

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE MINERAL Y MITIGACIÓN DE TIROS CORTADOS MEDIANTE EL USO DE TRIPLE INICIACIÓN ELECTRÓNICA EN EL TAJO FERROBAMBA, UNIDAD MINERA MMG LIMITED LAS BAMBAS 2018”.

Presentado por:

Percy Castillo Colque

Max William De La Fuente Leon

Para optar el Título de Ingeniero de Minas

Abancay, Perú

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



TESIS

“OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN DE MINERAL Y MITIGACIÓN DE TIROS CORTADOS MEDIANTE EL USO DE TRIPLE INICIACIÓN ELECTRÓNICA EN EL TAJO FERROBAMBA, UNIDAD MINERA MMG LIMITED LAS BAMBAS 2018”

Presentado por **Percy Castillo Colque** y **Max William De La Fuente Leon**, para optar el Título de INGENIERO DE MINAS.

Sustentado y aprobado el 13 de noviembre del 2020 ante el jurado evaluador:

Presidente:

Ing. Hilario Carrasco Kolque

Primer Miembro:

Ing. Darío Dante Sánchez Castillo

Segundo Miembro:

Ing. José-Adolfo Cárdenas Catalán

Asesor (es) :

Mtro. Franklin Aguirre Huillcas



Agradecimiento

Agradecemos a Dios por permitirnos cumplir nuestras metas y guiarnos por este camino que hemos elegido.

A nuestra UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC, a todos los profesionales que laboran en la Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Minas por todos sus conocimientos brindados a lo largo de nuestra formación.

Agradecemos a la empresa ORICA MINING SERVICES PERU S.A. que hicieron posible el desarrollo de esta tesis.



Dedicatoria

Esta tesis va dedicado a:

A mis padre Juana y Lelis quienes con su infinita paciencia y apoyo me permitieron llegar a cumplir un sueño más, gracias por inculcar en mí la perseverancia y valentía.

A mis tíos Natalia y América que me apoyaron incondicionalmente. Agradezco a toda mi familia, por sus consejos y palabras de aliento.

Percy Castillo Colque

A mis padres Dominga y Baltazar, que con su infinita comprensión y apoyo me guiaron en este camino que elegí, gracias por todo su amor y esfuerzo, por todos los valores que inculcaron en mí para poder ser una persona de bien y cumplir con todas mis metas.

Max William De La Fuente Leon



“Optimización de fragmentación de mineral y mitigación de tiros cortados mediante el uso de triple iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.”

Linea de investigación, Minería y procesamiento de minerales

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons.



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CAPÍTULO I	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.1. Descripción del problema.....	4
1.2. Enunciado del problema.....	5
1.2.1. Problema general	5
1.2.2. Problema específico.....	5
1.3. Justificación de la investigación.....	5
CAPÍTULO II	7
OBJETIVOS E HIPOTESIS	7
2.1. Objetivos de la investigación	7
2.1.1. Objetivo general.....	7
2.1.2. Objetivos específicos	7
2.2. Hipótesis de la investigación.....	7
2.2.1. Hipótesis general	7
2.2.2. Hipótesis específicas.....	8
2.3. Operacionalización de variables.....	8
CAPÍTULO III	9
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	9
3.1. Antecedentes de la investigación	9
3.1.1. Antecedentes Nacionales	9
3.1.2. Antecedentes Internacionales	10
3.2. Generalidades de la investigación	11
3.2.1. Ubicación geográfica de la unidad minera Las Bambas – MMG Limited.....	11
3.2.2. Concesiones mineras	14
3.2.3. Accesibilidad	14
3.2.4. Reseña histórica	15
3.2.5. Exploración.....	15
3.2.6. Producción	16
3.2.7. Beneficio.....	17
3.2.8. Geología regional del proyecto Las Bambas	17
3.2.9. Geología local.....	18
3.3. Marco teórico	21
3.3.1. Influencia del macizo rocoso en los resultados de una voladura.....	21
3.3.2. Proceso de fragmentación de la roca	24



3.3.3.	Proceso de detonación	26
3.3.4.	Teorías de voladura.....	27
3.3.5.	Resultados óptimos en una voladura de rocas	31
3.3.6.	Mejora de la fragmentación	32
3.3.7.	Ingeniería de explosivos	33
3.3.8.	Parámetros de voladura.....	35
3.3.9.	Ingeniería de diseño en una voladura	38
3.3.10.	Sistema de iniciación en voladura	43
3.3.11.	Sistema de iniciación no eléctrico	43
3.3.12.	Sistema de iniciación electrónica.....	46
3.3.13.	Secuencias de iniciación	47
3.3.14.	Explosivos industriales utilizados en los proyectos de voladura.....	50
3.3.15.	Selección de mezcla explosiva	53
3.3.16.	Controles en proyectos de voladura.....	54
3.3.17.	Tiros cortados (Tc) y/o taladros quedados.....	59
3.3.18.	Principales causas que producen taladros cortados	60
3.3.19.	Principales causas que producen tiros cortados.....	62
3.3.20.	Control de tiros cortados.....	66
3.3.21.	Proceso de perforación y voladura en MMG – Las Bambas	67
3.4.	Marco conceptual	67
CAPÍTULO IV.....		70
METODOLOGÍA.....		70
4.1.	Tipo y nivel de investigación	70
4.2.	Diseño de la investigación.....	70
4.3.	Población y muestra	70
4.4.	Procedimientos de la investigación	70
4.5.	Técnica e instrumentos de investigación.....	71
4.6.	Análisis estadístico	71
CAPÍTULO V		77
RESULTADOS Y DISCUSIONES		77
5.1.	Análisis de resultados	77
5.1.1.	Descripción del proceso de perforación y voladura	77
5.1.2.	Diseño de malla de perforación para mineral	78
5.1.2.1.	Estimación del diámetro de taladro.....	78
5.1.2.2.	Cálculo del Burden	79
5.1.2.3.	Cálculo del espaciamiento	79
5.1.2.4.	Estimación de la sobre perforación.....	79
5.1.2.5.	Estimación de Altura de banco (H).....	79

5.1.2.6.	Estimación de la Longitud de taladro (Lt)	79
5.1.2.7.	Diseño de malla de perforación y voladura para zonas de estéril.....	80
5.1.3.	Selección de explosivo	81
5.1.3.1.	Resistencia al agua de las mezclas explosivas Fortis Extra.....	81
5.1.3.2.	Velocidad de detonación (VOD)	82
5.1.4.	Descripción de la propuesta de carguío con triple iniciación electrónica	83
5.1.5.	Controles de calidad en voladura con triple iniciación electrónica	87
5.2.	Descripción de resultados.....	88
5.2.1.	Resumen de las pruebas realizadas con la triple iniciación electrónica	88
5.2.2.	Análisis de resultados de la voladura línea base (doble iniciación)	89
5.2.3.	Análisis de las pruebas de voladura desarrolladas con la triple iniciación electrónica	98
5.3.	Discusión.....	120
CAPÍTULO VI.....		126
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		126
6.1.	Conclusiones	126
6.2.	Recomendaciones.....	127
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		128
ANEXOS.....		132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Coordenadas de ubicación de la unidad minera las Bambas.....	11
Tabla 2.2: Localización de las tres zonas del tajo Ferrobamba - Las Bambas.....	13
Tabla 2.3: Coordenadas UTM de la concesión minera Las Bambas.....	14
Tabla 2.4: Accesibilidad a la unidad minera Las Bambas – Tajo Ferrobamba.....	14
Tabla 2.5: Constante de retardo de tiempo entre taladros.....	48
Tabla 2.6: Constante de retardo entre filas.....	49
Tabla 2.7: Gasificación de Fortis Extra 65/35.....	55
Tabla 2.8: Velocidad de detonación de diferentes agentes de voladura.....	56
Tabla 3.1: Operacionalización de variables.....	8
Tabla 4.1: Velocidad de detonación según el tipo de mezcla explosiva.....	82
Tabla 4.2: Análisis de fragmentación de grava para el tapado.....	87
Tabla 4.3: Resumen de pruebas de voladura de enero 2018 a marzo 2018.....	89
Tabla 4.4: Datos del proyecto de voladura con doble iniciación electrónica.....	91
Tabla 4.5: Tasa de excavación promedio de los equipos de minado.....	96
Tabla 4.6: Costo de explosivos por taladro de producción con doble iniciación.....	96
Tabla 4.7: Costo de explosivos por taladro de contorno con doble iniciación.....	97
Tabla 4.8: Costo de explosivos por taladro de Buffer con iniciación simple.....	97
Tabla 4.9: Datos del proyecto de voladura con triple iniciación electrónica.....	99
Tabla 4.10: Tasa de excavación promedio de la pala 12.....	105
Tabla 4.11: Datos del proyecto de voladura con triple iniciación electrónica.....	107
Tabla 4.12: Tasa de excavación promedio de la pala 12.....	113
Tabla 4.13: Costo de explosivos para taladros de producción con triple iniciación.....	114
Tabla 4.14: Costo de explosivos para taladros de producción con triple iniciación.....	114
Tabla 4.15: Costo de accesorios y explosivos de acuerdo al tipo de iniciación.....	115
Tabla 4.16: Resumen de resultados de fragmentación obtenidos.....	116
Tabla 4.17: Resumen del porcentaje de tiros cortados con respecto al número de detonadores consumidos.....	119
Tabla 4.18: Tasa de excavación promedio de los equipos de minado.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Mapa de ubicación del proyecto minero Las Bambas - MMG Limited.	12
Figura 2.2: Croquis de ubicación de las tres zonas del tajo Ferrobamba - MMG Limited.	13
Figura 2.3: Interacción de las propiedades de la roca y las variables controlables con las operaciones mineras.	23
Figura 2.4: Proceso de fracturamiento de las rocas por acción de un explosivo.	25
Figura 2.5: Proceso de detonación.	26
Figura 2.6: Modelo de flexión de la viga antes de la detonación.	27
Figura 2.7: Modelo de flexión de la viga después de la detonación.	27
Figura 2.8: Teoría de reflexión.	28
Figura 2.9: Fases del proceso de fracturamiento de la roca.	29
Figura 2.10: Tipos de fisuras en las proximidades del taladro.	30
Figura 2.11: Agrietamiento radial y rotura por reflexión de la onda de choque.	31
Figura 2.12: Triángulo de rendimiento de voladuras.	32
Figura 2.13: Clasificación de los explosivos.	35
Figura 2.14: Distribución de la energía del explosivo dentro del macizo rocoso.	38
Figura 2.15: Elementos de un banco de voladura.	38
Figura 2.16: Estructura de un cordón detonante.	44
Figura 2.17: Estructura del tubo de choque.	45
Figura 2.18: Partes de un detonador no eléctrico o pirotécnico.	45
Figura 2.19: Partes de un detonador electrónico.	47
Figura 2.20: Consideraciones a tener en cuenta para el diseño de secuencias de tiempo.	49
Figura 2.21: Variación de la energía de acuerdo al porcentaje de diésel.	50
Figura 2.22: Influencia del diámetro en la velocidad de detonación.	51
Figura 2.23: Estructura del ANFO pesado.	52
Figura 2.24: Gasificación del ANFO pesado 65/35 dentro de un taladro.	53
Figura 2.25: Estructura de Fortis Extra 65/35.	54
Figura 2.26: Medición de la densidad en campo.	55
Figura 2.27: Sobre quiebre trasero hacia la cara libre del nuevo banco.	57
Figura 2.28: Casos de posible riesgo de proyecciones (a) Frente irregular; (b) Sobrecarga de barrenos (c) Zonas de acumulación de explosivo; (d) Mala secuenciación.	58
Figura 2.29: Detonador fallado por efecto de la presión dinámica.	61
Figura 2.30: Presión vs distancia para diferentes diámetros de perforación.	61

Figura 2.31: Primado de detonador pirotécnico con Booster.	62
Figura 2.32: Corte debido a caída de detritus.	63
Figura 2.33: Corte debido a la colocación del taco.	64
Figura 2.34: Corte debido a situaciones operacionales.	64
Figura 2.35: Corte debido al desacoplamiento de carga explosiva, falta de simpatía.	65
Figura 2.36: Corte debido a desplazamiento de estructuras geológicas.	65
Figura 2.37: Diagrama de Back Up.	66
Figura 3.1: Grafico del nivel de significancia de 0.05.	73
Figura 4.1 Proceso de perforación y voladura en Las Bambas – MMG Limited.	78
Figura 4.2: Resistencia al agua de los diferentes productos explosivos.	81
Figura 4.3: pruebas de VOD para el Fortis Extra 65/35.	83
Figura 4.4: Parámetros de voladura con doble iniciación.	84
Figura 4.5: Reducción de la fragmentación en la zona del taco.	85
Figura 4.6: Diseño con triple iniciación electrónica en carga corrida (a) y con carga satélite (b).	86
Figura 4.7: Curva de gasificación del Fortis Extra 65/35.	87
Figura 4.8: Velocidad de detonación de Fortis Extra 65/35.	88
Figura 4.9: Malla de voladura con doble iniciación (línea base).	90
Figura 4.10: Ubicación de taladros tapados, posible cambio estructural.	91
Figura 4.11: Diseño de carguío con doble iniciación electrónica (línea base).	92
Figura 4.12: Movimiento del material volado con doble iniciación (línea base).	93
Figura 4.13: Frente de minado del proyecto 3720-006 (línea base).	93
Figura 4.14: Distribución de la fragmentación obtenida con el Software PowerSieve (Línea base).	94
Figura 4.15: Fragmentación promedio mensual con doble iniciación electrónica.	95
Figura 4.16: Costos de carguío de taladro de producción, contorno y buffer.	97
Figura 4.17: Malla de voladura con triple iniciación (Prueba 01).	98
Figura 4.18: Taladros cercanos debido a re-perforacion de taladros.	99
Figura 4.19: Diseño de carguío de taladros con triple iniciación (Prueba 01).	100
Figura 4.20: Secuencia e inicio de voladura del proyecto (Prueba 01).	101
Figura 4.21: Dirección del desplazamiento de material volado (Prueba 01).	101
Figura 4.22: Ubicación de la pala 12 en el frente de minado (Prueba 01).	102
Figura 4.23: Minado del polígono 7 (Prueba 01).	102
Figura 4.24: Imagen post voladura del proyecto (Prueba 01).	103
Figura 4.25: Análisis de fragmentación (Prueba 01).	103

Figura 4.26: Distribución de fragmentación obtenida con el Software PowerSieve (Prueba 01).	104
Figura 4.27: Comparación de rendimientos del equipo de minado (Prueba 01).	105
Figura 4.28: Malla de voladura con triple iniciación con carga satélite.....	106
Figura 4.29: Diseño de carguío de taladros con triple iniciación (Prueba 02).	108
Figura 4.30: Secuencia e inicio de voladura del proyecto (Prueba 02)	109
Figura 4.31: Dirección de desplazamiento del material volado (Prueba 02).....	109
Figura 4.32: Ubicación de la pala 12 en el frente de minado (Prueba 02).	110
Figura 4.33: Frente de minado del polígono 04 (Prueba 02).....	110
Figura 4.34: Imagen post voladura del proyecto (Prueba 02)	111
Figura 4.35: Análisis de fragmentación (Prueba 02).....	111
Figura 4.36: Distribución de la fragmentación PowerSieve (Prueba 02).	112
Figura 4.37: Comparación del rendimiento de los equipos de minado (Prueba 02).	113
Figura 4.38: Comparación de los costos de carguío en taladros de producción.....	115
Figura 4.39: Resumen de tiros cortados en el año 2016 y 2017 con doble iniciación.	116
Figura 4.40: Factores que causan los tiros cortados en MMG Limited – Las Bambas.	117
Figura 4.41: Resumen de tiros cortados con doble y triple iniciación electrónica.....	118
Figura 4.42: Medición de VOD en el explosivo Fortis Extra 100.....	121
Figura 4.43: Medición de VOD en el explosivo Fortis Extra 65/35.	121
Figura 4.44: Comparación del P80 obtenido con doble y triple iniciación.	122
Figura 4.45: Porcentaje de finos obtenidos con doble y triple iniciación.	123
Figura 4.46: Rendimiento de los equipos de minado (doble vs triple iniciación).....	124
Figura 4.47: Costo de carguío en taladros de producción – doble vs triple iniciación.....	124
Figura 4.48: Resumen de tiros cortados con doble y triple iniciación.	125

INTRODUCCIÓN

Estudios en todas las minas a tajo abierto del mundo demuestran que la perforación y voladura tienen una influencia del 60 % a 70 % en todo el proceso minero-metalúrgico, es por ello que se busca utilizar nuevas técnicas y diseños para obtener una óptima fragmentación de mineral (calcopirita, bornita, molibdenita, etc.), dentro de estos diseños proponemos la triple iniciación electrónica en un taladro que nos permite aprovechar las colisiones simultaneas de ondas compresivas o de choque y la gran cantidad de gases a elevadas temperaturas que se producen luego de la detonación del explosivo, estas dos energías ejercen presión sobre el macizo rocoso circundante; la onda de choque y presión de gas provocan el agrietamiento, fragmentación y desplazamiento de la roca, esto dependerá del diseño de malla de perforación (burden y espaciamiento), tipo de mezcla explosiva (Heavy ANFO 65/35), roca (Skarn, monzonitas), cantidad y ubicación de los booster, diámetro del taladro (12 ¼ pulg.), altura de carga, analizamos las diferentes mezclas explosivas comerciales para determinar la mezcla a utilizar en las voladuras (Heavy ANFO 65/35), determinamos el diseño de malla de perforación óptimo para lograr nuestro objetivo, luego, analizamos los resultados de fragmentación obtenidos con la triple iniciación electrónica, para así demostrar la optimización de la fragmentación del mineral.

Los tiros cortados son taladros con carga explosiva que no han detonado según lo planificado, esto se produce por varios motivos, principalmente por falla del producto, errores operativos durante el proceso de carguío y tapado de taladros. La ocurrencia de un tiro cortado en una voladura son causantes de una mala fragmentación, mal control de pisos, bolones de roca de gran tamaño y generación de costos adicionales. La utilización de la triple iniciación con detonadores electrónicos minimizará enormemente la posibilidad de ocurrencia de un tiro cortado ya que al contar con tres primas se tiene la ventaja de poder iniciar la prima con el detonador fallado con una segunda o tercera prima. El objetivo principal de esta investigación es determinar que mediante el uso de triple iniciación electrónica se optimizará la fragmentación de mineral obtenida actualmente utilizando doble iniciación electrónica para así reducir costos en procesos posteriores de conminución y a su vez reducir a 0 los tiros cortados en los proyectos de voladura.

El trabajo de tesis se organiza de la siguiente manera: primer capítulo abarca el planteamiento del problema, objetivos y justificación de la investigación; segundo capítulo trata de generalidades de la investigación y marco teórico concerniente a la voladura y fragmentación; tercer capítulo abarca la definición de variables, hipótesis de la investigación y procedimiento de la investigación; cuarto y quinto capítulo abarca la descripción de resultados, recomendaciones y conclusiones.



RESUMEN

El presente trabajo de tesis ofrece una alternativa de solución a uno de los problemas más significativos en Minera Las Bambas – MMG Limited, el cual radica en resultados deficientes de fragmentación de mineral y altos índices de tiros cortados producto de las voladuras primarias en el Tajo Ferrobamba, por lo tanto se planteó la hipótesis de que el uso de la triple iniciación electrónica influye en la optimización de la fragmentación del mineral y se mitiga los tiros cortados en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas.

Para lograr las metas de la investigación se eligió el tajo Ferrobamba – Jahuapaylla Baja; en los niveles de banco 3720 y 3705, la roca predominante es Monzonita Cuarcifera con una resistencia a la compresión de 242,26 MPa. En ellas se efectuaron los disparos de taladros tanto con doble iniciación electrónica y triple iniciación electrónica (carga corrida y carga satélite).

La voladura con triple iniciación electrónica dio mejores resultados que con doble iniciación electrónica, con la triple iniciación electrónica en carga corrida se obtuvo un P80 menor o igual a 4,38 pulgadas con un porcentaje de finos menores a una pulgada de 26,6 %. Con la triple iniciación electrónica con carga satélite se obtuvo un P80 igual a 3,92 pulgadas de diámetro, con un porcentaje de finos menores a una pulgada de 36,52 %. Las palas 12 y 01 incrementaron su productividad en un 15,46 % y 21,47 % respectivamente en los frentes de minado donde se aplicaron la triple iniciación electrónica.

El uso de la triple iniciación electrónica sumado a los planes de acción para mitigar los tiros cortados nos permitió tener control de los tiros cortados mejorando la seguridad. Por lo tanto, se determinó que la voladura con detonadores electrónicos optimiza significativamente la fragmentación y la seguridad en el Tajo Ferrobamba – MMG LAS BAMBAS.

PALABRAS CLAVES: Iniciación electrónica, explosivos, fragmentación de mineral, optimización, voladura.



