal	0.27
Cordón detonante 5P	m/tal	2.70

Costo unitario con perforación neumática manual

Mano de obra	S/ 14.33 /m ³
Equipos	S/ 9.68 /m ³
Hidrocarburos	S/ 1.93 /m ³
Material explosivo	S/ 5.31 /m ³
Aceros	S/ 39.82 /m ³
P.U.	S/ 71.07 /m ³

Costos operativo por voladura secundaria

Costo diario	S/ 8,200.38 /día
Costo mensual	S/ 213,210.00 /mes
Ahorro	S/ 1,279,260.00

Anexo 4

Propuesta técnico- económica

"Aplicando Rediseño de voladura"

Propuesta de voladura de rocas para carretera

Volumen estimado	600000 m ³
Tiempo estimado	6 meses

Programación de trabajos de perforación y voladura de rocas

Producción mensual	100000 m ³ /mes
Días @ mes	26 días/mes
Producción diaria	3846 m ³ /día
Cantidad de turno	1 turno/día

Diseño de Perforación

Parámetros	Und	Inicial	Rediseño
Diámetro	Plg	3.0	3.0
Burden	m	2.4	2.5
Espaciamiento	m	2.8	2.9
Banco	m	10.0	10.0
Sobreperforación	m	0.7	0.7
Profundidad	m	10.7	10.7
Volumen de taladro	m ³ /tal	67.2	72.5

Diseño de Carga explosiva

Incidencia	Und	Dinamita & ANFO	Emulnor & Emulfan 300S	Emulnor & MEC-46
Dinamita	kg/m ³	0.0107		
Emulnor	kg/m ³		0.0098	0.0098
ANFO	kg/m ³	0.2452		0.1313
Emulfan 300S	kg/m ³		0.2558	0.1145
Booster	Pza/m ³	0.0179	0.0179	0.0179
Cordón detonante 5P	m/m ³	0.7380	0.0635	0.0738
Fanel Dual	Pza/m ³	0.0082	0.0082	0.0082
Fanel CTD	Pza/m ³	0.0050	0.0050	0.0050
Línea silenciosa	rollo/m ³	0.0010	0.0010	0.0010

Costo de Perforación y Voladura

Descripción	Diseños			
	Inicial	Sustitución	MEC-46	Rediseño
Mano de obra	S/ 0.43 /m ³	S/ 0.43 /m ³	S/ 0.43 /m ³	S/ 0.40 /m ³
Equipos	S/ 4.04 /m ³	S/ 4.04 /m ³	S/ 4.04 /m ³	S/ 3.72 /m ³
Hidrocarburos	S/ 0.38 /m ³	S/ 0.38 /m ³	S/ 0.38 /m ³	S/ 0.35 /m ³
Material explosivo	S/ 2.10 /m ³	S/ 4.05 /m ³	S/ 2.90 /m ³	S/ 2.88 /m ³
Aceros	S/ 2.74 /m ³	S/ 2.74 /m ³	S/ 2.74 /m ³	S/ 2.52 /m ³
Precio unitario	S/ 9.69 /m ³	S/ 11.64 /m ³	S/ 10.49 /m ³	S/ 9.87 /m ³

Anexo 5

Datos de Protocolo de Voladura

"Con un tipo de explosivo - Emulsion encartuchada"

Diseño de perforación y voladura

Diámetro	3 pulg
Burden	2.4 m
Espaciamiento	2.8 m
Altura de Banco	10 m
Sobreperforación	0.7 m
Taco	2.4 m
Altura de carga explosiva	8.3 m
Explosivo	Emulfan_300S

Cálculos

Volumen por taladro	66.2 m ³ /tal
Cantidad de explosivo	32.7 kg/tal
Facto de Carga	0.49 kg/m ³
Factor de Energía	390 Kcal/m ³

Promedio

Altura de banco	10.2 m
Altura de carga explosiva	8.5 m
Cantidad de explosivo	33.4 kg/tal
Facto de Carga	0.49 kg/m ³
Factor de Energía	390 Kcal/m ³