ABSTRACT

This thesis work offers an alternative solution to one of the most significant problems at Minera Las Bambas - MMG Limited, which lies in poor results of mineral fragmentation and high cut shot rates as a result of primary blasting in the Tajo Ferrobamba. Therefore, it was hypothesized that the use of the triple electronic initiation influences the optimization of the fragmentation of the mineral and mitigates the cut shots in the Ferrobamba pit, MMG Limited Las Bambas mining unit.

To achieve the research goals, the Ferrobamba - Jahuapaylla Baja pit was chosen; at bench levels 3720 and 3705, the predominant rock is Quartz Monzonite with a compressive strength of 242.26 MPa. Drills were fired at both double electronic initiation and triple electronic initiation (continuous load and satellite load).

Blasting with triple electronic initiation gave better results than with double electronic initiation, with triple electronic initiation in continuous load a P80 less than or equal to 4.38 inches was obtained with a percentage of fines less than one inch of 26.6%. With the triple electronic initiation with satellite charge, a P80 equal to 3.92 inches in diameter was obtained, with a percentage of fines less than one inch of 36.52%. Shovels 12 and 01 increased their productivity by 15.46% and 21.47% respectively on the mining fronts where triple electronic initiation was applied.

The use of the triple electronic initiation added to the action plans to mitigate the cut shots allowed us to have control of the cut shots improving security. Therefore, it was determined that blasting with electronic detonators significantly optimizes fragmentation and safety in the Tajo Ferrobamba - MMG LAS BAMBAS.

KEY WORDS: Electronic initiation, explosives, mineral fragmentation, optimization, blasting.



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Uno de los problemas que actualmente se afrontan en la unidad minera Las Bambas es cumplir con los requerimientos de mineral a la planta concentradora, con una fragmentación de mineral adecuado, la cual es equivalente a un P80 menor o igual a 4,5 pulgadas, con un porcentaje de finos menores a una pulgada de 35 % del total. Estos resultados en fragmentación no han sido posibles obtener en voladuras con doble iniciación electrónica. (Romero Paucar, 2016)

En los bancos de mineral donde se encuentran presentes formaciones de Endo Skarn con resistencias a la compresión de 189,26 MPa. a 272,86 MPa. y formaciones de Monzonita Cuarzifera con resistencia a la compresión de 171,16 MPa. a 242,26 MPa. para voladuras primarias, en estas condiciones litológicas se obtiene como resultado en la fragmentación de mineral un porcentaje de 18 % a 24 % de finos menores a una pulgada empleando doble iniciación con detonadores electrónicos. (Quispe Arenas, 2016)

Así mismo en la parte del taco, la fragmentación de la roca se presenta con mayor tamaño disminuyendo considerablemente el porcentaje de finos y en algunos casos generando bolonería. (Sulca Alfaro, 2016)

Los eventos de tiros cortados (TC) representan un problema significativo para la seguridad porque se emplean grandes cantidades de explosivo (400 a 1000 kilogramos por taladro), los daños o cortes en las líneas descendentes de los detonadores ocurren generalmente durante el proceso del tapado y/o carguío de taladros. (Queque Arias, 2017)

La presencia de un tiro cortado en una voladura es causante de una mala fragmentación, mal control de pisos, presencia de bolones de roca de gran tamaño y generación de costos adicionales en voladura secundaria, así mismo implica retrasos en el inicio del proceso de minado. (Aguirre Garcia , 2016)

Es necesario presentar nuevas alternativas para mejorar los resultados en estos aspectos, ya que en la actualidad no se cumple con los requerimientos de planta es por ello que el objetivo de esta tesis es optimizar la fragmentación de mineral y mitigar los tiros cortados



mediante el uso de triple iniciación electrónica ya que una buena fragmentación y la eliminación de tiros cortados tienen una influencia determinante en la productividad de los equipos de carguío, acarreo, chancado, molienda y seguridad en el proceso de minado.

1.2. Enunciado del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo la fragmentación de mineral se optimizará y se mitigarán los tiros cortados mediante el uso de triple iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018?

1.2.2. Problema específico

- ¿Cuál será el diseño de la malla de perforación para optimizar la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018?
- ¿Qué mezcla explosiva será utilizado para optimizar los resultados en la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018?
- ¿Cuál será la eficiencia de una voladura con triple iniciación electrónica con respecto a una voladura con doble iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018?
- ¿Se mitigarán los tiros cortados utilizando triple iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018?

1.3. Justificación de la investigación

Es importante la aplicación de la triple iniciación electrónica para optimizar la fragmentación de mineral, este diseño es una técnica propuesta para el carguío de taladros en la unidad minera Las Bambas y se va a demostrar la importancia del uso de la triple prima ubicados a determinadas distancias en el taladro, así de esta forma poder aprovechar la colisión de ondas (energía) que van a generar las tres primas al ser detonados simultáneamente empleando detonadores electrónicos que garantizan una dispersión del 0,04 milisegundos. (Johnson E, 2014).

Con la triple iniciación electrónica será posible mitigar los tiros cortados ya que en un diseño de carga corrida las primas no afectadas iniciarán a los detonadores afectados por corte o daño en la línea descendente. Nos permite también fracturar el mineral a lo largo del taladro y principalmente en la parte del taco; optimizar la fragmentación en la roca incrementando el porcentaje de finos y de esta manera mejorando en el tiempo del ciclo de carguío e incrementando la producción de mineral en la planta.



Según Agreda T. (2015), muchos investigadores a nivel mundial han demostrado que la fragmentación obtenida como resultado de las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura tiene un impacto del 60 % al 70 % del costo total – dólares por tonelada (\$/t) en las operaciones minero metalúrgico.



CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPOTESIS

2.1. Objetivos de la investigación

2.1.1. Objetivo general

Determinar la optimización en la fragmentación de mineral y mitigar los tiros cortados mediante el uso de triple iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.

2.1.2. Objetivos específicos

- Determinar el diseño de la malla de perforación para optimizar la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.
- Determinar la mezcla explosiva que será utilizada para optimizar los resultados en la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.
- Determinar la eficiencia que genera una voladura con triple iniciación electrónica con respecto una voladura con doble iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.
- Determinar que la triple iniciación electrónica mitiga los tiros cortados en los bancos de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.

2.2. Hipótesis de la investigación

2.2.1. Hipótesis general

El uso de la triple iniciación electrónica influye en la optimización de la fragmentación de mineral y se mitigaran los tiros cortados en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.



2.2.2. Hipótesis específicas

- El diseño de malla de perforación optimiza la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.
- La mezcla explosiva seleccionada optimiza los resultados de la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.
- La triple iniciación electrónica genera una voladura más eficiente con respecto a la doble iniciación electrónica en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.
- La triple iniciación electrónica mitiga los tiros cortados en el tajo Ferrobamba, unidad minera MMG Limited Las Bambas 2018.

2.3. Operacionalización de variables

Tabla 2.1: Operacionalización de variables.

<i>Variable</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Indicadores</i>
INDEPENDIENTE.	1.1 VOD	m/s
Triple iniciación <i>electrónica</i>	1.2 Precisión	ms
	1.3 Exactitud	ms
	DEPENDIENTE.	
Fragmentación de mineral	2.1 Fragmentación	Granulometría en P80
Tiros cortados	2.2 Numero de tiros cortados (Tc)	TCs/Mes.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1. Antecedentes de la investigación

3.1.1. Antecedentes Nacionales

- **Inostroza S. (2014)**, en su tesis “**Optimización de la fragmentación en las rocas con la aplicación de la doble iniciación electrónica en la explotación de cobre porfirítico a cielo abierto**”, demuestra la importancia de usar un iniciador adicional con detonador electrónico para mejorar la fragmentación de la roca en zonas de mineral. Como conclusión se ha conseguido obtener una mayor producción de mineral y reducir los Kilo-Watt hora por tonelada métrica (Kw-hr/ TM) en planta al optimizar la fragmentación de la roca con la aplicación de la doble iniciación electrónica.
- **Poma Fernandez. (2012)** según la tesis: “**Importancia de la fragmentación de la roca en el proceso gold mill (caso minero Yanacocha)-año 2012**. La tesis trata de mejorar la fragmentación de la roca producto de la voladura (en zona de sílice masiva) proveniente del Tajo El Tapado con el objetivo de aumentar el throughput de la Chancadora Primaria de la Planta Gold Mill de Minera Yanacocha, Para eso, se emplean teorías de fragmentación de roca (por voladura), cambiando el diseño de mallas de perforación, carguío de explosivos y secuencias de iniciación, utilizando detonadores electrónicos”.
- **Miranda S. (2009)**, en su trabajo “**Estudio del rendimiento entre detonadores electrónicos y no eléctricos e implicancia en la economía del proceso y seguridad en tajo abierto**”, hace una comparación de los rendimientos entre los detonadores electrónicos y no eléctricos, también realiza un análisis de los costos y seguridad. En sus conclusiones el uso de los detonadores electrónicos permitió deducir los costos en \$ 180 791 al año, y \$ 0,004 por tonelada métrica.



- **Palomino Vilca. (2013)** en su tesis “**Diseño de mallas de perforación y voladura para optimizar la fragmentación en el tajo Jessica – CÍA Minera Arasi SAC**, Concluye que: El resultado de una óptima fragmentación depende también del diseño de malla de perforación, diseño de carga, tipo de roca, geología estructural y del diseño de amarre, su estudio está basado en la caracterización litológica y estructural del macizo rocoso, realizado en los afloramientos rocosos que se encuentran en la superficie mediante el uso de líneas de detalle (líneas micro tectónicas); este mapeo geológico estructural de las discontinuidades consiste en la medición detallada de la orientación de los planos (juntas, estratificaciones y fallas) que cortan el macizo rocoso”.

3.1.2. Antecedentes Internacionales

- **Johnson E. (2014)**, en el trabajo de investigación “**Fragmentation Analysis in the Dynamic Stress Wave Collision Regions in Bench Blasting**” demuestra la teoría de colisión de ondas en un laboratorio utilizando bloques de concreto y cargas explosivas en menor cantidad. Concluye que la mejor fragmentación ocurre en las regiones intermedias entre cada taladro adyacente, esto se debe al fenómeno de colisión de ondas.
- **Yamamoto (1999) ;Rossmannith (2003)**, “plantean una posible teoría, dado que ahora son posibles tiempos de retardo más cortos, las ondas de choque entre taladros pueden colisionar y aumentar la fragmentación de la roca entre dos taladros adyacentes. Concluye que la colisión de ondas tiene un impacto positivo en los resultados de fragmentación de rocas y por ende en los costos generales de las operaciones unitarias de perforación y voladura”.
- **Kanchoboltla (1998)**, han demostrado que la eficiencia de los procesos metalúrgicos (trituración y molienda) está influenciado por el grado de fragmentación obtenida en la voladura de rocas.
- **Mac Kenzie (1984)**, describió la fragmentación óptima como "la práctica de voladura que proporciona el grado de fragmentación necesario para obtener el menor costo unitario de las operaciones combinadas de perforación y voladura, carga, acarreo y trituración".



- **Johansson (1966)**, menciona que “bajo las influencias de las altas presiones de los gases producidos por la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial; las primeras fracturas radiales son extendidas, la cara libre falla y esta es movida hacia el frente”.

3.2. Generalidades de la investigación

3.2.1. Ubicación geográfica de la unidad minera Las Bambas – MMG Limited

3.2.1.1. Ubicación geográfica

La unidad minera Las Bambas perteneciente al consorcio minero MMG Limited, se encuentra ubicado en los distritos de Chalhuanhuacho, Tambobamba, Coyllurqui (provincia de Cotabambas) y Progreso (provincia de Grau); departamento Apurímac ubicado en la zona sur oeste del Perú la cual se muestra en la figura 1.

“El distrito minero Las Bambas se encuentra ubicado a 565 Km al sureste de la ciudad de Lima, 300 km al noroeste de la ciudad de Arequipa, 75 Km al suroeste de la ciudad de Cusco, a una altitud que comprende desde los 3700 hasta los 4600 m.s.n.m.” (Xstrata Tintaya S.A., 2010).

Tabla 3.1: Coordenadas de ubicación de la unidad minera las Bambas.

Coordenada UTM – WGS 84

Zona	18L
Norte	8444000
Este	787500

Fuente: (Xstrata Tintaya S.A., 2010)

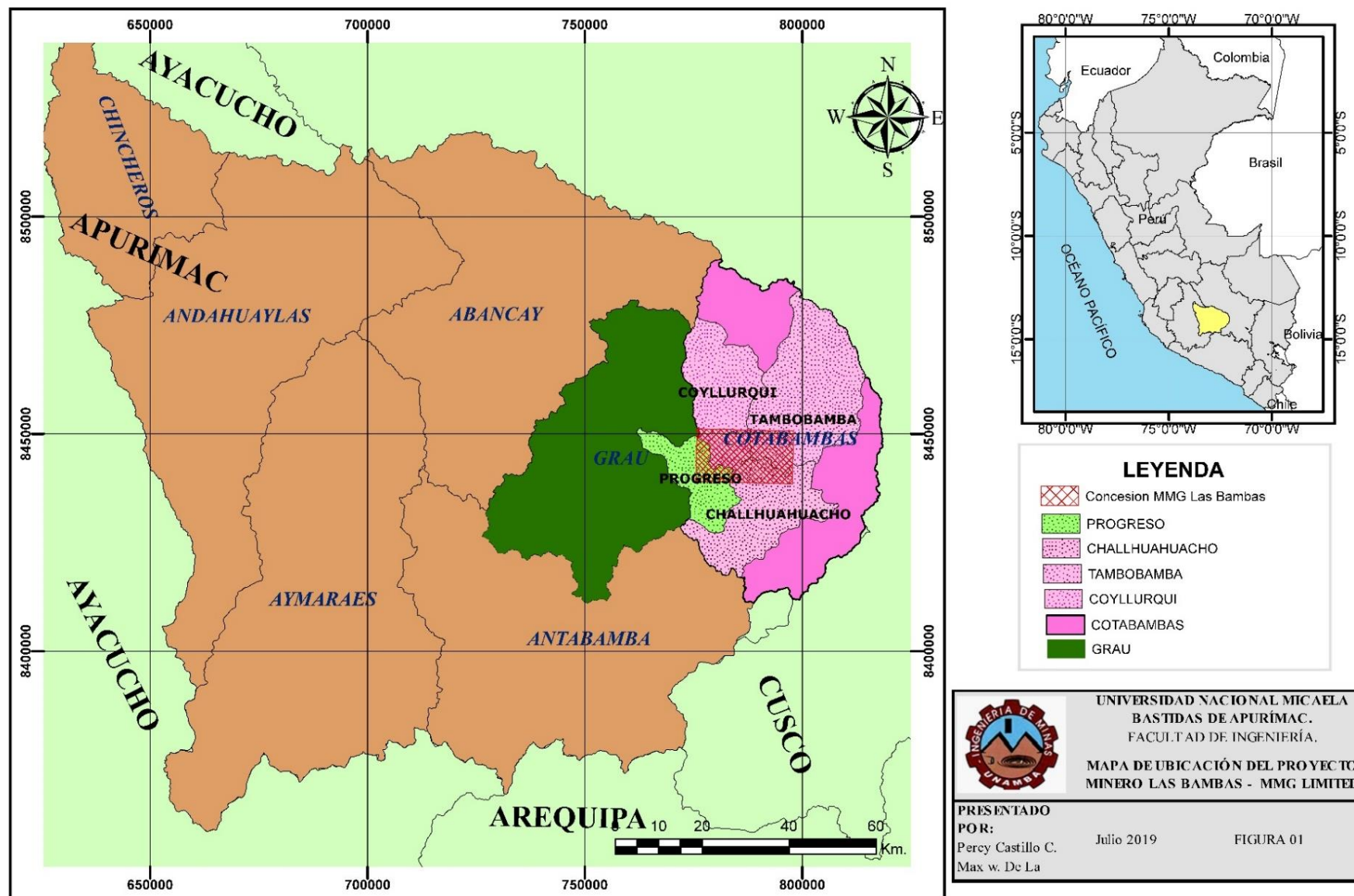


Figura 3.1: Ubicación del proyecto minero Las Bambas - MMG Limited.

Fuente: Elaboracion propia.



El tajo Ferrobamba está dividida en tres zonas de minado las cuales se describen en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Localización de las tres zonas del tajo Ferrobamba - Las Bambas.

N°	LOCALIZACIÓN UTM (WGS 84)			DESCRIPCIÓN
	ZONA 18L			
	NORTE	ESTE	ELEVACIÓN	
1	8441158	793882	4155 msnm.	Jahuapaylla Alta.
2	8440249	793348	3850 msnm.	Jahuapaylla Intermedia.
3	8439737	793716	3690 msnm.	Jahuapaylla Baja.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se muestra en la figura 2 la ubicación de las tres zonas del tajo Ferrobamba – MMG Las Bambas.



Figura 3.2: Croquis de ubicación de las tres zonas del tajo Ferrobamba - MMG Limited.
Fuente: (Google Earth, 2019)

3.2.2. Concesiones mineras

“La concesión minera de MMG Las Bambas está comprendida de acuerdo a las siguientes coordenadas UTM (ver Tabla 2.3), abarcan un área total de 35000 hectáreas de concesión minera”. (Mauricio, 2015)

Los 4 yacimientos encontrados abarcan un área total de 1800 hectáreas de la siguiente manera (ver ANEXO A):

- Chalcobamba 600 hectáreas.
- Charcas 400 hectáreas.
- Ferrobamba 400 hectáreas.
- Sulfobamba 400 hectáreas.

Tabla 3.3: Coordenadas UTM de la concesión minera Las Bambas.

Punto	Coordenadas UTM WGS 84	
	Norte	Este
P1	8450629	797770
P2	8436629	797770
P3	8436629	772771
P4	8450629	772771

Fuente: (Ingemmet, 2019)

3.2.3. Accesibilidad

Para poder acceder a la unidad minera Las Bambas desde la ciudad de Lima se cuenta con dos rutas.

Tabla 3.4: Accesibilidad a la unidad minera Las Bambas – Tajo Ferrobamba.

	RUTA	DISTANCIA (Km.)	TIEMPO (Horas)	TRANSPORTE	TIPO DE ACCESO
OPCIÓN N 01	Lima - Cusco	1165	1	AÉREO	Aéreo
	Cusco-Challhuahuacho	220	7	BUS	Terrestre
	TOTAL	1385	8		
OPCIÓN N 02	Lima - Cusco	1165	20	BUS	Terrestre
	Cusco- Challhuahuacho	220	7	BUS	Terrestre
	TOTAL	1385	27		

Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Reseña histórica

Los yacimientos de Las Bambas fueron descubiertos en el año 1911, época desde la cual se han realizado diversos estudios con el objetivo de determinar la viabilidad del proyecto. En agosto del 2004 Xstrata Copper adquiere el derecho para explorar Las Bambas a través de una licitación pública internacional; en el 2008 se completa la exploración de 306908 metros de perforaciones diamantinas acumulados y para el 2009 se concluye el estudio de factibilidad.

En el año 2011 el estado aprueba el Estudio de Impacto Ambiental, luego de un amplio proceso de participación ciudadana. Ese mismo año se informa el incremento de los recursos minerales de Las Bambas en 10 %, equivalente a 1710 millones de toneladas con una ley de cobre de 0,60 %.

En el año 2012 se desarrolla la construcción de caminos y componentes principales para el arranque de la futura operación; asimismo se inicia el mejoramiento de la carretera Las Bambas – Espinar.

En el año 2014 el consorcio compuesto por MMG Limited, Guoxin International Investment Co. Ltd. y CITIC Metal Co. Ltd. Adquieren la unidad minera Las Bambas.

Para el año 2015 se logra la primera producción de concentrado de cobre, en el año 2016 se realiza el primer embarque de concentrado de cobre con destino a China y se da inicio a la operación comercial. (Las Bambas, 2017)

3.2.5. Exploración

Los trabajos de exploración en el proyecto minero Las Bambas fue un proceso muy extenso con una duración aproximada de 10 años; en el año 2008 se culminaron las exploraciones realizadas por la empresa Xstrata Copper.

En los trabajos exploratorios en las concesiones de Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba se estimaron un total de 898.328 millones de toneladas de reservas en recursos minerales (Cu, Au, Mo) se estima que la vida de la mina será hasta el año 2033. (Hurtado Nuñez, 2017)

El tiempo de vida de la mina estimado es de dieciocho años, con un considerable potencial de exploración.

Las Bambas consta de tres yacimientos principales: Ferrobamba, Chalcobamba y Sulfobamba, estando en explotación Ferrobamba. Hasta la fecha solo se ha explorado el 10% de la concesión. En 2008 se completa la exploración de 306,908 metros de perforación acumulados.



3.2.6. Producción

En diciembre de 2015, se inició la producción de concentrado de cobre, se espera tener una producción de dos millones de toneladas en concentrado de cobre en los cinco primeros años de operación, actualmente Las Bambas tiene una producción de 140000 toneladas de mineral al día y 259000 toneladas de estéril por día haciendo un total de 399000 toneladas de material quebrado por día, el promedio mensual de material quebrado es de 11 a 12 millones de toneladas métricas. (Las Bambas, 2017). En la unidad MMG Las Bambas se utiliza un método de minado a tajo abierto, con una altura de banco de 15 metros con un ángulo de cara de banco de 65°, el talud final del tajo Ferrobamba es de 34°; las vías de acceso al tajo Ferrobamba es a través de rampas de doble vía con 29 metros de ancho total, estas rampas cuentan con bermas de seguridad con una altura mínima de 3 metros que es equivalente a las $\frac{3}{4}$ partes de la altura del neumático más grande disponible en la unidad minera, el ancho de berma varía de 9 a 13.4 metros de acuerdo a los parámetros de diseño geotécnico. A su vez MMG Las Bambas cuenta con el botadero principal Huancarane, la ratio de explotación estéril/mineral (E/M) es de 1.86 es decir por cada tonelada de mineral se debe extraer 1.86 toneladas de estéril, y una ley de corte de 0.18%, cuenta también con una planta concentradora convencional, que produce concentrado de cobre limpio con créditos de oro, plata y molibdeno.

Para la perforación en la unidad minera MMG Las Bambas, cuenta con ocho (8) perforadoras, cinco (5) de ellas son eléctricas de la marca P&H y CAT y tres (3) son a diésel de la marca P&H y Atlas Copco, que son utilizadas para realizar la perforación de taladros de producción con los siguientes parámetros de perforación:

- Velocidad de perforación de 60 m/h (variable de acuerdo al tipo de roca).
- Diámetro de broca 12 $\frac{1}{4}$ pulgadas.
- Rotación de 90 RPM en promedio.

En la voladura se empleó ANFO Pesado gasificado 73 (70 % emulsión gasificable y 30 % ANFO), los taladros en su mayoría se encuentran con agua y para el proceso de carguío de explosivos en los taladros se emplean camiones fabrica que cuentan con dos sistemas de carguío, sistema vaciable para taladros seco y bombeable para taladros con agua.

Los equipos de carguío del material fragmentado a los camiones, con las que se cuentan son:



- 01 cargador Frontal Letourneau L2350.
- 01 cargador Frontal CAT 994C 95.
- 03 Palas CAT 6060 FS.
- 02 Palas CAT 7495 HR.
- 02 Palas P&H 4100 XPC.

El proceso de acarreo consiste en retirar el material volado y transportarlo hacia los distintos puntos de descarga (chancadora, botadero, stock) para cumplir con los requerimientos de desarrollo y producción se tiene la siguiente flota:

- 45 camiones mineros Komatsu 930E – 4SE de 320 toneladas de capacidad.
- 06 camiones CAT 797F de 400 toneladas de capacidad.

3.2.7. Beneficio

Las Bambas cuenta con una planta concentradora con una capacidad anual de 400,000 toneladas de cobre concentrado, se produce 1100 toneladas de concentrado de cobre al día aproximadamente. (Las Bambas, 2017)

La planta concentradora cuenta con una capacidad instalada de 145000 Tm/día, generando concentrados de cobre (Cu) y molibdeno (Mo), para este proceso MMG Las Bambas cuenta con dos chancadores giratorios ubicados junto al tajo Ferrobamba que producen fragmentos menores a 150 mm.

El mineral fragmentado por las chancadoras se transporta con fajas transportadores de 72 pulgadas de ancho desde el chancado primario hasta la planta concentradora una distancia de 5 kilómetros donde el mineral se descarga a una pila de acopio de 105000 toneladas métricas de capacidad.

Para el proceso de molienda se cuenta con dos líneas que consisten en:

- Un molino un SAG de 40ft X 22ft. Bolas de acero de 5 pulgadas.
- Un molino de bolas de 26ft X 40ft. Bolas de acero de 3 pulgadas.

Se utiliza el método de flotación espumante para la concentración del mineral.

3.2.8. Geología regional del proyecto Las Bambas

El Proyecto Las Bambas se ubica en la franja de yacimientos de skarn de Cu (Mo-Au), asociados a sistemas tipo pórfido, ubicados al sureste del Perú. Esta franja metalogénica está controlada por el batolito Andahuaylas-Yauri de edad Eoceno-Oligoceno, que se ha emplazado en unidades sedimentarias del Mesozoico, siendo la de mayor importancia la formación Ferrobamba (Cretáceo inferior a superior).



Las rocas intrusivas del batolito en contacto con las calizas Ferrobamba, han originado un metamorfismo de contacto y en algunos lugares cuerpos de skarn con mineralización de Cu (Mo-Au).

El batolito Andahuaylas-Yauri se ha emplazado al sur de la “Deflexión de Abancay”, con lineamientos de dirección NO-SE, NE-SO y otros que fueron generados principalmente por la Orogenia Andina.

El proyecto Las Bambas, dentro de este contexto geológico regional, está localizado en el cinturón porfirítico/skarn Cu-Mo-Au denominado Skarn belt Andahuaylas-Yauri situado al sureste del Perú, en una zona de anomalía atribuida a la orogénesis Inca del Eoceno al Oligoceno temprano (Brookes, 2006); este cinturón metalogénico esta hospedado principalmente en el Batolito de Andahuaylas-Yauri, el cual presenta intrusiones múltiples de composición calcoalcalina.

3.2.9. Geología local

El área del yacimiento Las Bambas presenta rocas de naturaleza ácida (granodiorita) a intermedia (monzonita) que intruyen a las rocas sedimentarias y entre ellas a las calizas de la Formación Ferrobamba. Los cuerpos de skarn asociados son irregulares y están constituidos por granates, piroxenos y magnetita. Las monzonitas asociadas a los yacimientos de Ferrobamba, Chalcobamba, Charcas, Sulfobamba y Azuljaja presentan alteración potásica con biotita secundaria, feldespato potásico y magnetita (zona de mayor temperatura) pasando a una alteración propilítica con epidota, clorita, piritita y trazas de calcopiritita hacia los bordes. En general estas intrusiones obedecen a un alineamiento estructural NO-SE similar al del tren (tendencia) del batolito Andahuaylas – Yauri de dirección NO-SE.

Dado que los trabajos se han efectuado en los depósitos de Ferrobamba, se describe a continuación la geología del tajo Ferrobamba.

A. Deposito Ferrobamba

“Se encuentra ubicada en el sector Sureste del distrito de Las Bambas y es una de las áreas de mayor interés por su mineralización de Cu, con valores de Mo, Au y Ag; tiene una extensión con evidencias de mineralización de 300 hectáreas aproximadamente. La mineralización se encuentra tanto en los intrusivos como en los cuerpos irregulares de skarn que los rodean, justo al contacto con la secuencia carbonatada de la Formación Ferrobamba” (Barra Nayhua , 2017).



i. Rocas sedimentarias

En el área aflora una potente secuencia de horizontes calcáreos de la Formación Ferrobamba, constituidos por niveles de calizas con chert, calizas fosilíferas y bioclásticas, calizas impuras con clásticos finos, así como horizontes masivos y laminados. Los estratos presentan, en general, azimuts entre 100° a 130° y buzamientos variables de 50° a 60° (zona norte) y casi horizontales (al sur). En general la formación Ferrobamba, se encuentra fuertemente plegada debido a eventos tectónicos del Mesozoico superior y principios del Cenozoico. (Palomino F., 2010)

ii. Rocas intrusivas

Las calizas de la formación Ferrobamba ha sido cortada por varias fases de intrusión.

La primera fase es una monzonita biotítica (MZB), de grano medio a grueso con textura porfirítico. Aflora en gran parte en el sector sur y es una de las fases que ha formado cuerpos de skarn con mineralización de calcopirita, bornita y molibdenita.

La segunda fase y tercera fase denominadas monzonita biotítica fina (MBF), presentan grano medio a grueso, textura porfirítica, “ojos” de cuarzo irregulares, plagioclasas bimodales. Forman cuerpos de skarn con mineralización de calcopirita y bornita. El pórfido también esta mineralizado con calcopirita, bornita y molibdenita a manera de venillas con cuarzo y disseminaciones.

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

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



iii. Alteraciones y mineralización

La formación de los cuerpos de skarn de granates (GSK) y piroxeno (PSK) está asociada a las tres primeras fases de intrusión. Los cuerpos de skarn formados por la primera fase se encuentran bordeando a ésta y afloran en la parte sur, y en los sectores central y este.

Estos cuerpos de skarn presentan mineralización de sulfuros de cobre (bornita y calcopirita) en forma de masas irregulares, diseminaciones y en venillas de cuarzo. Los cuerpos de skarn formados por la segunda fase son muy similares excepto que no presentan venillas de cuarzo.

Son varios los factores que favorecieron la formación de cuerpos de skarn: la composición de los fluidos hidrotermales asociados a la fase de intrusión, los horizontes permeables de calizas, especialmente aquellos que contienen material clástico y el buzamiento de los estratos (50° a 60°) hacia las fuentes de intrusión.

Los endoskarns no son muy extendidos, en ellos se forman granates de color marrón claro, poco piroxeno, epidota, clorita, plagioclasas cálcicas, calcita y moderada silicificación. La mineralización en los endoskarn presenta calcopirita, bornita y menor molibdenita. La alteración retrógrada se caracteriza por la ocurrencia de anfíboles, epidota, especularita y calcita; estos ensambles se observan generalmente en la parte distal del sistema.

La marmolización se desarrolla sobre los horizontes de caliza, en la parte distal de un cuerpo de skarn o en contacto directo con algunos diques o cuerpos de intrusivo.

La alteración hidrotermal no está muy desarrollada. En la primera fase se presenta débil alteración potásica asociada con cuarzo. La alteración potásica ocurre como biotita secundaria y feldespatos potásicos, remplazando a minerales máficos y en la matriz; el cuarzo ocurre en matriz y venillas. En las últimas fases la alteración se presenta con máficos cloritizados, biotita secundaria, cloritas en venillas y algunas venillas de cuarzo con halos de biotita secundaria o clorita. La mayor parte de la mineralización es hipógena (> 80%), siendo bornita y calcopirita los minerales más abundantes. En los cuerpos de skarn está dominada por la presencia de bornita y calcopirita en forma de masas irregulares, coágulos, diseminaciones y algunas veces en venillas asociadas con molibdenita.



3.3. Marco teórico

3.3.1. Influencia del macizo rocoso en los resultados de una voladura

Para obtener una óptima fragmentación como resultado de una voladura de rocas, las propiedades del macizo rocoso tienen una influencia determinante por ser una variable totalmente independiente.

“Las propiedades físicas y mecánicas del mineral son muy importantes en las operaciones de perforación y voladura, por ser el medio en el que actuará los explosivos” (Ames L., 2012).

Las siguientes propiedades físicas y mecánicas del mineral tienen una influencia directa en el rendimiento de la energía producida por la detonación de un explosivo:

- **Densidad**

(Ramirez y Alejano, 2004) “En función de cómo se encuentre la roca, se puede distinguir la densidad natural y la densidad seca. La denominada densidad natural o húmeda es la relación entre la masa de una muestra de roca en su estado natural, o sea, con un cierto contenido de humedad, y el volumen que ocupa”, según el principio de Arquímedes dado en g/cm^3 se tiene:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p}$$

Donde:

ρ_p = densidad de las partículas.

m_p = masa de la muestra de roca.

V_p = volumen de las partículas.

- **Resistencia a la compresión y tracción**

Podría decirse que “[...] La resistencia a tracción y a compresión se define por la máxima tensión de tracción o de compresión respectivamente, que puede soportar el material sin romperse. Para determinar estos parámetros es necesario realizar los ensayos de tracción y compresión” (UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, 2016 pág. 3).

- **Módulo de Young**

“Representa la relación entre el esfuerzo que se aplica perpendicularmente al material y la deformación axial de ese material. Se aplica una fuerza F y se obtiene un cambio de longitud ΔL . Las rocas son un material no homogéneo y no elástico en todo rango de carga. Un material ideal tiene una relación esfuerzo/deformación lineal, pero las rocas no son un material ideal. Se toma la pendiente de la curva en la parte lineal para determinar el Módulo de Young” (Tecnología de Explosivos., 2012).



Barton (2002) “propone estimarlo a partir del parámetro denominado Q_c que se puede obtener en función del índice Q y la resistencia a compresión simple de la roca mediante la expresión:”

$$Q_c = Q \frac{\sigma_c}{100}$$

$$(GPa) = 10 \times Q_c^{1/3}$$

- **Relación de Poisson**

Cuando hablamos del coeficiente de Poisson de un material rocoso, tenemos que indicar que esta influye en los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones y estas podrían ser bastante insignificantes, razón por la cual no se suele dar mucha atención a los cálculos de esta variable.

“Se puede calcular inicialmente, aunque solamente con fines referenciales el valor del coeficiente de Poisson de la roca a través de las tablas de estimaciones generales de rocas característicos” Hoek y Brown (1985).

- **Velocidad de la onda longitudinal**

“La medida de la velocidad propagación de ondas ultrasónicas de compresión (P) y cizalladura (S) en una roca proporciona información sobre su porosidad y microfracturación; también puede detectar la alteración de la matriz rocosa policristalina. Debido a que tanto la porosidad como la micro-fracturación de una roca pueden estar orientadas según direcciones preferentes, la velocidad de las ondas ultrasónicas puede variar en consonancia. Ya que, en la mayoría de las rocas, la fase 43 de 225 sólida se puede considerar elástica, si no existiera huecos la propagación de las ondas P y S sería un fenómeno puramente elástico. En este caso, la velocidad de propagación de una onda P es función de las constantes elásticas y de la densidad de la roca y es independiente de la fuerza que ha producido la perturbación y de su duración” (Ramirez Oyanguren, y otros, 2004):

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}$$

Donde:

E : Modulo elástico de la roca

μ : Coeficiente de Poisson de la roca

ρ : Densidad de la roca



• **Porosidad**

La porosidad de una roca es el volumen de poros expresado en tanto por ciento del volumen total:

$$n = \frac{V_p}{V} \times 100 \%$$

Donde:

n = Porosidad

V = Volumen total

V_p = volumen de poros

“En algunas rocas, como las areniscas, los poros se pueden ver a simple vista, en otras sólo son visibles con el microscopio, como, por ejemplo, en los granitos; en este tipo de rocas existe una red de micro-fisuras que produce una porosidad del orden del 1%. Dichos poros y micro-fracturas están, en ciertos casos, interconectados y forman una red que permite la circulación de fluidos, que ocasionalmente pueden ocupar todos los huecos disponibles” (Ramirez y Alejano, 2004)

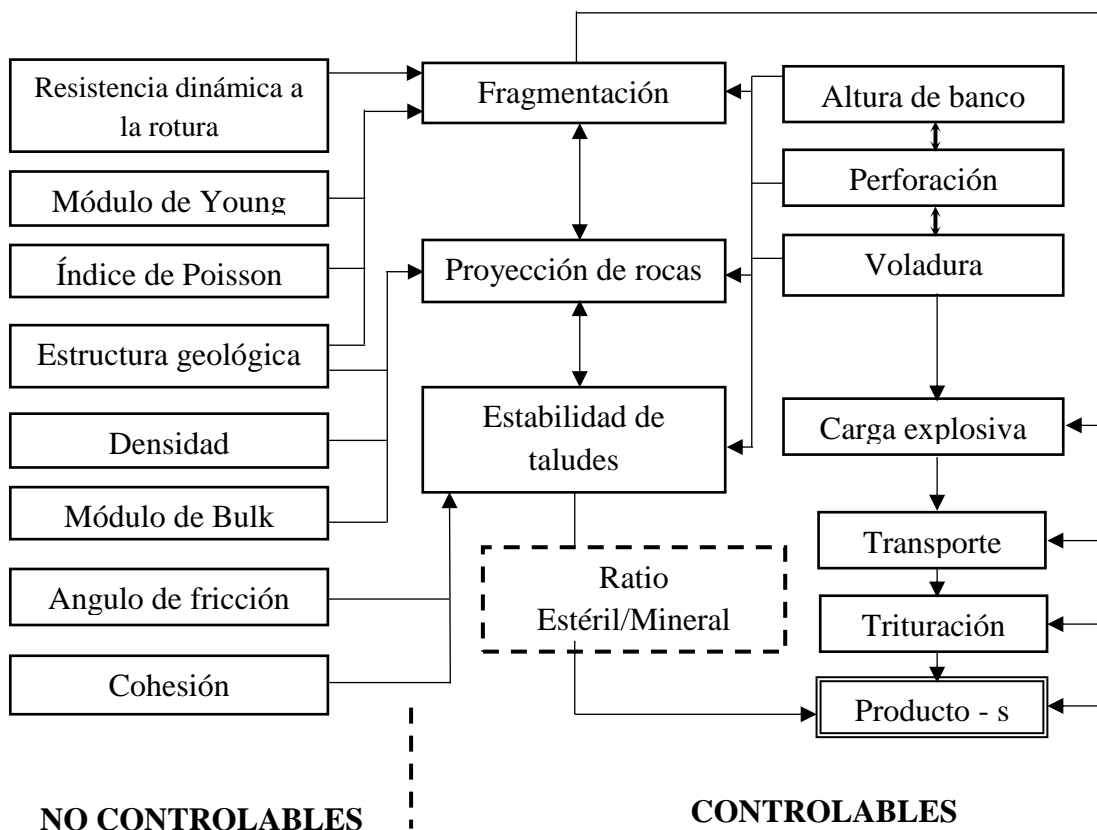


Figura 3.3: Interacción de las propiedades de la roca y las variables controlables con las operaciones mineras.

Fuente: (Ames L., 2012 pág. 9)

3.3.2. Proceso de fragmentación de la roca

“Para poder obtener una buena fragmentación, como resultado de las operaciones mineras unitarias de perforación y voladura, el proceso del fracturamiento del mineral debe ser determinado, el fracturamiento y desplazamiento del material ocurre durante y después de la detonación completa de una carga confinada dentro de un taladro” (Chiapetta, y otros, 1983)

Las etapas de tiempo son definidos como sigue:

- Detonación.
- Propagación de la onda de choque o esfuerzo.
- Expansión del gas bajo presión.
- Movimiento de la masa.

Aunque estas etapas son tratados como eventos discretos, se debe de enfatizar que en el disparo de un taladro típico, una fase del evento puede ocurrir simultáneamente con otros en intervalos de tiempo específicos.

“La mayoría de los investigadores están de acuerdo en que 3 son las etapas o fases principales que toman lugar en el proceso del fracturamiento de rocas por la acción de una mezcla explosiva comercial” (Agreda T., 2015).

- **Primera fase: fracturas radiales (brisance)**

Cuando cualquier mezcla explosiva comercial que se encuentra cargada dentro de un taladro es detonada, se producen ondas compresivas o de choque. La forma y magnitud de estas ondas compresivas que viajan a altas velocidades cuyo rango esta entre 3000 – 5000 metros por segundo, dependerá del tipo de mezcla explosiva comercial, del tipo de roca, del número y posición de los booster, altura de carga, diámetro del taladro y la relación de la velocidad de detonación con la velocidad de propagación de las ondas a través del macizo rocoso. Se debe mencionar que estas primeras fracturas radiales se producen en las zonas adyacentes a los taladros y el tiempo necesario para esto, esta entre 1 a 2 ms.

- **Segunda fase: Empuje hacia adelante (heave)**

Las presiones altas que generan los gases, ocasionan la producción de las ondas compresivas y estas a la vez serán refractadas y reflejadas.

Las ondas compresivas que son reflejadas cambiarán de signo (negativo) y se convertirán en ondas tensionales. Este cambio ocurrirá en el momento en que las ondas compresivas lleguen a una cara libre, cuando la roca cambie de densidad o cuando se encuentran fallas geológicas o planos estructurales, etc. El fracturamiento de la roca comenzara en la cara libre o en cualquier discontinuidad donde la onda compresiva es reflejada.

- **Tercera fase: fragmentación**

En esta fase se produce la fragmentación total de la roca.

Johansson (1966), menciona que: “Bajo la influencia de las altas presiones de los gases producidos por la detonación de cualquier mezcla explosiva comercial; las primeras fracturas radiales son extendidas, la cara libre falla y esta es movida hacia el frente”. Al igual que en el caso del empuje hacia adelante (heave); la primera parte del macizo rocoso es desplazada hacia adelante y la nueva cara libre reflejara lo que queda de las ondas de choque producidas por las ondas compresivas.