Desviación Estándar

Altura de banco	1.3 m
Altura de carga explosiva	1.3 m
Cantidad de explosivo	5.1 kg/tal
Factor de Carga	0.01 kg/m ³
Factor de Energía	10 Kcal/m ³

Taladro	Hb	Hc	W	FC	FE
T_1	8.1	6.4	25	0.47	371
T_2	10.1	8.4	33	0.49	391
T_3	9.2	7.5	30	0.48	383
T_4	11.0	9.3	37	0.50	397
T_5	11.8	10.1	40	0.51	402
T_6	10.2	8.5	33	0.50	391
T_7	9.9	8.2	32	0.49	389
T_8	11.7	10.0	39	0.51	401
T_9	11.4	9.7	38	0.51	400
T_10	8.6	6.9	27	0.48	377
T_11	9.7	8.0	32	0.49	387
T_12	10.6	8.9	35	0.50	394
T_13	8.9	7.2	28	0.48	380
T_14	9.0	7.3	29	0.48	381
T_15	11.7	10.0	39	0.51	401
T_16	9.0	7.3	29	0.48	381
T_17	11.1	9.4	37	0.50	398
T_18	11.7	10.0	39	0.51	401
T_19	9.3	7.6	30	0.49	384
T_20	9.3	7.6	30	0.49	384
T_21	10.1	8.4	33	0.49	391
T_22	10.7	9.0	35	0.50	395
T_23	9.2	7.5	30	0.48	383
T_24	9.0	7.3	29	0.48	381
T_25	9.2	7.5	30	0.48	383
T_26	11.7	10.0	39	0.51	401
T_27	8.3	6.6	26	0.47	374
T_28	8.2	6.5	26	0.47	373
T_29	9.7	8.0	32	0.49	387
T_30	10.5	8.8	35	0.50	394
T_31	8.8	7.1	28	0.48	379
T_32	11.5	9.8	39	0.51	400
T_33	8.1	6.4	25	0.47	371
T_34	11.0	9.3	37	0.50	397
T_35	8.6	6.9	27	0.48	377
T_36	10.6	8.9	35	0.50	394
T_37	10.5	8.8	35	0.50	394
T_38	9.4	7.7	30	0.49	385
T_39	8.8	7.1	28	0.48	379
T_40	11.6	9.9	39	0.51	401
T_41	9.4	7.7	30	0.49	385
T_42	10.6	8.9	35	0.50	394
T_43	10.0	8.3	33	0.49	390
T_44	10.0	8.3	33	0.49	390
T_45	8.5	6.8	27	0.48	376
T_46	11.8	10.1	40	0.51	402
T_47	8.3	6.6	26	0.47	374
T_48	11.3	9.6	38	0.50	399
T_49	11.9	10.2	40	0.51	402
T_50	8.5	6.8	27	0.48	376
T_51	8.1	6.4	25	0.47	371
T_52	11.0	9.3	37	0.50	397
T_53	11.9	10.2	40	0.51	402
T_54	9.3	7.6	30	0.49	384
T_55	11.1	9.4	37	0.50	398
T_56	11.7	10.0	39	0.51	401
T_57	11.1	9.4	37	0.50	398
T_58	10.7	9.0	35	0.50	395
T_59	9.5	7.8	31	0.49	386
T_60	11.8	10.1	40	0.51	402
Promedio	10.2	8.5	33.4	0.49	390

Anexo 6

Datos para similar Protocolo de Voladura

*Con dos tipos de explosivos MEC_46 (Emulsion encartuchada y ANFO a granel)

Diseño de perforación y voladura	
Diámetro	3 pulg
Burden	2.4 m
Espaciamiento	2.8 m
Altura de Banco	10 m
Sobreperforación	0.7 m
Taco	2.4 m
Altura de carga explosiva	8.3 m
Hc_Superfam_DOS	5.0 m
Hc_Emulfan_300S	3.3 m