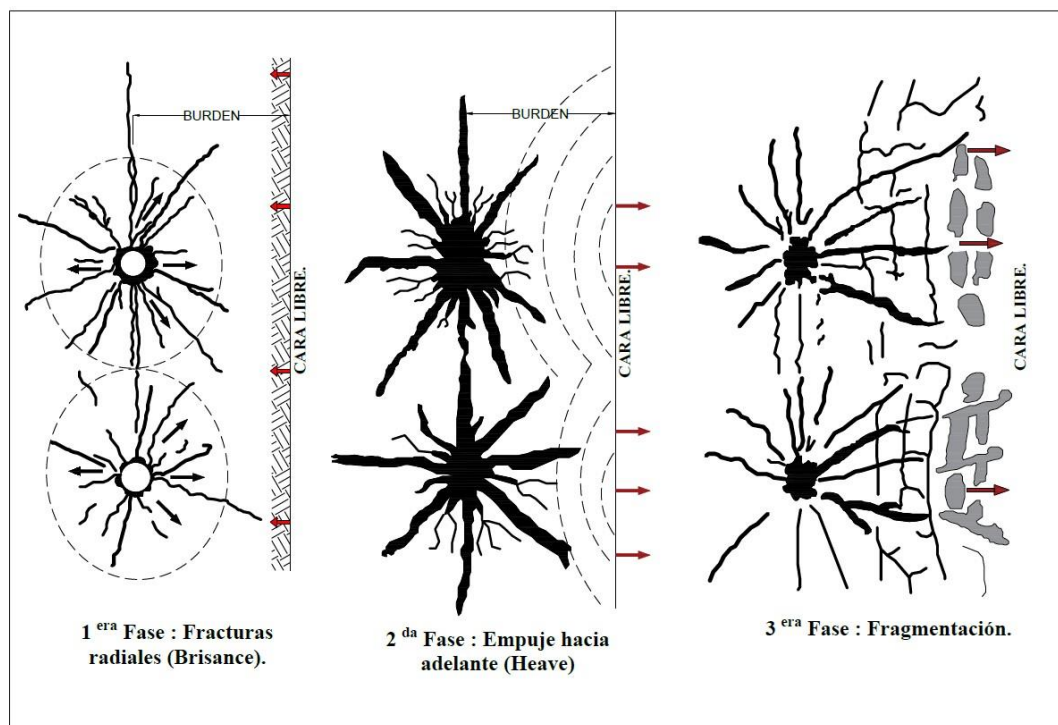


Figura 3.4: Proceso de fracturamiento de las rocas por acción de un explosivo.

Fuente: Elaboracion Propia

3.3.3. Proceso de detonación

La detonación es una reacción físico-química exotérmica que se caracteriza por la velocidad en la cual reacciona el explosivo y la generación de grandes cantidades de productos gaseosos a elevada temperatura, que producen una gran fuerza expansiva que se convierte en presión sobre el área circundante.

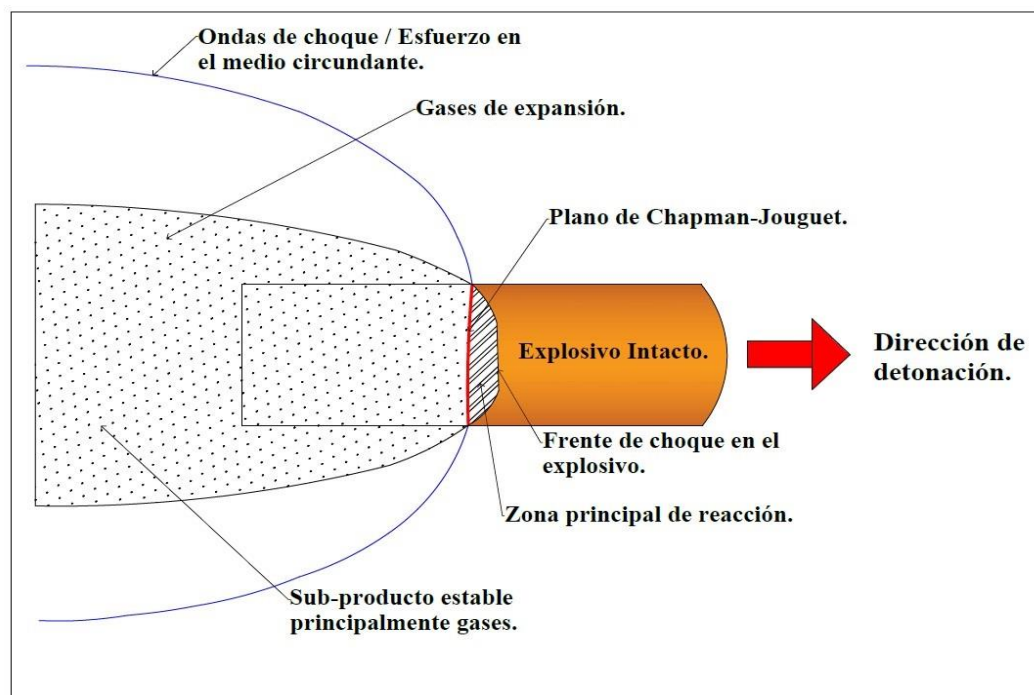


Figura 3.5: Proceso de detonación.

Fuente: Elaboración Propia

“Se puede observar dos tipos de energías como producto de la reacción química del explosivo: la energía de choque y la energía de gas. La energía de onda de choque, se propaga a través de la columna explosiva con suficiente energía para activar a la masa explosiva restante provocando así una detonación en cadena” (Ames L., 2012). Una vez liberada la energía de choque, la energía de gas también es liberada inmediatamente. La detonación de una mezcla explosiva produce una gran cantidad de gases que han sido generadas a altas temperaturas. Ambas energías generan altas presiones sobre las paredes del taladro (macizo rocoso) circundante, la presión de choque y presión de gas, son los responsables de crear fisuras, fragmentación y desplazamiento al macizo rocoso o material volado.

Según Konya C. (1988), “la presión de choque es una presión transitoria, que viaja a la velocidad de detonación del explosivo. Se estima que esta presión sólo representa del 10 % al 15 % de toda la energía de trabajo disponible en un explosivo. La presión de gas equivale del 85 % al 90 % de la energía útil del explosivo”.

3.3.4. Teorías de voladura

Ya que toda teoría propuesta por los diferentes investigadores tiene fortalezas y debilidades y son inherentes a los conceptos primordiales de cada teoría, estas son explicados con una breve descripción. Las principales teorías son:

3.3.4.1. Rotura por flexión

La teoría de rotura por flexión argumenta que la roca es como una viga rectangular que se intenta doblarlo o quebrarlo por acción de una fuerza externa. La presión del explosivo actúa por un pequeño intervalo de tiempo representado en milisegundos. Mientras que la presión de gas actúa por un prolongado intervalo de tiempo y es el encargado en un 90% de ocasionar la fragmentación del macizo rocoso.

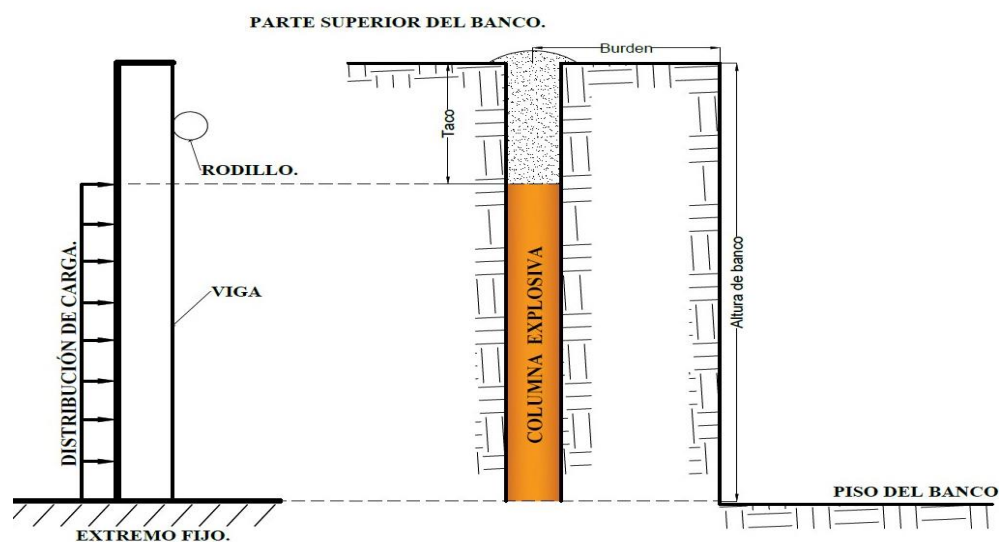


Figura 3.6: Modelo de flexión de la viga antes de la detonación.

Fuente: (Ames L., 2012 pág. 36)

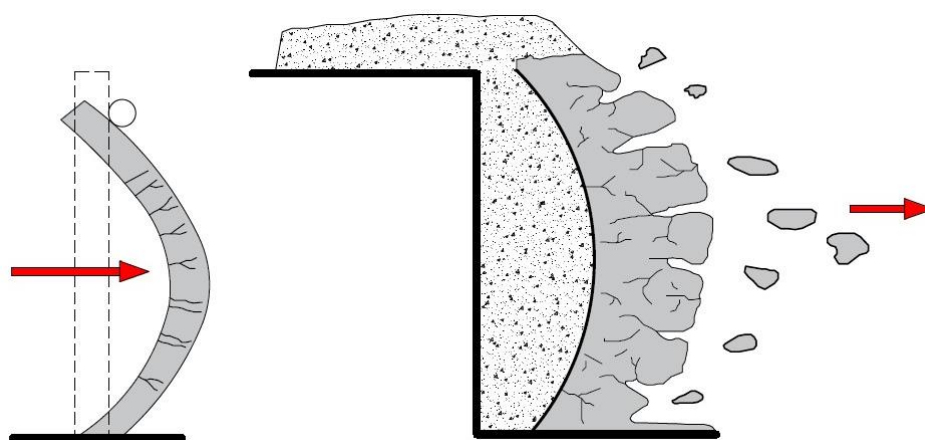


Figura 3.7: Modelo de flexión de la viga después de la detonación.

Fuente: (Ames L., 2012 pág. 36).

3.3.4.2. Teoría de la expansión de gases

Son dos puntos que destaca esta teoría producidos por la presión de los gases en expansión. Primero, las grietas se inician en las paredes del taladro radialmente y estas grietas se extienden hacia la cara libre. Segundo, el desplazamiento del material fragmentado, por la acción de los gases en gran volumen, se da una vez que las grietas llegan a la cara libre (Ames L., 2012)

3.3.4.3. Teoría de la reflexión

Esta teoría indica que las ondas de compresión generadas durante la detonación de la mezcla explosiva se propagan a través la roca y al llegar a una cara libre, estas se reflejan transformándose en ondas de tracción. Las ondas de compresión actúan agrietando mínimamente al macizo rocoso, mientras las ondas de tracción son las mayormente producen la fragmentación y el desplazamiento del material volado.

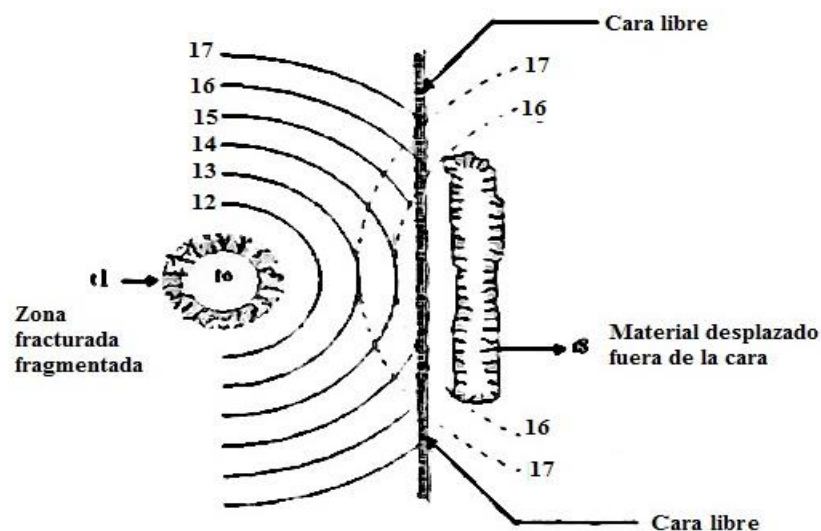


Figura 3.8: Teoría de reflexión.

Fuente: (Ames L., 2012 pág. 34).

3.3.4.4. Teoría combinada

Combina las teorías antes vistas en tres etapas. Primero, el explosivo detona ya la alta presión de taladro agrieta el área adyacente del taladro. Segundo, las ondas de compresión al alcanzar una cara libre se reflejan en ondas de tensión. Tercero, La presión de los gases en expansión amplía las grietas primarias y desplazan al material fragmentado.

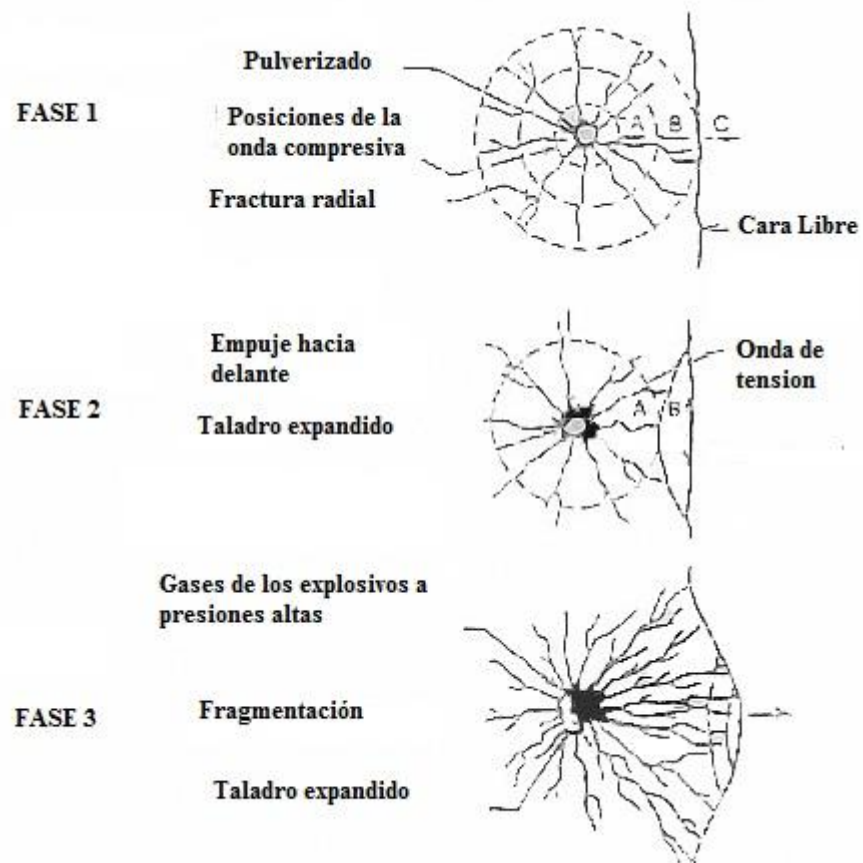


Figura 3.9: Fases del proceso de fracturamiento de la roca.
Fuente: (Ames L., 2012 pág. 40)

Sin embargo, en todos los estudios se pueden ver los siguientes efectos categóricamente identificables que se presentan uno tras otro en paralelo con intervalos de tiempo muy pequeños:

- Detonación del explosivo.
- Propagación de la onda de choque en el macizo rocoso.
- Expansión de los gases a altas temperatura y elevadas presiones.
- Desplazamiento del material fragmentado

Durante la detonación de un taladro alejado de alguna cara libre, se pueden ver el proceso de fracturamiento de la masa rocosa.

A la sazón con esta prueba de laboratorio se puede distinguir a primera vista, que en las áreas cercanas radialmente al taladro se producen los siguientes fenómenos:

- Ensanchamiento del taladro a por efecto de la compresión de la onda de detonación.

- Generación de grietas por el efecto de la tracción producido por la onda de detonación. Estas grietas son de tipo radial y a frecuentemente muy difíciles de ver.

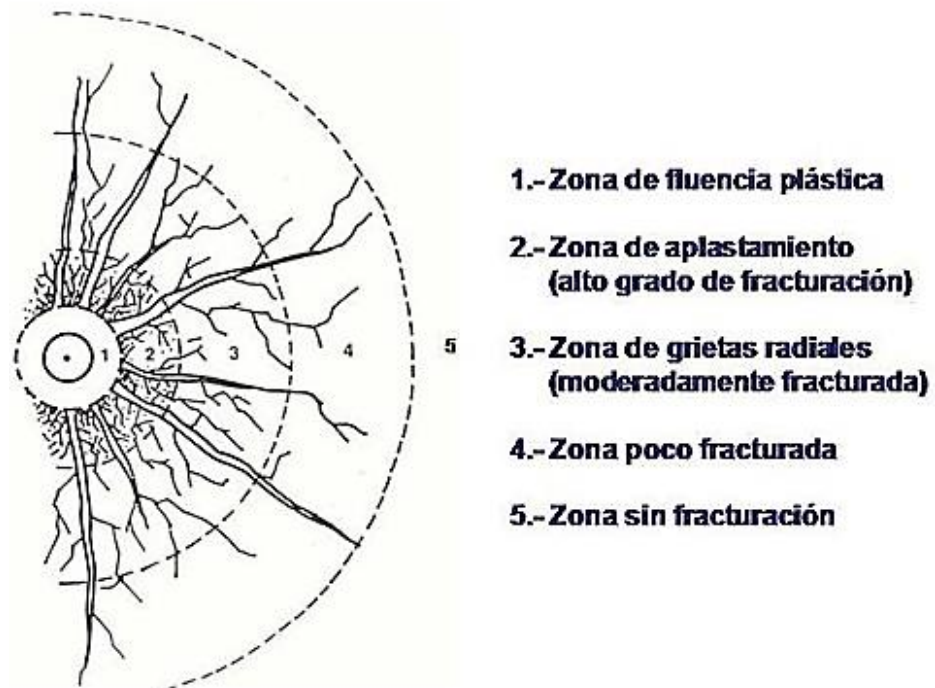


Figura 3.10: Tipos de fisuras en las proximidades del taladro.
Fuente: (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013)

“Esta fase está orientado básicamente al quiebre del macizo rocoso. En ella es empleada un porcentaje de la energía del explosivo que es parte de la onda de detonación y que no llega a alcanzar valores por encima del 10% de la energía total generada por el explosivo. En el caso de la presencia de una cara libre cerca del taladro, la onda de choque será reflejada en esa superficie de esa cara libre, generando sobre ella un esfuerzo de tracción, de esta forma la roca encuentra una libertad de desplazamiento que permite la expansión del radio fisurado y la fragmentación de la roca en esa cara libre” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

A esta primera etapa en donde se forman grietas le sigue una segunda etapa que es más lenta, que consiste en que los gases producto de la detonación del explosivo a altas presiones y temperaturas penetran por estas grietas originalmente formadas por la onda de detonación, agrandándolas totalmente y a su vez lanzándolas hacia adelante en su frente libre.

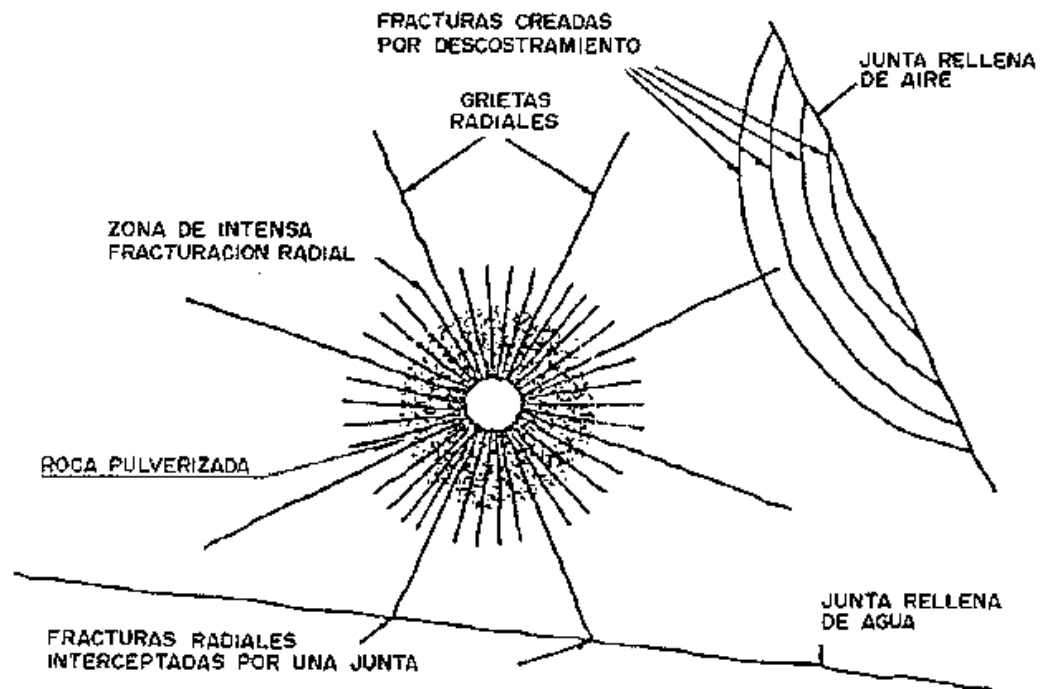


Figura 3.11: Agrietamiento radial y rotura por reflexión de la onda de choque.
Fuente: (Instituto Tecnológico Geominero de España, 2003)

3.3.5. Resultados óptimos en una voladura de rocas

Según Bernaola A., y otros, (2013) las claves para obtener una voladura óptima son:

a) Distribución de la energía

“El explosivo es un producto que implica la transformación de energía química en energía mecánica, de modo que una mala distribución nos puede dar lugar a una fragmentación no deseada o bien, a concentraciones de energía tales que afecten a elementos ajenos a la misma” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

b) Confinamiento de la energía.

“Para que el explosivo trabaje correctamente es necesario que los gases generados estén confinados en el barreno, de modo que la pérdida de energía por este hecho sea mínima” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

c) Nivel de energía explosiva

Para lograr los resultados deseados hace falta la cantidad de explosivo adecuada en cada caso.

Las tres claves para el rendimiento óptimo en voladuras, se resume en el siguiente esquema:



Figura 3.12: Triangulo de rendimiento de voladuras.
Fuente: (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

3.3.6. Mejora de la fragmentación

Cuando la presencia de fracturas en la masa rocosa es alta, es más fácil de obtener fragmentación fina y los factores de energía asociados con la voladura tienden a ser bajos. Rocas duras altamente diaclasadas o fracturadas se comportan muy similar a rocas más blandas y más débiles.

Autores como Mackenzie (1984) y el ISEE (2008), han sugerido que para lograr la máxima utilidad de la energía del explosivo en el proceso de fragmentación es necesario equiparar la impedancia del explosivo lo más cercana posible a la impedancia de la roca (ecuación 2.1). La impedancia se define como el producto de la velocidad y la densidad. Para el explosivo, la impedancia se refiere al producto de la densidad en el taladro y a la velocidad de detonación, mientras que en la roca la impedancia se define como el producto de la velocidad de las ondas P y la densidad. Luego, para una máxima fragmentación:

$$\rho_{\text{exp}} * \text{VOD} = \rho_{\text{roca}} * V_p \quad (\text{Ecuacion 2.1}).$$

Dónde:

ρ_{exp} : es la densidad del explosivo (gr/cm^3).

VOD: es la velocidad de detonación del explosivo (m/s)

V_p : es la velocidad de la onda P de la roca (m/s).

ρ_{roca} : densidad de la roca (gr/cm^3)

Basado en el deseo de la igualdad de las impedancias, rocas masivas y de alta resistencia (con velocidades P en el rango de 4500 a 6000 m/s) se fragmentan mejor con un explosivo con alta densidad y alta velocidad de detonación.

La impedancia de los explosivos nunca alcanza la impedancia máxima de la roca, debido a la baja densidad de los explosivos comerciales. Muchas rocas, sin embargo, más que fragmentación requieren desplazamiento y para este tipo de rocas la utilización de la energía de choque es de importancia secundaria comparada con la generación y utilización de la energía de levantamiento (heavy).

3.3.7. Ingeniería de explosivos

Para obtener buena fragmentación como resultado de una voladura de rocas, en primer lugar, se debe estudiar ingeniería de explosivos.

3.3.7.1. Sustancias explosivas

Las mezclas explosivas comerciales (MEC) “son una mezcla de sustancias combustibles y oxidantes que, incentivadas debidamente, dan lugar a una reacción exotérmica muy violenta, que genera una serie de productos gaseosos alta temperatura y presión” (Exsa S.A., 2012).

“Son compuestos químicos o mezclas susceptibles a descomposición muy rápida que generan instantáneamente gran volumen de gases a altas temperaturas y presión ocasionando efectos destructivos” (DS N°024-2016-EM, 2016).

3.3.7.2. Propiedades de los explosivos

- **Velocidad de detonación:** “Es la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna de explosivo. Tiene un rango que va de 1524 a 7620 m/s en los productos explosivos comerciales. La velocidad de detonación se expresa en m/s” (Konya C., 1988).
“Es también la velocidad con que viaja la onda de detonación a lo largo de una columna explosiva, sea al aire libre o en confinamiento dentro de un taladro de voladura” (Exsa S.A., 2012).
- **Densidad:** “Prácticamente expresa la masa en gramos de una sustancia contenida en un volumen de 1 cm³, esta expresada en g/cm³. En los explosivos tiene influencia determinante sobre la velocidad de detonación y la sensibilidad. La densidad de los explosivos varía entre 0,8 a 1,6 g/cm³” (Exsa S.A., 2012).



- **Presión de detonación:** “Es la presión al inicio de la zona de reacción. Cuando un explosivo detona, inmediatamente libera una presión tremenda traducida en forma de una onda de choque. Se expresa en kilobares (kbar) o en megapascales (MPa). Así, en los explosivos comerciales varía entre 500 y 1 500 MPa. La presión de detonación es la que se obtiene de manera casi instantánea como resultado del movimiento de la onda de choque a través del explosivo” (Konya C., 1988).
- **Presión de explosión:** “Es la presión de los gases producidos por la detonación, cuando estos todavía ocupan el volumen inicial del explosivo antes de cualquier expansión” (Exsa S.A., 2012).
ISEE (2008), indica que “La presión de explosión, en teoría representa el 45% de la presión de detonación”.
- **Presión de taladro:** “Es la presión que ejercen los gases sobre las paredes de taladro antes de iniciarse la deformación de la roca. La presión de taladro en términos generales equivale entre el 30 y 70 % de la presión de detonación” (Exsa S.A., 2012).

3.3.7.3. Clasificación de los explosivos

En términos generales los explosivos según la forma de producir energía se clasifican en: explosivos mecánicos, explosivos químicos y explosivos nucleares.

Explosivos Químicos: Por sus características de explosión se dividen en:

- **Altos explosivos:** detonan cuando son iniciados y alcanzan presiones de hasta 70000 kg. / cm².
- **Bajos explosivos:** deflagran cuando son iniciados y alcanzan presiones de hasta 10500 kg. / cm².

A su vez, los altos explosivos se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios por su alta energía y sensibilidad se emplean como iniciadores para detonar a los secundarios.

Explosivos Mecánicos: La energía se genera a través de la vaporización repentina de materias inertes, por medio de la introducción de un material a muy alta T°.

Explosivos Nucleares: La liberación de la energía se realiza por fusión o fisión nuclear.



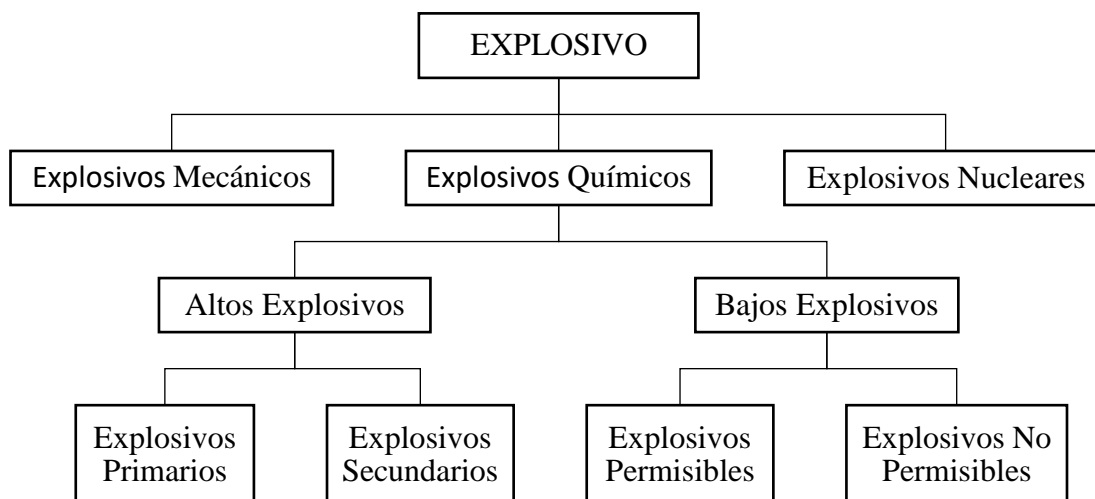


Figura 3.13: Clasificación de los explosivos.

Fuente: (Exsa S.A., 2012 pág. 31).

3.3.8. Parámetros de voladura

3.3.8.1. Cálculo de carga

Para los cálculos de carga explosiva, es importante tener en consideración lo siguiente: (Inostroza Sierra, 2014)

- Densidad del explosivo.
- Diámetro del taladro.
- Tipo de mezcla explosiva comercial (MEC).

3.3.8.2. Densidad de carga lineal

Es la cantidad de explosivo en un metro lineal para un determinado diámetro de taladro y se expresa en kilogramos por metro (Kg/m).

Un método fácil para calcular la densidad de carga lineal es aplicando la ecuación propuesta por Konya:

$$DCL = 0,507 * D^2 * \rho \quad (\text{Ecuacion 2.2}).$$

Donde:

DCL: Densidad de carga lineal (Kg/m).

D: Diámetro (pulgadas).

ρ : Densidad del Explosivo (gr/cm³).

3.3.8.3. Factor de carga

Se define como la relación del peso de la mezcla explosiva utilizado y el volumen de material volado. Esta información nos sirve para controlar los costos y el performance relativo de un tipo de explosivo (Inostroza Sierra , 2014)

$$FC = \frac{PE}{VR} \quad (\text{Ecuación 2.3}).$$

Donde:

FC: Factor de carga (kg/m^3).

PE: Peso total del explosivo (kg).

VR: Volumen de material roto (m^3).

3.3.8.4. Grado de desacoplamiento

El grado de desacoplamiento se define como la relación entre el diámetro del explosivo y el diámetro del taladro. El grado de acoplamiento de la carga explosiva y el macizo rocoso permite transmitir la onda de choque en ambos medios, adoptando un comportamiento significativo que influye directamente en el quiebre de la roca. El efecto de fragmentación depende en gran medida del contacto directo entre el explosivo y la roca. El grado de acoplamiento tiene una gran influencia sobre el confinamiento del explosivo y al mismo tiempo sobre los efectos que van a realizar los explosivos, al mismo tiempo la presión dentro del taladro disminuirá con el incremento del grado de desacoplamiento roca/explosivo. (Inostroza Sierra , 2014)

3.3.8.5. Distancia del taco

La distancia del taco se refiere a la porción superior del taladro que normalmente se rellena con material inerte para confinar los gases de la explosión. Para que una carga de alto explosivo funcione adecuadamente y libere el máximo de energía, la carga debe encontrarse confinada dentro del barreno. El taco adecuado también es necesario para controlar la proyección de roca (fly rock). La relación común para la determinación del taco es:

$$T = 0,7xB \quad (\text{Ecuación 2.4}).$$

Donde:

T: Taco (m)

B: Burden (m)



Según (Konya C., 1988) “Para el taco se recomienda emplear roca angular triturada (10% del diámetro del taladro), este material confina la energía del explosivo mejor que los detritos provenientes de la perforación”.

3.3.8.6. Cargas de explosivo

“La longitud de carga es la parte activa del taladro, es donde se produce la reacción explosiva y la presión inicial de los gases contra las paredes del taladro” (Orica Mining Services Peru S.A., 2010)

- **Carga de Fondo (CF):** Es la carga explosiva de mayor densidad y potencia requerida al fondo del taladro para romper la parte más confinada y garantizar la rasante del piso.
- **Carga de Columna (CC):** Se ubica sobre la carga de fondo y puede ser de menor densidad, potencia o concentración ya que el confinamiento de la roca en el sector del taladro es menor.
- **Cargas Segmentadas o Deck Charges:** Se emplea con el fin de disminuir la energía, pero manteniéndola distribuida en toda su longitud, se emplean cargas espaciadas con tacos inertes intermedios y con un iniciador en cada uno para garantizar su salida.

3.3.8.7. Primado de taladros

En los proyectos de voladura es necesario realizar un primado o cebado adecuado con la finalidad de iniciar a la columna explosiva dentro de los taladros. Los taladros pueden ser primados de la siguiente manera:

- Prima en el fondo del taladro.
- Primado múltiple.

Cuando las cargas no presentan caídas de velocidad, la iniciación múltiple mejora la fragmentación de la roca por la energía de tensión. Las tensiones que se producen en esos puntos de colisión son un 46% mayor que las que se obtienen con una iniciación simple (Lopez J., 2008)

3.3.8.8. Cara libre

Superficie de contacto con el medio ambiente tomando como referencia un cubo, es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión reflejadas que provocan la fragmentación. La cara libre es importante para el desplazamiento y acomodo del material en una voladura. (Orica Mining Services Peru S.A., 2012)



3.3.8.9. Distribución de energía explosiva en el taladro

“Para obtener una fragmentación óptima en una voladura, se requiere entre otros parámetros de diseño realizar una adecuada distribución de la energía explosiva en la columna del taladro, con una óptima distribución de energía, se obtiene mayor fragmentación” (Orica Mining Services Peru S.A., 2012).

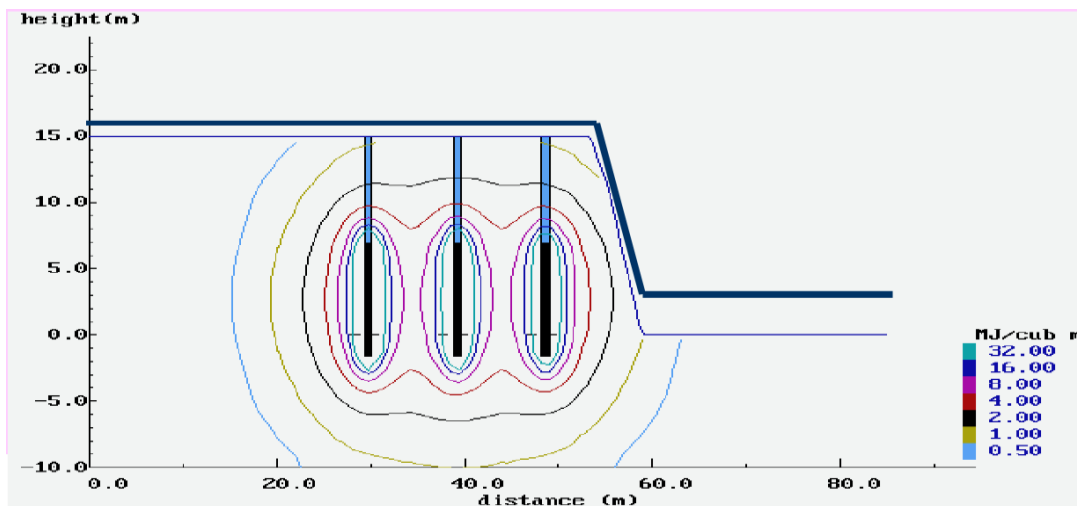


Figura 3.14: Distribución de la energía del explosivo dentro del macizo rocoso.
Fuente: (Orica Mining Services Peru S.A., 2012)

3.3.9. Ingeniería de diseño en una voladura

3.3.9.1. Elementos geométricos de un banco de voladura

Los elementos geométricos del diseño de una voladura para tajos abiertos se pueden observar en la figura 2.15.

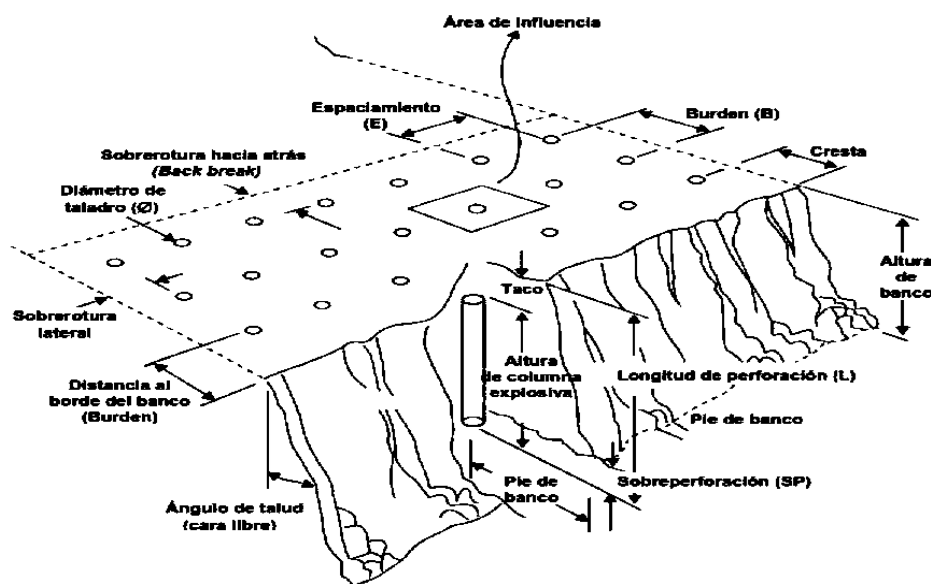


Figura 3.15: Elementos de un banco de voladura.
Fuente: (Exsa S.A., 2012 pág. 173).

3.3.9.2. Altura de banco

Generalmente la altura de banco está relacionada con el diseño del equipo de excavación, transporte, diámetro de perforación, resistencia de la roca, estructura geológica y estabilidad del talud; mineralización y aspectos de seguridad y por último del diseño del pit final.

3.3.9.3. Selección del diámetro de taladro

La selección del diámetro adecuado del taladro para cualquier trabajo requiere una evaluación en dos partes.

La primera parte considera el efecto del diámetro del taladro en la fragmentación, sople de aire, proyección de rocas y vibración del terreno.

La segunda parte considera la parte económica de la perforación.

Según Mackenzie (1984), los factores principales a evaluar para elegir el diámetro de taladro son:

- El costo que representa la voladura (\$/m³ de roca voladura).
- La fragmentación obtenida, la relación espaciado de taladro y discontinuidades.
- Control de perforación, efectos sobre fragmentación, seguridad e impacto sobre el ambiente.
- Dimensiones de los equipos de perforación y vías de acceso al sitio.
- Altura de banco y el taco requerido para la voladura.

Mackenzie (1984), sostiene que, “el diámetro de taladro deberá estar entre 0,5 % y 1% del largo requerido de taladro (por ej. Una longitud máxima de taladro de 100 a 200 veces el diámetro). Taladros de diámetro más pequeño que esto (y su correspondiente burden y espaciado más pequeño) entregará mejor fragmentación, menores vibraciones y permitirán el uso de perforadoras más livianas y móviles, pero probablemente aumentarán el costo de perforación”.

$$Hb = 150 d \quad \text{(Ecuación 2.5).}$$

Despejando “d” de la ecuación 2.5, tenemos:

$$d = Hb/150 \quad \text{(Ecuación 2.6).}$$

Donde:

Hb: altura del banco (m).

d: diámetro del taladro (m)



3.3.9.4. Burden

“Está definido como la distancia desde el eje del taladro así a la cara libre más próxima, esta tiene una dirección perpendicular a la fila de taladros. Los factores que se tienen que tener en cuenta para seleccionar el burden son: dureza de la roca, altura del banco, explosivos utilizados, desplazamiento del material volado y la fragmentación deseado”. (Konya C., 1988).

Si el burden es demasiado estrecho:

- El desplazamiento de la roca volada es demasiado.
- Presión dinámica sobre el explosivo de los taladros cercanos.
- Resultados de fragmentación muy finos.

Si el burden es demasiado amplio:

- Se produce sobre quiebre en el talud.
- Proyección o eyección de material hacia atrás.
- Eyección de las rocas durante la voladura (fly rock).
- Altos niveles de golpes de aire.
- Se da lugar a la formación de cráteres.
- Altos niveles de vibración.
- Material grueso después de la voladura.

KONYA C.(1988) Modificó la fórmula de R. L. Ash, en el modelo matemático:

$$B = 3,15 * De * \sqrt[3]{\frac{\delta_e}{\delta_r}} \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Donde:

B: burden (pies)

De: diámetro del explosivo (pulg)

δ_e : densidad del explosivo (g/cc)

δ_r : densidad de la roca (g/cc).

Según López Jimeno (2010), “es la distancia del taladro a la cara libre más cercana, orientando perpendicularmente a las líneas de los taladros. Los factores que se deben tener presente para la selección del burden son: altura de banco, dureza de roca, estructura de la roca, explosivo usado, desplazamiento deseado y fragmentación requerida”.

El Burden, es determinado a partir de diferentes modelos matemáticos, en los cuales se consideran variables de diseño y variables del macizo rocoso.

Para el cálculo del Burden se utilizó la fórmula planteada por Pearse utilizando el concepto de la energía de deformación por unidad de volumen.

$$B = K_r \times 10^{-3} \times D \times \sqrt{\frac{PD}{RT}} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Donde:

B: Burden máxima en (m).

K_r : Constante que depende de las características de las rocas (0,7 a 1,0).

D: Diámetro del taladro (mm).

PD: Presión de detonación del explosivo (Kg/cm^2).

RT: Resistencia a la tracción de la roca (Kg/cm^2).