Cálculos	
Volumen por taladro	66.2 m ³ /tal
Cantidad_ANFO	18 kg/tal
Cantidad_Emulsión	13 kg/tal
FC_ANFO	0.28 kg/m ³
FC_Emulsión	0.20 kg/m ³
FE_ANFO	248 Kcal/m ³
FE_Emulsión	156 Kcal/m ³
FE_MEC-46	404 Kcal/m ³

Promedio	
Altura de banco	10.1 m
Altura de carga explosiva	8.4 m
Cantidad de explosivo	31.6 kg/tal
Facto de Carga	0.47 kg/m ³
Factor de Energía	403 Kcal/m ³

Desviación Estandar	
Altura de banco	1.2 m
Altura de carga explosiva	1.2 m
Cantidad de explosivo	4.6 kg/tal
Factor de Carga	0.01 kg/m ³
Factor de Energía	10.2 Kcal/m ³

Taladro	Hb	Hc	W_ANFO	W_Emulsión	W_total	FC_ANFO	FC_Emulsión	FC_total	FE_ANFO	FE_Emulsión	FE_MEC-46
T_1	8.1	6.4	14	10	24	0.26	0.19	0.45	236	149	384
T_2	10.1	8.4	18	13	32	0.28	0.20	0.47	248	156	404
T_3	9.2	7.5	16	12	28	0.27	0.19	0.46	243	153	396
T_4	11.0	9.3	20	15	35	0.28	0.20	0.48	252	159	411
T_5	11.8	10.1	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	416
T_6	10.2	8.5	19	13	32	0.28	0.20	0.47	249	157	405
T_7	9.9	8.2	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	156	403
T_8	11.7	10.0	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	415
T_9	11.4	9.7	21	15	37	0.28	0.20	0.48	254	160	414
T_10	8.6	6.9	15	11	26	0.27	0.19	0.46	239	151	390
T_11	9.7	8.0	18	13	30	0.27	0.20	0.47	246	155	401
T_12	10.6	8.9	20	14	34	0.28	0.20	0.48	250	158	408
T_13	8.9	7.2	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	393
T_14	9.0	7.3	16	12	28	0.27	0.19	0.46	242	152	394
T_15	11.7	10.0	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	415
T_16	9.0	7.3	16	12	28	0.27	0.19	0.46	242	152	394
T_17	11.1	9.4	21	15	35	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_18	11.7	10.0	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	415
T_19	9.3	7.6	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	397
T_20	9.3	7.6	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	397
T_21	10.1	8.4	18	13	32	0.28	0.20	0.47	248	156	404
T_22	10.7	9.0	20	14	34	0.28	0.20	0.48	251	158	409
T_23	9.2	7.5	16	12	28	0.27	0.19	0.46	243	153	396
T_24	9.0	7.3	16	12	28	0.27	0.19	0.46	242	152	394
T_25	9.2	7.5	16	12	28	0.27	0.19	0.46	243	153	396
T_26	11.7	10.0	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	415
T_27	8.3	6.6	14	10	25	0.26	0.19	0.45	237	150	387
T_28	8.2	6.5	14	10	25	0.26	0.19	0.45	237	149	386
T_29	9.7	8.0	18	13	30	0.27	0.20	0.47	246	155	401
T_30	10.5	8.8	19	14	33	0.28	0.20	0.48	250	157	407
T_31	8.8	7.1	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	392
T_32	11.5	9.8	22	15	37	0.28	0.20	0.48	254	160	414
T_33	8.1	6.4	14	10	24	0.26	0.19	0.45	236	149	384
T_34	11	9.3	20	15	35	0.28	0.20	0.48	252	159	411
T_35	8.6	6.9	15	11	26	0.27	0.19	0.46	239	151	390
T_36	10.6	8.9	20	14	34	0.28	0.20	0.48	250	158	408
T_37	10.5	8.8	19	14	33	0.28	0.20	0.48	250	157	407
T_38	9.4	7.7	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	398
T_39	8.8	7.1	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	392
T_40	11.6	9.9	22	16	37	0.28	0.20	0.49	254	160	415
T_41	9.4	7.7	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	398
T_42	10.6	8.9	20	14	34	0.28	0.20	0.48	250	158	408
T_43	10	8.3	18	13	31	0.28	0.20	0.47	248	156	404
T_44	10	8.3	18	13	31	0.28	0.20	0.47	248	156	404
T_45	8.5	6.8	15	11	26	0.27	0.19	0.46	239	150	389
T_46	11.8	10.1	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	416
T_47	8.3	6.6	14	10	25	0.26	0.19	0.45	237	150	387
T_48	11.3	9.6	21	15	36	0.28	0.20	0.48	253	160	413
T_49	11.9	10.2	22	16	38	0.28	0.20	0.49	256	161	417
T_50	8.5	6.8	15	11	26	0.27	0.19	0.46	239	150	389
T_51	8.1	6.4	14	10	24	0.26	0.19	0.45	236	149	384
T_52	11	9.3	20	15	35	0.28	0.20	0.48	252	159	411
T_53	11.9	10.2	22	16	38	0.28	0.20	0.49	256	161	417
T_54	9.3	7.6	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	397
T_55	11.1	9.4	21	15	35	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_56	11.7	10.0	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	415
T_57	11.1	9.4	21	15	35	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_58	10.7	9.0	20	14	34	0.28	0.20	0.48	251	158	409
T_59	9.5	7.8	17	12	29	0.27	0.20	0.47	245	154	399
T_60	11.8	10.1	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	416
Promedio	10.1	8.4	18	13	32	0.27	0.20	0.47	247	156	403