3.3.9.5. Espaciamiento

Para López Jimeno (2010) Se define como la distancia entre taladros de una misma fila perpendiculares al burden. Se calcula en relación a la longitud del burden. La distribución de la energía explosiva, es óptima cuando el espaciamiento es igual a 1,15 veces el burden, y el patrón está en forma triangular, se debe tener en cuenta que cuando existen juntas principales paralelas a la cara libre, se pueden permitir espaciamientos más grandes.

$$E = 1,15 \times B \quad (\text{Ecuacion 2.9})$$

Donde:

E: Espaciamiento (m).

B: Burden (m).

Mackenzie (1984), sostiene que “evidencias teóricas y prácticas sugieren que la relación óptima espaciamiento/burden para operaciones normales en bancos con mallas triangulares equiláteras está en el rango de 1,1 a 1,4”.

3.3.9.6. Taco

Mackenzie (1984), sostiene que “El material óptimo para el taco es un árido granuloso (gravilla angulosa) con un tamaño medio aproximadamente igual a un décimo o un quinceavo del diámetro del taladro. Luego, un taladro de 100 mm de diámetro debería utilizar un árido de 10 a 12 mm. Bajo estas

condiciones, el largo del taco frecuentemente se puede reducir a casi 20 a 25 veces el diámetro del taladro”.

La experiencia práctica considera que el taco debería ser como máximo el 50 % de la altura de banco.

Para calcular la Longitud de Taco (T) tenemos diversos modelos:

- Según la Teoría y Modelo Matemático de Richard L. Ash:

$$T = (0,5 \text{ a } 1,0) B \quad (\text{Ecuación 2.10})$$

Dónde:

B: Burden (m)

- Según la Teoría de Calvin. J. Konya:

Roca estratificada.

$$T = B \quad (\text{Ecuación 2.11})$$

Roca masiva.

$$T = 0,72 B \quad (\text{Ecuación 2.12})$$

Dónde:

B: Burden (m).

3.3.9.7. Sobre perforación

Es la distancia que el taladro es perforado bajo nivel del piso. Cuando se obtiene malos pisos, entonces es necesario hacer reducciones en el burden. Si en caso dentro del macizo rocoso encontramos estructuras inclinadas hacia el banco, tendremos problemas en la voladura y por lo tanto se puede requerir incrementar la sobre perforación, de la misma manera estructuras inclinadas hacia el tajo pueden causar patada excesiva y requerir orientación de la cara libre.

Calvin J. Konya formula lo siguiente:

$$J = 0,3 B \quad (\text{Ecuación 2.13})$$

Donde:

L: Longitud de sobre perforación (m),

B: Burden (m).

3.3.10. Sistema de iniciación en voladura

Los sistemas de iniciación, conocidos como detonadores, pueden emplearse tanto en voladuras a cielo abierto como en subterránea y la finalidad es la de iniciar los explosivos dentro del taladro, o bien el cartucho cebo o multiplicador que desencadene la detonación en el interior del mismo (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

La selección del sistema de iniciación resulta crítica para el éxito de una voladura. El sistema de iniciación no sólo controla la secuencia de disparo de los taladros, sino que también afecta la cantidad de vibración generada por una voladura, el tamaño de la fragmentación producida y el rompimiento trasero. Aunque el costo de los sistemas de iniciación es una consideración importante dentro del proceso de selección, debe ser una consideración secundaria, especialmente si el sistema de iniciación más económico causa problemas como: vibración, rompimiento trasero o poca fragmentación. Será un error el seleccionar un sistema de Iniciación basándose estrictamente en el costo.

3.3.11. Sistema de iniciación no eléctrico

La iniciación se propaga a través de cordón detonante, tubos de choque o una combinación de ambos.

3.3.11.1. Cordón detonante

Es un cordón resistente y flexible cuyo núcleo está compuesto por “Pentrita” (PETN) cuya velocidad de detonación es de 7000 (m./s).

La potencia está directamente relacionada con el contenido de PETN del núcleo que esta expresado en gramos por metro.

Tiene una cubierta que envuelve el núcleo, está conformado por capas de fibras plásticas y compuestos impermeabilizantes y de adherencia, los cuales le dan a cada tipo de cordón las características físicas de:

- Resistencia a la tracción.
- Impermeabilidad.
- Flexibilidad.

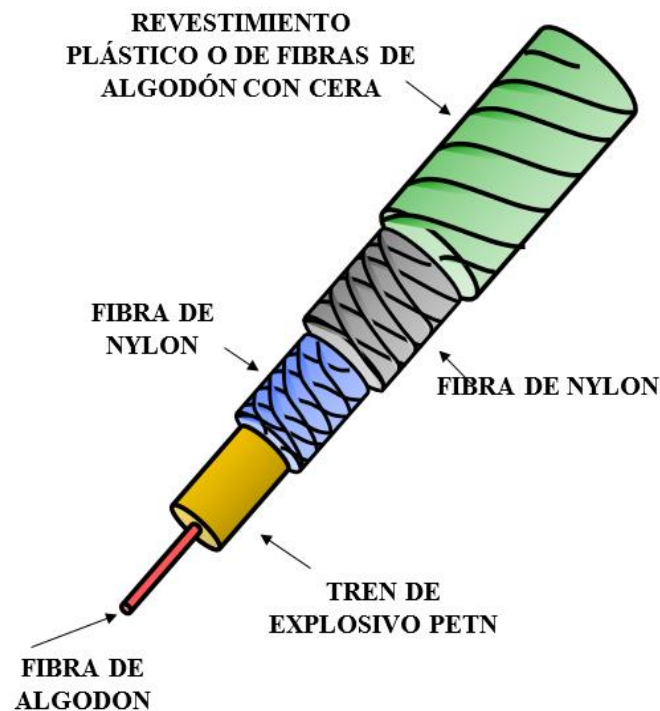


Figura 3.16: Estructura de un cordón detonante.
Fuente: (Orica Mining Services Peru S.A., 2010).

3.3.11.2. Tubo de choque

“El tubo de choque es un tubo de plástico laminado con multicapa que contiene en su interior una finísima capa de material reactivo (18 mg/m +/- 5 mg/m de HMX y Al)” (Exsa S.A., 2012). Una vez iniciado, el tubo de choque conduce una onda de detonación de baja energía con una velocidad de 2 000 m/s aproximadamente.

- **Capa externa:** Tiene una mayor resistencia a la abrasión y a la misma vez protege de la radiación ultravioleta al material pirotécnico.
- **Capa Media:** Mejora la resistencia a la tracción, elongación y el ataque de compuestos químicos.
- **Capa Interna:** Asegura que el High Melting Explosive (HMX + AL) mantenga una buena adherencia en las paredes internas del tubo que propaga la onda de choque sin ruido.

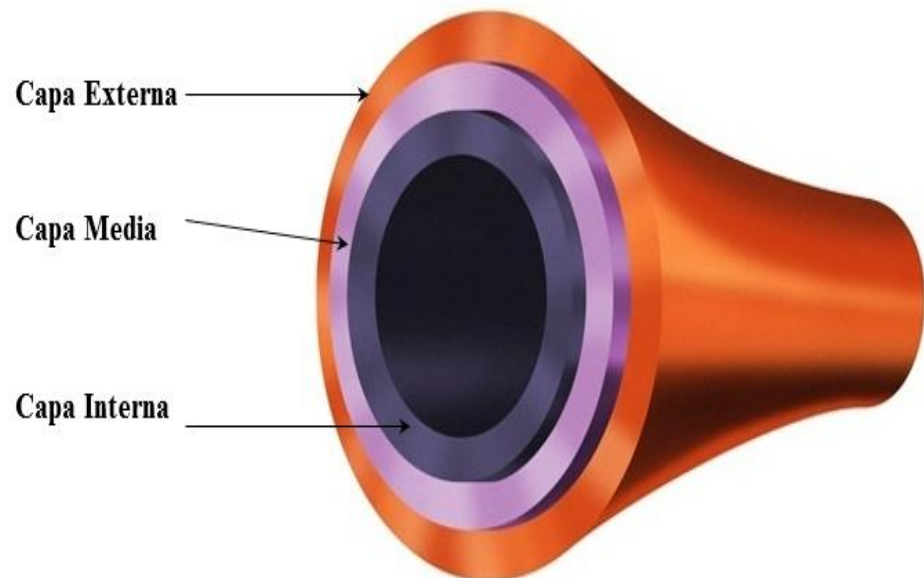


Figura 3.17: Estructura del tubo de choque.
Fuente: (Orica Mining Services Peru S.A., 2010).

3.3.11.3. Detonador no eléctrico o pirotécnico

Los detonadores no eléctricos, o pirotécnicos, se componen de los siguientes elementos:

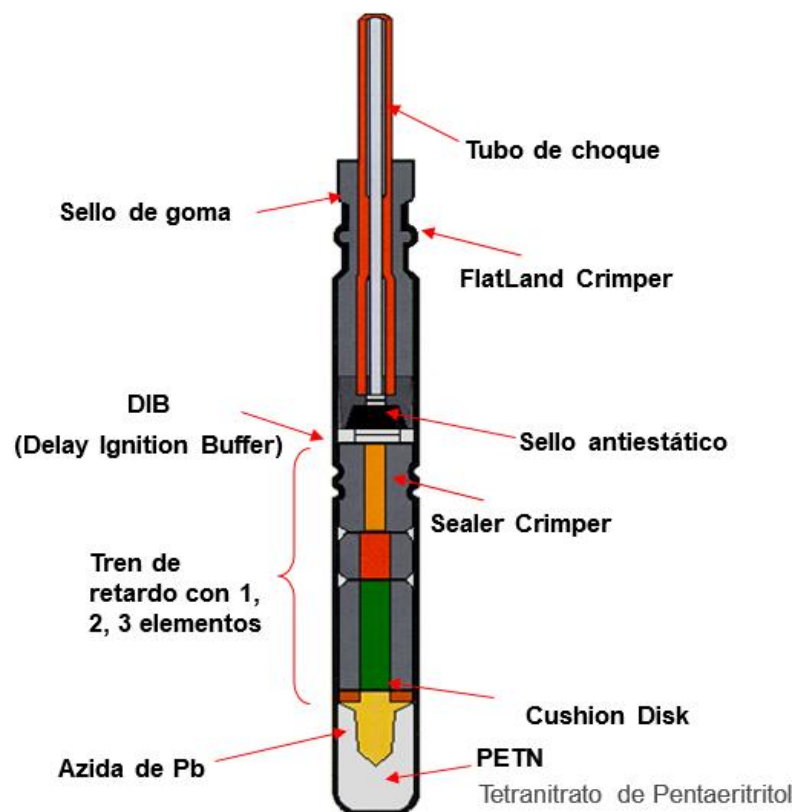


Figura 3.18: Partes de un detonador no eléctrico o pirotécnico.
Fuente: (Manual del Sistema Exel., 2010).

- **Carga Explosiva:** “En el extremo inferior, la capsula contiene una carga base de pentrita y una carga primaria de Azida de Plomo. Estas dos cargas determinan la fuerza que presenta el detonador” (Manual del Sistema Exel., 2010).
- **Cushion Disk:** Está otorga una gran resistencia al impacto por simpatía.
- **Tren de retardo:** Esta conformado de hasta elementos pirotécnicos.
- **Sealer Crimper:** Esta encargada de proporcionar hermetismo interno y un óptimo alojamiento de los diferentes elementos en el interior del detonador.
- **Delay Ignition Buffer:** Permite una elevada exactitud y evita el problema de reversión de la onda de choque.
- **Sello Antiestático:** Este elemento esta encargado de eliminar el riesgo de iniciación por energías estáticas accidentales.
- **Crimper y Sello de goma:** En conjunto ayudan a que no ingrese ningún elemento extraño dentro del detonador.

3.3.12. Sistema de iniciación electrónica

“El sistema electrónico viene junto a un paquete de software. Usando el software de diseño de voladura un ingeniero puede fabricar el diseño de voladura en la oficina, se puede simular la voladura, luego puede optimizarse el diseño. En el reto de reducir costos en la minería es de introducir tecnología en el proceso. Si bien es más costosa en comparación a los sistemas tradicionales, ésta se diferencia en que mejora y eleva la productividad de la mina y los problemas medioambientales” (Orica Mining Services Perú S.A., 2010)

3.3.12.1. Detonadores electrónicos

Estos detonadores electrónicos son considerados lo último en tecnología de los sistemas de iniciación empleado en las voladuras. Se desarrolló hace muchos años, la utilización de estos sistemas está orientado básicamente a ciertas operaciones donde se buscan unos resultados óptimos.

La diferencia entre el detonador electrónico y cualquier otro, bien sea eléctrico o no eléctrico radica básicamente en que la pasta pirotécnica que determina el tiempo de retardo en un detonador pirotécnico ha sido sustituida por un circuito electrónico, en el cual un microchip es el encargado de realizar la descarga de un condensador en el instante deseado. En los demás tipos de detonadores, el retardo viene fijado por el tiempo que

tarda en consumirse una pasta pirotécnica. Cada detonador electrónico está identificado inequívocamente con un código alfanumérico que sirve para su posterior programación y disparo. En cuanto a la carga explosiva, es igual a la que poseen los demás sistemas de detonación. De este modo, las características explosivas del detonador electrónico, son las mismas que las de otros sistemas de iniciación. La precisión en los tiempos de retardo en los detonadores electrónicos es del 0,02 %, mucho mayor que para detonadores de retardo pirotécnico.

Sobre el precio aproximado en el mercado, el detonador pirotécnico cuesta 5 dólares mientras que el detonador electrónico 25 dólares; esto varía según el proveedor. El alto costo del detonador electrónico se ve retribuido en la seguridad y en la fragmentación de las rocas lo que a su vez optimiza el carguío, acarreo de mineral, chancado y molienda.

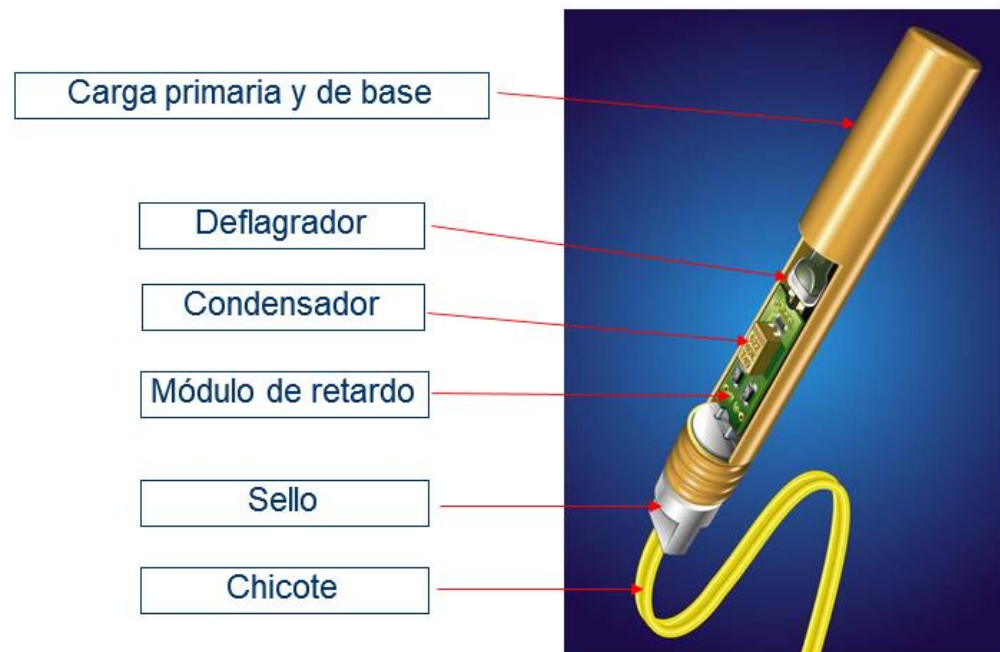


Figura 3.19: Partes de un detonador electrónico.

Fuente: (Orica Mining Services Perú S.A., 2010)

3.3.13. Secuencias de iniciación

Con la secuencia de iniciación se puede variar no sólo los desfases de tiempo entre la detonación de los distintos taladros, sino también la dirección de salida de la voladura y de movimiento de la pila de material volado (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

La iniciación secuenciada de los taladros de una voladura en banco constituye una herramienta que permite variar de forma controlada los tiempos de salida de la carga o cargas contenidas en los taladros, modificando de forma sustancial los esquemas nominales de perforación (burden, espaciamiento), pasando a otros valores más adecuados a los objetivos fijados.

Los objetivos que se pretenden con la secuencia de encendido son los siguientes:

- Conseguir mayor fragmentación, esponjamiento y el desplazamiento de la roca volada de acuerdo con las operaciones siguientes.
- Reducir las proyecciones y sobre excavaciones.
- Minimizar la intensidad de las vibraciones transmitidas al macizo rocoso y la onda aérea producida.

3.3.13.1. Retardo de taladro a taladro

$$tH = Th * S \quad (\text{Ecuación 2.14}).$$

Donde:

tH: Retardo de taladro a taladro en milisegundos (ms).

Th: Constante de retardo de taladro a taladro (ms/m).

S: Espaciamiento (m).

Tabla 3.5: Constante de retardo de tiempo entre taladros.

Tipo de roca	Constante Th (ms/m)
Arenas, Margas, Carbón	6,50
Algunas calizas, esquistos	5,50
calizas compactas y mármoles, algunos granitos y basaltos, cuarcitas, algunos gneis	4,50
feldespatos porfídicos, gneis compactos y micas, magnetitas	3,50

Fuente: (Konya C., 1988).

3.3.13.2. Retardo de fila a fila

Los lineamientos para el retardo entre filas son los siguientes:

- Los retardos cortos causan pila de roca más altas y pegadas a la cara.
- Los retardos cortos causan más rompimiento trasero.
- Los retardos cortos causan más violencia, sobrepresión de aire y vibración del terreno.
- Los retardos cortos tienen más potencial para causar roca en vuelo.
- Los retardos largos reducen los niveles de vibración.
- Los retardos largos reducen el rompimiento trasero.

$$t_r = T_H \times B \quad (\text{Ecuación 2.15}).$$

Donde:

t_r : Retardo entre filas (ms).

T_H : Factor de tiempo entre filas (ms/m).

B : Burden (m).

Tabla 3.6: Constante de retardo entre filas.

Constante T_H (ms/m)	Resultado
6,5	Violencia, sobrepresión de aire excesiva, rompimiento trasero.
8,0	Pila de material alta cercana a la cara, sobrepresión y rompimiento moderados
11,5	Altura de pila promedio, sobre rompimiento y rompimiento promedio
16,5	Pila de material disperso con rompimiento trasero mínimo.

Fuente: (Konya C., 1988).

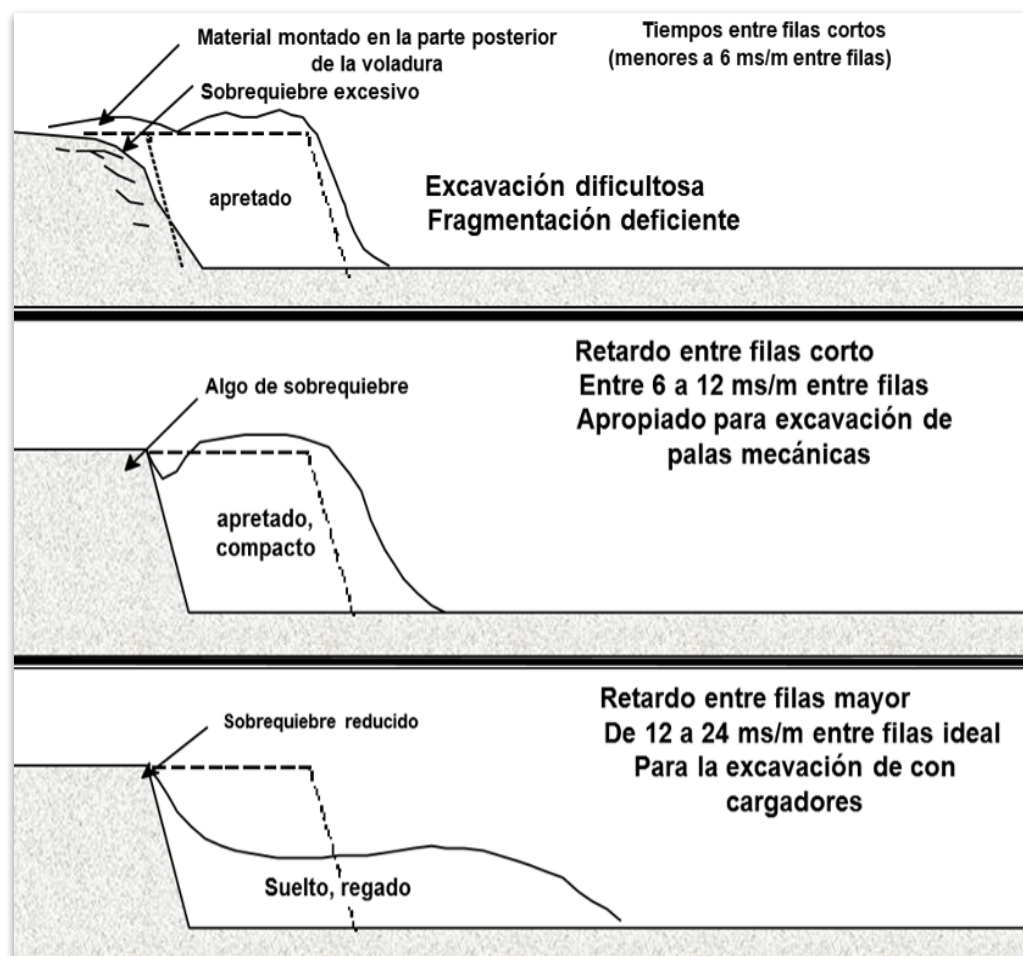


Figura 3.20: Consideraciones a tener en cuenta para el diseño de secuencias de tiempo.