Anexo 7

Datos de campo para Protocolo de Voladura

*Con dos tipos de explosivos MEC_46 (Emulsion encartuchada y ANFO a granel)

Diseño de perforacion y voladura	
Diámetro	3 pulg
Burden	2.4 m
Espaciamiento	2.8 m
Altura de Banco	10 m
Sobreperforación	0.7 m
Taco	2.4 m
Altura de carga explosiva	8.3 m
Hc_Superfam_DOS	5.0 m
Hc_Emulfan_300S	3.3 m

Calculos	
Volumen por taladro	66.2 m3/tal
Cantidad_ANFO	18 kg/tal
Cantidad_Emulsión	13 kg/tal
FC_ANFO	0.28 kg/m ³
FC_Emulsión	0.20 kg/m ³
FE_ANFO	248 Kcal/m ³
FE_Emulsión	156 Kcal/m ³
FE_MEC-46	404 Kcal/m ³

Promedio	
Altura de banco	10.0 m
Altura de carga explosiva	8.3 m
Cantidad de explosivo	31.2 kg/tal
Facto de Carga	0.47 kg/m ³
Factor de Energía	402 Kcal/m ³

Desviación Estandar	
Altura de banco	1.1 m
Altura de carga explosiva	1.1 m
Cantidad de explosivo	4.2 kg/tal
Factor de Carga	0.01 kg/m ³
Factor de Energía	9.3 Kcal/m ³

Taladro	Hb	Hc	W_ANFO	W_Emulsión	W_total	FC_ANFO	FC_Emulsión	FC_total	FE_ANFO	FE_Emulsión	FE_MEC-46
T_1	10.3	8.6	19	14	32	0.28	0.20	0.48	249	157	406
T_2	11.9	10.2	22	16	38	0.28	0.20	0.49	256	161	417
T_3	10.5	8.8	19	14	33	0.28	0.20	0.48	250	157	407
T_4	10.3	8.6	19	14	32	0.28	0.20	0.48	249	157	406
T_5	11.2	9.5	21	15	36	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_6	10.0	8.3	18	13	31	0.28	0.20	0.47	248	156	404
T_7	11.7	10.0	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	415
T_8	9.0	7.3	16	12	28	0.27	0.19	0.46	242	152	394
T_9	8.3	6.6	14	10	25	0.26	0.19	0.45	237	150	387
T_10	8.4	6.7	15	11	25	0.26	0.19	0.45	238	150	388
T_11	9.7	8.0	18	13	30	0.27	0.20	0.47	246	155	401
T_12	9.3	7.6	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	397
T_13	8.1	6.4	14	10	24	0.26	0.19	0.45	236	149	384
T_14	11.2	9.5	21	15	36	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_15	11.8	10.1	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	416
T_16	8.8	7.1	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	392
T_17	8.4	6.7	15	11	25	0.26	0.19	0.45	238	150	388
T_18	8.9	7.2	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	393
T_19	11.1	9.4	21	15	35	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_20	8.5	6.8	15	11	26	0.27	0.19	0.46	239	150	389
T_21	9.8	8.1	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	155	402
T_22	9.2	7.5	16	12	28	0.27	0.19	0.46	243	153	396
T_23	10.9	9.2	20	14	35	0.28	0.20	0.48	252	159	410
T_24	11.9	10.2	22	16	38	0.28	0.20	0.49	256	161	417
T_25	11.2	9.5	21	15	36	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_26	10.9	9.2	20	14	35	0.28	0.20	0.48	252	159	410
T_27	10.3	8.6	19	14	32	0.28	0.20	0.48	249	157	406
T_28	8.2	6.5	14	10	25	0.26	0.19	0.45	237	149	386
T_29	9.0	7.3	16	12	28	0.27	0.19	0.46	242	152	394
T_30	8.9	7.2	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	393
T_31	10.8	9.1	20	14	34	0.28	0.20	0.48	251	158	410
T_32	8.9	7.2	16	11	27	0.27	0.19	0.46	241	152	393
T_33	9.6	7.9	17	12	30	0.27	0.20	0.47	246	155	400
T_34	9.6	7.9	17	12	30	0.27	0.20	0.47	246	155	400
T_35	10.7	9.0	20	14	34	0.28	0.20	0.48	251	158	409
T_36	9.4	7.7	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	398
T_37	10.8	9.1	20	14	34	0.28	0.20	0.48	251	158	410
T_38	9.9	8.2	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	156	403
T_39	11.3	9.6	21	15	36	0.28	0.20	0.48	253	160	413
T_40	10.5	8.8	19	14	33	0.28	0.20	0.48	250	157	407
T_41	9.0	7.3	16	12	28	0.27	0.19	0.46	242	152	394
T_42	10.8	9.1	20	14	34	0.28	0.20	0.48	251	158	410
T_43	8.6	6.9	15	11	26	0.27	0.19	0.46	239	151	390
T_44	9.4	7.7	17	12	29	0.27	0.19	0.47	244	154	398
T_45	8.2	6.5	14	10	25	0.26	0.19	0.45	237	149	386
T_46	9.8	8.1	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	155	402
T_47	11.1	9.4	21	15	35	0.28	0.20	0.48	253	159	412
T_48	11.4	9.7	21	15	37	0.28	0.20	0.48	254	160	414
T_49	10.3	8.6	19	14	32	0.28	0.20	0.48	249	157	406
T_50	11.8	10.1	22	16	38	0.28	0.20	0.49	255	161	416
T_51	9.5	7.8	17	12	29	0.27	0.20	0.47	245	154	399
T_52	11.3	9.6	21	15	36	0.28	0.20	0.48	253	160	413
T_53	10.3	8.6	19	14	32	0.28	0.20	0.48	249	157	406
T_54	9.9	8.2	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	156	403
T_55	10.1	8.4	18	13	32	0.28	0.20	0.47	248	156	404
T_56	9.7	8.0	18	13	30	0.27	0.20	0.47	246	155	401
T_57	9.7	8.0	18	13	30	0.27	0.20	0.47	246	155	401
T_58	10.3	8.6	19	14	32	0.28	0.20	0.48	249	157	406
T_59	9.8	8.1	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	155	402
T_60	9.9	8.2	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	156	403
Promedio	10.0	8.3	18	13	31	0.27	0.20	0.47	247	155	402