Fuente: (Orica Mining Services Peru S.A., 2012).

3.3.14. Explosivos industriales utilizados en los proyectos de voladura

En la unidad minera las bombas se vienen utilizando como mezcla explosiva comercial el ANFO pesado a base de emulsión gasificable. El ANFO pesado gasificado está conformado principalmente por tres compuestos que se detalla a continuación:

- **ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil):** “Es una mezcla explosiva industrial elaborada a base de Nitrato de Amonio en forma de Prill y Diesel cuya aplicación se ha extendido en todo el mundo, debido a su seguridad en la manipulación, bajo costo y alto rendimiento energético. La mezcla de 94 % de NA y el 6 % de FO, produce el más alto rendimiento energético del ANFO” (Lopez J., 2008).

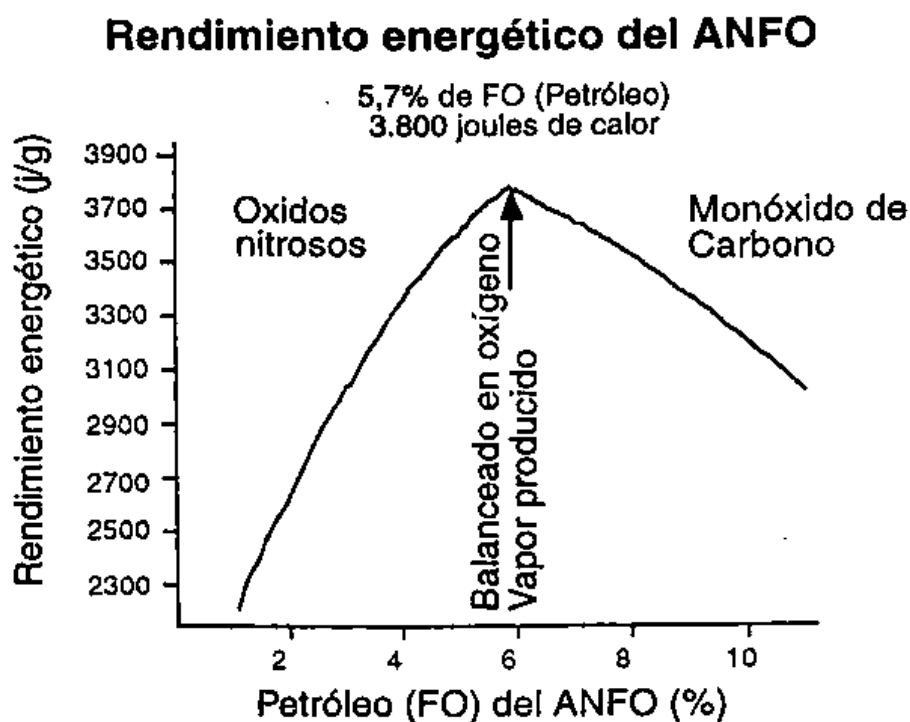


Figura 3.21: Variación de la energía de acuerdo al porcentaje de diésel.
Fuente: (Lopez J., 2008)

Mezclas inadecuadas de nitrato de amonio y petróleo producen gases tóxicos y menos energía explosiva. Por lo general es mejor que quede con más FO que con menos FO.

“Hoy en día, teniendo un balance de oxígeno correcto, el ANFO es la fuente de mayor energía explosiva más barata del mercado” (Konya & Albarrán,

1998). Sin embargo, la principal desventaja del ANFO es su nula resistencia al agua.

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

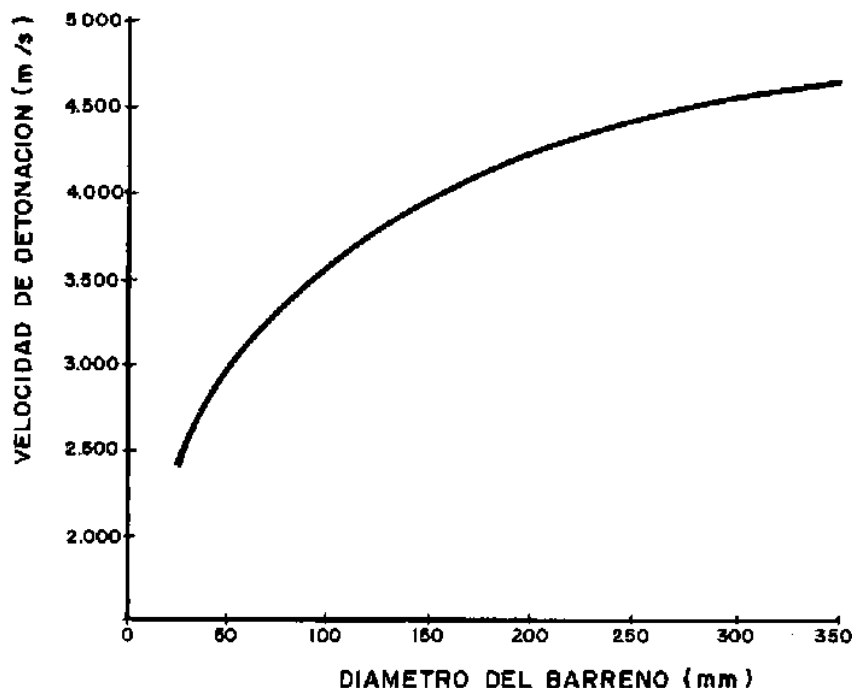


Figura 3.22: Influencia del diámetro en la velocidad de detonación.
Fuente: (Lopez J., 2008)

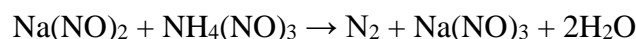
- **Emulsión:** Es una mezcla estable de al menos dos líquidos inmiscibles entre sí, en que cada uno de éstos forma una fase independiente.

Una fase se dispersa en forma de pequeñas gotas o celdas dentro de otra que forma la matriz o fase continua. Para lograr su estabilización se agregan agentes tensoactivos (emulsificantes). Las Emulsiones Explosivas son del tipo “agua en aceite”.

La emulsión pura no es un agente de voladura, debido a que no es sensible ni siquiera al booster porque su densidad es muy alta. Para sensibilizarla, se puede utilizar un mecanismo físico como la generación de burbujas de gas, las cuales al ser comprimidas adiabáticamente se comportan como puntos calientes o hot spots, favoreciendo tanto la iniciación como la propagación de la detonación. Estos agentes gasificantes pueden ser poliestireno

expandido o micro esferas de vidrio (Lopez J., 2008). A la vez, se puede aplicar la sensibilización química a través de un agente gasificante.

- **Solución gasificante:** Como solución gasificante se utiliza el Nitrito de Sodio (NaNO_2). Esta sustancia química reacciona con el nitrato de amonio (NH_4NO_3), generando pequeñas burbujas de gas nitrógeno. A continuación, se muestra la reacción química que ocurre.



Esta reacción se lleva a cabo de manera muy lenta, en promedio demora 30 minutos para obtener una gasificación óptima.

3.3.14.1. ANFO pesado

“El ANFO pesado es la mezcla de dos agentes explosivos, el ANFO y la emulsión base en diferentes proporciones, donde la emulsión envuelve los prills de ANFO, formando una matriz energética con propiedades específicas, como se muestra en la siguiente figura” (Lopez J., 2008).

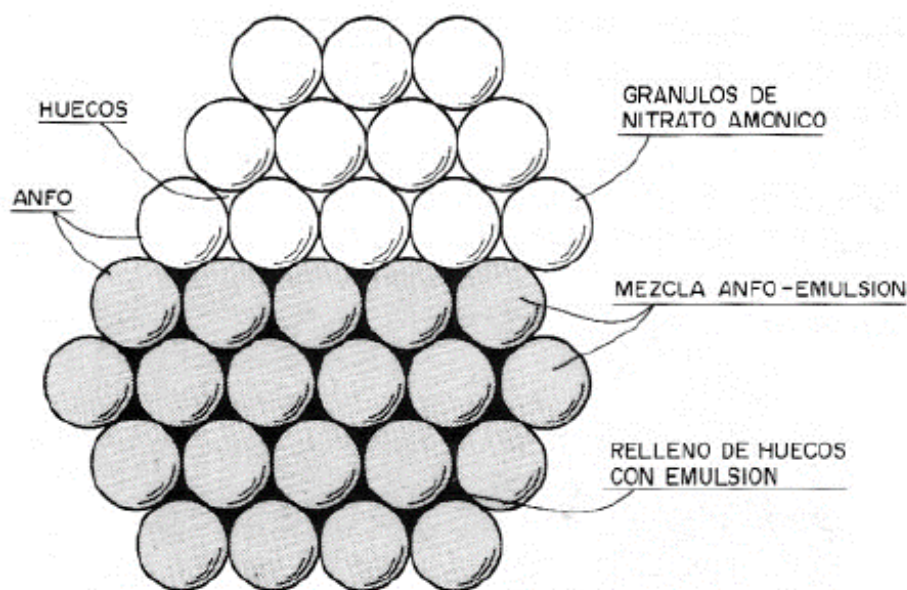


Figura 3.23: Estructura del ANFO pesado.

Fuente: (Lopez J., 2008 pág. 157)

3.3.14.2. ANFO pesado gasificado

El proceso de gasificación del ANFO Pesado consiste en formar pequeñas burbujas de nitrógeno en la matriz, las cuales actúan en forma de puntos

calientes (hot spot). Ello permite variar su densidad y sus demás características, según la cantidad de la solución gasificante que se dosifique. Esta investigación se emplea un ANFO Pesado 65/35 gasificable (65% Emulsión, 35% ANFO) y como solución gasificante se utiliza solución de nitrito de sodio (NaNO_2) al 10% en volumen.

A continuación, se muestra la gasificación que ocurre en un taladro cargado con ANFO Pesado 65-35 a base de emulsión gasificable.

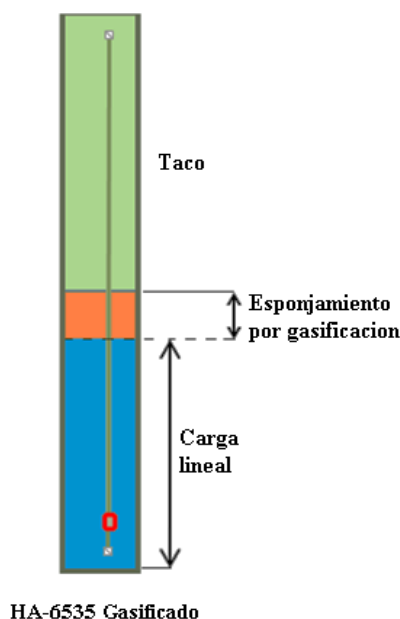


Figura 3.24: Gasificación del ANFO pesado 65/35 dentro de un taladro.
Fuente: Elaboración propia.

3.3.15. Selección de mezcla explosiva

Para optimizar la fragmentación de rocas es necesario determinar la mezcla explosiva adecuada, esto está determinado por varios factores geológicos, físicos y de diseño de perforación, para el presente proyecto analizaremos las diferentes configuraciones de emulsiones pesadas comúnmente utilizadas en las Bambas.

Las emulsiones explosivas son mezclas estables de un líquido inmiscible disperso en otro denominado “Agua en aceite” en la que la fase aceitosa está compuesta por un combustible líquido inmiscible con el agua del tipo hidrocarbonado, comúnmente diésel $\text{N}^{\circ}2$ y una fase acuosa de sales inorgánicas oxidantes disueltas en agua. No pierden sus propiedades en contacto con el agua. Carecen de un elemento explosivo en su composición y deben ser sensibilizadas mediante un mecanismo físico como la generación de burbujas de gas, las cuales al ser comprimidas adiabáticamente se comportan como puntos calientes o HOT SPOTS, favoreciendo tanto la iniciación

como la propagación de la detonación. Siendo estos agentes (microesferas de vidrio, Nitrito de Sodio, ANFO, etc.). Para detonar, requieren ser iniciadas con un cebo de alta presión de detonación (Booster, emulsión sensibilizada encartuchada).

La dificultad de fabricación de las emulsiones se encuentra en la fase aceitosa, pues, por imperativo del balance final de oxígeno, el 6 % en peso de la emulsión, que es el aceite, debe englobar al 94 % restante que se encuentra en forma de microgotas.

El ANFO pesado es una combinación de perlas de Nitrato de amonio, diésel y cuyos intersticios están rellenos por una emulsión matriz. La ventaja de las mezclas de ANFO pesado es que se puede hacer y cargar fácilmente a los taladros. La proporción en las cantidades en suspensión y ANFO puede ser cambiada y obtener ya sea un explosivo con mayor energía o uno que sea resistente al agua. La **Figura 2.25** muestra la estructura del ANFO pesado en donde la emulsión envuelve los prills de ANFO, formando una matriz energética.

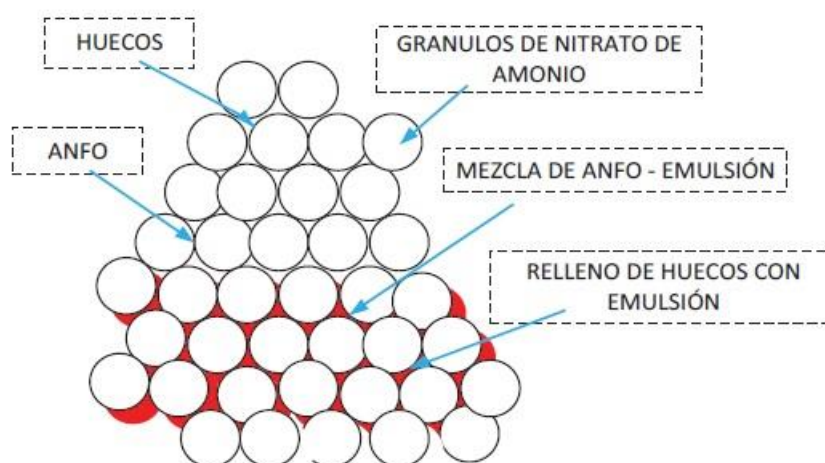


Figura 3.25: Estructura de Fortis Extra 65/35.

Fuente: (Lopez J., 2008).

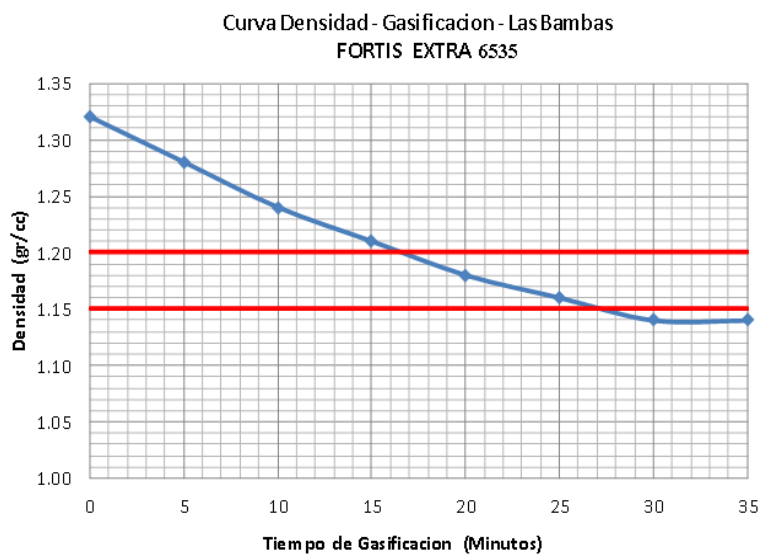
3.3.16. Controles en proyectos de voladura

3.3.16.1. Control de densidades del ANFO pesado gasificado

Es importante medir la densidad inicial y la final del ANFO Pesado gasificado. Primero, se toma una muestra en el vaso volumétrico directamente de la manga de descarga, rápidamente se limpia el material que quede fuera del depósito y se pesa. Se controla durante 30 minutos eliminando el material que rebalsa el vaso volumétrico (producto de la gasificación) cada 5 minutos y se vuelve a pesar para cuantificar el proceso de esponjamiento.

Tabla 3.7: Gasificación de Fortis Extra 65/35.

SITE		LAS BAMBAS
Concentración Nitrito de Sodio	10%	
% inyección	0.30%	
Temperatura de muestra	20° C - 25° C	
Explosivo	F. EXTRA	
NOTA: Rango de variación de densidad aceptable: 0.002 gr/cc	Minutos	DENSIDAD (gr/cc)
	0	1.32
	5	1.28
	10	1.24
	15	1.21
	20	1.18
	25	1.16
	30	1.14
	35	1.14



Fuente: Área de asistencia técnica.

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

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



Figura 3.26: Medición de la densidad en campo.

Fuente: Unidad minera las bambas.

3.3.16.2. Controles de velocidad de detonación (VOD)

Konya (1998), describe la velocidad de detonación como: “la velocidad a la cual la reacción se mueve a lo largo de la columna explosiva”, López Jimeno (2008), define la velocidad de detonación como: “La velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, por lo tanto, es el parámetro que define el ritmo de liberación de energía”. Dicha velocidad es supersónica y puede ser tan alta como 8000 m/s o a más, y es uno de los principales métodos para determinar las prestaciones de los explosivos, y esta expresado en metros por segundo.

El trabajo útil efectuada por un explosivo cargado dentro de un taladro, está ligado a la onda de choque durante la detonación, la densidad y la velocidad de detonación, cuanto más rápida sea la velocidad de explosión, tanto más grande será el choque. Por este motivo se puede utilizar la velocidad de detonación para determinar la eficiencia de una reacción explosiva (Konya, 1998). Si el producto esta detonando a una velocidad significativamente menor a lo especificado, significa que el desempeño del explosivo no está cumpliendo con las especificaciones técnicas y por ende su performance está siendo afectado. Debido a dichos postulados se considera a la velocidad de detonación como un factor crítico en el rendimiento de un explosivo, vinculado a dicho postulado afectan diversos factores como la densidad confinada, diámetro del taladro, sistema de iniciación, poder rompedor, temperatura y naturaleza química del explosivo. En la Tabla 2.8 se muestra los rangos aproximados de VOD que va de 1524 a 7620 m/s en los productos explosivos comerciales (Konya C., 1988).

Tabla 3.8: Velocidad de detonación de diferentes agentes de voladura.

AGENTES DE VOLADURA	VOD (m/s) para diámetros de taladro:		
	32 mm	76 mm	311 mm
Emulsión encartuchada	3600 - 7600	-	-
Emulsión a granel	4000 - 4600	4300 - 4900	3700 - 5800
ANFO cargado neumáticamente	2100 - 3000	3700 - 4300	4300 - 4600
ANFO vaciado	1800 - 2100	3000 - 3400	4300 - 4600
ANFO encartuchado	-	3000 - 3700	4300 - 4600
ANFO pesado	-	-	4300 - 5800

Fuente: Manual de voladura Konya, 1998

3.3.16.3. Tamaño de fragmentación

Depende de la manera en que la energía trabaja tanto entre taladros como entre filas. En los últimos 30 años, se han efectuado gran cantidad de investigaciones en muchos países determinando los efectos que el tiempo de iniciación de taladro a taladro tiene en la fragmentación y existen muchas recomendaciones diferentes en los libros referentes a cuál debe ser el tiempo óptimo de iniciación (Konya C., 1988). Es un hecho reconocido que la iniciación dentro de una cierta ventana de tiempo producirá mejores resultados gracias a la colisión de ondas generadas por la iniciación simultánea de los taladros.

3.3.16.4. Sobre quiebre (back break)

“Se refiere el daño producido más allá de los límites de una excavación (nueva cara del banco). El incremento en el sobre quiebre trasero y lateral, en general, puede controlarse con la selección apropiada del tiempo de retardo” (Agreda T., 2015).

“Si la última fila de taladros, pegado a la nueva cara del banco, tiene tiempos cortos entonces en el momento de su detonación se encontrará demasiada confinada por el material ya fragmentado, entonces la expansión de los gases será de forma vertical. Ya que la expansión de los gases comienza en el fondo del taladro causando el fracturamiento en la nueva cara del banco. Entonces el principal factor para el sobre quiebre es la expansión de los gases, y este efecto se puede minimizar asignándoles tiempos largos a los taladros de la última fila, de esta manera disminuir el confinamiento de estos taladros” (Agreda T., 2015).