Anexo 8

Prueba de Hipótesis

Para las diferencias de medias con muestras dependientes (pareadas)

Taladro	Uso de Emulsion encartuchada	Simulacion con MEC-46	Diferencia de medias
T_1	371	384	13
T_2	391	404	14
T_3	383	396	13
T_4	397	411	14
T_5	402	416	14
T_6	391	405	14
T_7	389	403	14
T_8	401	415	14
T_9	400	414	14
T_10	377	390	13
T_11	387	401	14
T_12	394	408	14
T_13	380	393	13
T_14	381	394	13
T_15	401	415	14
T_16	381	394	13
T_17	398	412	14
T_18	401	415	14
T_19	384	397	13
T_20	384	397	13
T_21	391	404	14
T_22	395	409	14
T_23	383	396	13
T_24	381	394	13
T_25	383	396	13
T_26	401	415	14
T_27	374	387	13
T_28	373	386	13
T_29	387	401	14
T_30	394	407	14
T_31	379	392	13
T_32	400	414	14
T_33	371	384	13
T_34	397	411	14
T_35	377	390	13
T_36	394	408	14
T_37	394	407	14
T_38	385	398	13
T_39	379	392	13
T_40	401	415	14
T_41	385	398	13
T_42	394	408	14
T_43	390	404	14
T_44	390	404	14
T_45	376	389	13
T_46	402	416	14
T_47	374	387	13
T_48	399	413	14
T_49	402	417	14
T_50	376	389	13
T_51	371	384	13
T_52	397	411	14
T_53	402	417	14
T_54	384	397	13
T_55	398	412	14
T_56	401	415	14
T_57	398	412	14
T_58	395	409	14
T_59	386	399	14
T_60	402	416	14

Diferencia de medias	μ_d	13.64
Varianza de medias	s_d^2	0.119
Desviacion de medias	s_d	0.344
Estadistico de prueba	t	306.85

Valor crticio	tc	-1.67 Cola lzq.
		2.00 2 colas
		1.67 Cola der.

Taladro	Uso de Emulsion encartuchada	Uso con MEC-46	Diferencia de medias
T_1	371	406	34
T_2	391	417	26
T_3	383	407	24
T_4	397	406	9
T_5	402	412	10
T_6	391	404	12
T_7	389	415	26
T_8	401	394	-7
T_9	400	387	-13
T_10	377	388	11
T_11	387	401	14
T_12	394	397	3
T_13	380	384	4
T_14	381	412	31
T_15	401	416	15
T_16	381	392	11
T_17	398	388	-10
T_18	401	393	-8
T_19	384	412	28
T_20	384	389	5
T_21	391	402	11
T_22	395	396	1
T_23	383	410	27
T_24	381	417	35
T_25	383	412	29
T_26	401	410	9
T_27	374	406	32
T_28	373	386	13
T_29	387	394	7
T_30	394	393	0
T_31	379	410	30
T_32	400	393	-7
T_33	371	400	29
T_34	397	400	3
T_35	377	409	32
T_36	394	398	4
T_37	394	410	16
T_38	385	403	18
T_39	379	413	34
T_40	401	407	7
T_41	385	394	10
T_42	394	410	15
T_43	390	390	0
T_44	390	398	8
T_45	376	386	10
T_46	402	402	0
T_47	374	412	38
T_48	399	414	15
T_49	402	406	3
T_50	376	416	40
T_51	371	399	28
T_52	397	413	16
T_53	402	406	3
T_54	384	403	19
T_55	398	404	7
T_56	401	401	0
T_57	398	401	3
T_58	395	406	11
T_59	386	402	16
T_60	402	403	1

Diferencia de medias	μ_d	13.35
Varianza de medias	s_d^2	170.473
Desviacion de medias	s_d	13.057
Estadistico de prueba	t	7.92

Valor crticio	tc	-1.671 Cola lzq.
		2.00 2 colas
		1.67 Cola der.