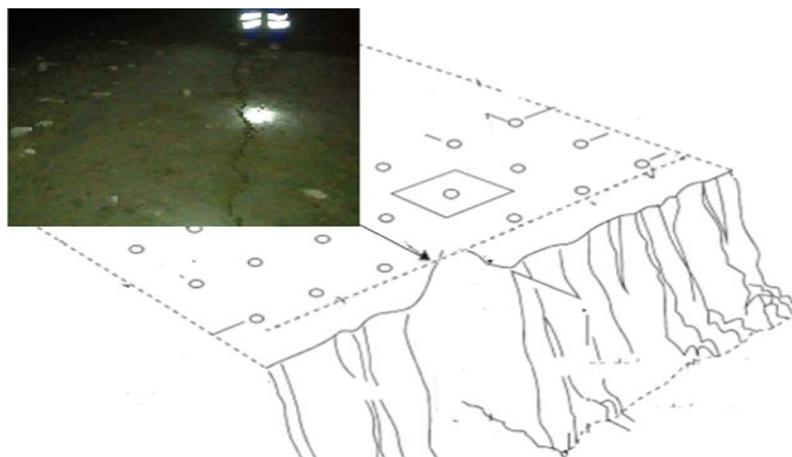


Figura 3.27: Sobre quiebre trasero hacia la cara libre del nuevo banco.
Fuente: (Agreda T., 2015).

3.3.16.5. Proyección de rocas (fly rock)

“La mayoría de los fragmentos producidos en una voladura no se desplazan más allá de 40 o 50 metros. Sin embargo, siempre hay algunos que, por circunstancias especiales, salen lanzados a mucha mayor distancia que podrían variar de 100 hasta 1000 metros” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).

Normalmente, un correcto diseño de la voladura es suficiente para acotar de forma efectiva este riesgo. A tal respecto, habrá de cuidarse:

- Que la distancia a la cara libre de los taladros y la separación de éstos entre sí estén adecuadamente dimensionadas.
- Que la secuencia de encendido sea la correcta.
- Que el explosivo se haya repartido uniformemente a lo largo del barreno evitando sobre todo la acumulación del mismo en zonas próximas a la superficie.

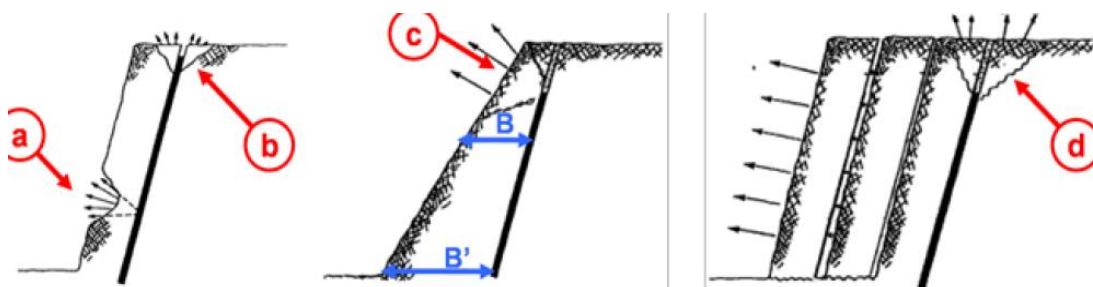


Figura 3.28: Casos de posible riesgo de proyecciones (a) Frente irregular; (b) Sobrecarga de barrenos (c) Zonas de acumulación de explosivo; (d) Mala secuenciación.

Fuente: (Hustrulid, 1999 págs. 287,288).

3.3.16.6. Control de vibraciones

La vibración del terreno es controlada por el tiempo de iniciación. El tiempo de iniciación afecta a la vibración de dos formas separadas. Por ejemplo, si el retardo en el tiempo de iniciación de fila a fila es muy corto, existe una resistencia añadida en los taladros de la segunda fila se obtiene menos fragmentación y un porcentaje mayor de la energía total se convierte en energía sísmica provocando problemas con la vibración del terreno.

Se sabe que un exceso en el confinamiento de los taladros eleva los niveles de vibración hasta en un 500 % (Konya C., 1988).

El tiempo de iniciación de taladro a taladro también puede afectar la vibración, ya que, si se tiene un incremento en el alivio de cada taladro, la fragmentación aumenta y los efectos sísmicos disminuyen. Para controlar la vibración durante la voladura es necesario que los tiempos de retardo a cada taladro sean tal que aseguren que las vibraciones de la detonación de un taladro se disipen antes que detone el taladro siguiente taladro. Es de esta manera se controla que los efectos de taladros sean independientes y que no sumen entre dos o más sus niveles de vibración.

3.3.17. Tiros cortados (Tc) y/o taladros quedados

Se refiere a la presencia de un taladro con mezcla explosiva y accesorios de voladura (detonadores electrónicos y/o pirotécnicos) que no ha detonado después de haberse iniciado, esto sucede por la interrupción (corte o daño) en la línea descendente. Esto pudo haber ocurrido antes o durante la voladura. Son causados principalmente por:

- Incumplimiento de los PETS de carguío, primado, amarre y tapado de taladros.
- Caída de piedras al interior del taladro durante el carguío y que al desplazarse dañan o cortan las líneas descendentes de iniciación.
- Caída de piedras de tamaño considerable al interior del taladro durante la colocación del taco.
- Falla en los sistemas de iniciación por efecto de calidad del accesorio. (Detonador electrónico, Fanel, etc.)

A continuación, se citan algunas definiciones:

- Un tiro cortado se define como: “La falta de detonar de una carga explosiva en el momento correcto” (Atlas Powder Company, 2012) .
- Según Safety Library Publications Number 17 (SLP #17) define un taladro quedado como: “Una voladura o barreno determinado que no detona según se planificó. Además, incluye el concepto de materiales explosivos que no detona cuando esté correctamente iniciada” (IME, 2014).
- “Un taladro quedado puede considerarse como cualquier carga explosiva que no detona cuando esté correctamente iniciada” (Powder International, 2012).

De acuerdo a las referencias citadas anteriormente se puede concluir que el término tiro cortado se define como un taladro con carga explosiva o restos de explosivo que no ha detonado según lo planificado ya sea por la ocurrencia de daño de las líneas



descendentes, errores operativos o falla del producto. Este es un peligro de alto potencial y que la mejor forma de evitarlos es prevenirlo.

3.3.18. Principales causas que producen taladros cortados

3.3.18.1. Falla de producto

La identificación de falla de producto en caso de detonadores electrónicos es más fácil, puesto que nos permite identificar si el detonador realizará su cometido por la comunicación bidireccional. En caso de los detonadores pirotécnicos (no eléctricos) es más difícil la identificación de una eventual falla de producto.

3.3.18.2. Presión dinámica

“Todo cuerpo en la tierra está sometido a la acción de la presión atmosférica y cualquier presión adicional que sea ejercida sobre su superficie es denominada dinámica. La presión total sobre un objeto impactado por cualquier fuerza es la suma de las presiones estática y dinámica” (Lownds C., 2000).

La presión dinámica es un fenómeno inherente al proceso de voladura y se transmite a los taladros adyacentes debido esencialmente a tres mecanismos:

- Transmisión de la onda de choque a través del medio rocoso y la columna explosiva del taladro contiguo (medio circundante del booster).
- Deformación de taladros y aprisionamiento de las cargas y el booster por desplazamiento del macizo (bloques).
- Acción de los gases producto de la detonación a altas presiones y temperaturas, que fluyen por fracturas a través de la roca.

“Estos factores pueden verse resaltados, si el medio está constituido por rocas altamente fracturadas, débiles y/o saturadas en agua” (Humeres, y otros, 2014).

De acuerdo a las referencias citadas se puede afirmar que la presión dinámica es un fenómeno que afecta principalmente a los detonadores electrónicos provocando deformaciones en su estructura e inhabilitándolo, este suceso imposibilita la iniciación de la carga explosiva dentro del taladro generando un tiro cortado.



Figura 3.29: Detonador fallado por efecto de la presión dinámica.
Fuente: (Area de Asistencia Tecnica - MMG Las Bambas, 2017).

Los factores que influyen para la generación de presión dinámica son:

- Geológicos (presencia de estructuras y fallas).
- Taladros muy cercanos (Burden y Espacio).
- Tiempos de retardos muy prolongados.
- Presencia de agua en los taladros.

Existen curvas de ajuste para la influencia del fenómeno de presión dinámica entre taladros, en el siguiente grafico se demuestra el ajuste para diferentes diámetros de taladros.

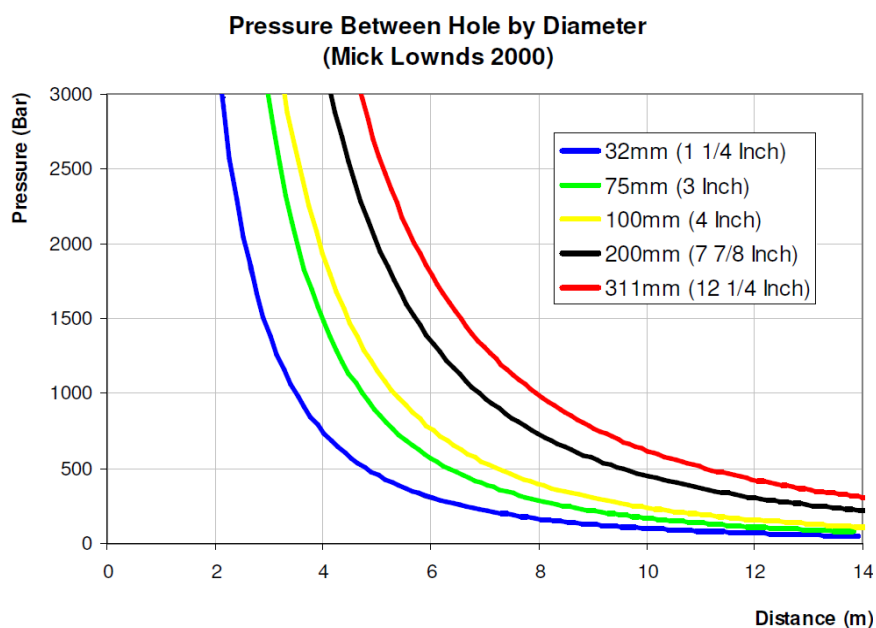


Figura 3.30: Presión vs distancia para diferentes diámetros de perforación.
Fuente: (Area de Asistencia Tecnica - MMG Las Bambas, 2017)

3.3.19. Principales causas que producen tiros cortados

3.3.19.1. No simpatía o desacople –Detonador/Booster

Causado por manipulación deficiente o falla de los productos explosivos provocando la falta de simpatía entre el detonador y Booster. El desacople detonador-booster ocurre generalmente por el mal primado, siendo este un error netamente operacional.



Figura 3.31: Primado de detonador pirotécnico con Booster.
Fuente: (*Curso de explosivos y voladura Dyno nobel*, 2016).

3.3.19.2. Errores operativos durante el carguío

En esta parte se describen los errores operativos, practicas incorrectas debido al incumplimiento de los procedimientos carguío de taladros y/o manipulación de los explosivos, cuyas causas frecuentes son:

- Exceso de confianza.
- No cumplir los procedimientos escritos de trabajo.
- Capacitación deficiente.
- Falta de experiencia.

Según (*Curso de explosivos y voladura Dyno nobel*, 2016) Estos errores operativos pueden resultar en cortes o daños en la línea descendente debido:

- Detritus de perforación que cae dentro del taladro; cuyas razones comunes son por arrastrado de material, carguío con sacos, carguío mecanizado, colocación del taco. Figura 2.32 y figura 2.33.

- Fallas o cortes en el sistema de iniciación; estas fallas se presentan en la línea troncal y descendente, conexiones defectuosas, fallas de tubo de choque. Ver figura 2.32.
- “Daño en aislación ocurre generalmente durante el proceso de carguío o tapado de taladros, esto debido a que, al depositar el material de tapado, se produce un roce entre la línea descendente y el material, lo cual ocasiona que el aislante de los conductores del detonador se deteriore o se corte. Lo que producirá fugas de corriente o pérdidas de voltaje” (Curso de explosivos y voladura Dyno nobel , 2016). Ver figura 2.33.

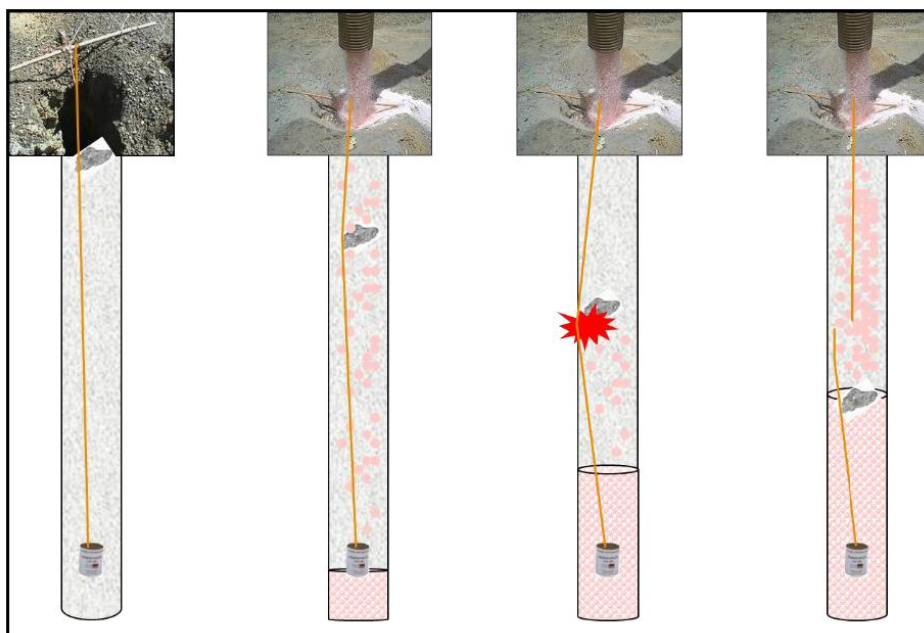


Figura 3.32: Corte debido a caída de detritus.

Fuente: (Curso de explosivos y voladura Dyno nobel , 2016)

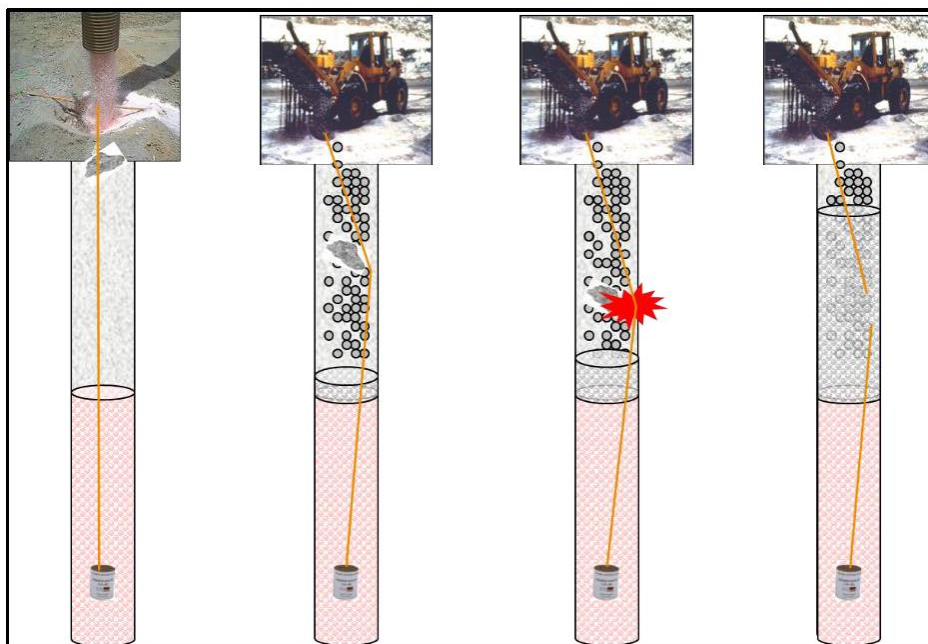


Figura 3.33: Corte debido a la colocación del taco.

Fuente: (Curso de explosivos y voladura Dyno nobel , 2016)

CORTE DE TUBO DE CHOQUE POR SITUACIONES OPERACIONALES

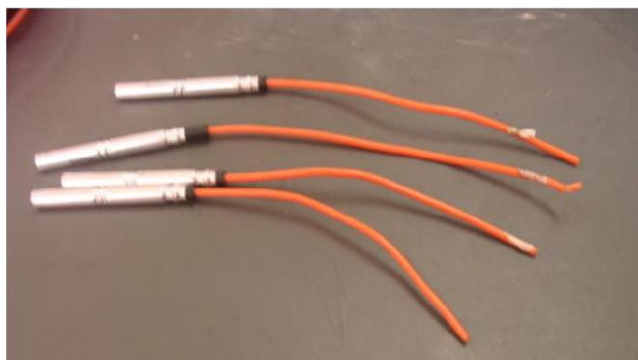


Figura 3.34: Corte debido a situaciones operacionales.

Fuente: (Curso de explosivos y voladura Dyno nobel , 2016)

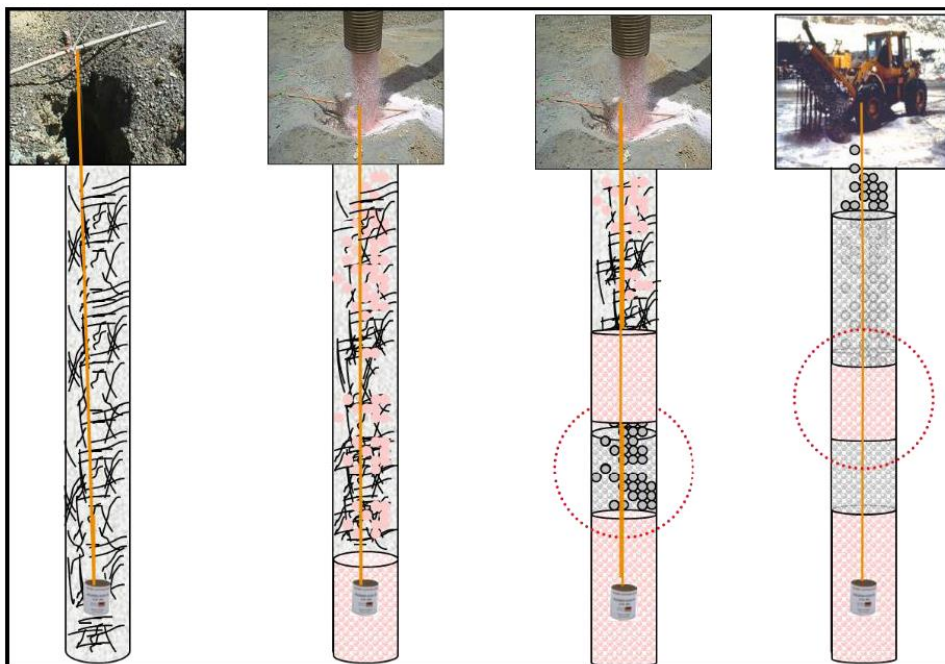


Figura 3.35: Corte debido al desacoplamiento de carga explosiva, falta de simpatía.
Fuente: (Curso de explosivos y voladura Dyno nobel , 2016)

3.3.19.3. Corte por estructuras geológicas

Cortes provocados por desplazamiento de estructuras geológicas, provocada durante la voladura y tiempos de retardo. Ver figura 236.



Figura 3.36: Corte debido a desplazamiento de estructuras geológicas.
Fuente: (Curso de explosivos y voladura Dyno nobel , 2016)

3.3.19.4. Detonación prematura (no planificada)

Es cuando una carga explosiva de un taladro detona antes de lo esperado sin que haya habido una señal clara e intencional de iniciación. Las causas principales de una detonación prematura o anticipada son:

- Interconexión entre taladros por presencia de cavernas o fallas.
- Reacción del explosivo con el material de las paredes del taladro (ANFO con pirita).

La detonación anticipada podría producir corte de las líneas troncales interrumpiendo la iniciación de taladros.

3.3.19.5. Desconexión de cables

El conector de los detonadores pierde contacto con el cable de conexión debido a una deficiente manipulación, causando problemas de conductividad.

3.3.20. Control de tiros cortados

Primado múltiple: Mediante el primado múltiple (dos o más primas) será posible eliminar las probabilidades de ocurrencia de un tiro cortado, ya que al contar con dos o más primas se tiene la ventaja de poder iniciar la prima con el detonador fallado con una segunda o tercera prima.

Back up: Es la utilización y conexión de un respaldo, este respaldo será un detonador no eléctrico (detonador con tubo de choque), este servirá para garantizar la detonación de la carga explosiva cuando el detonador electrónico falla debido a algún daño o corte.

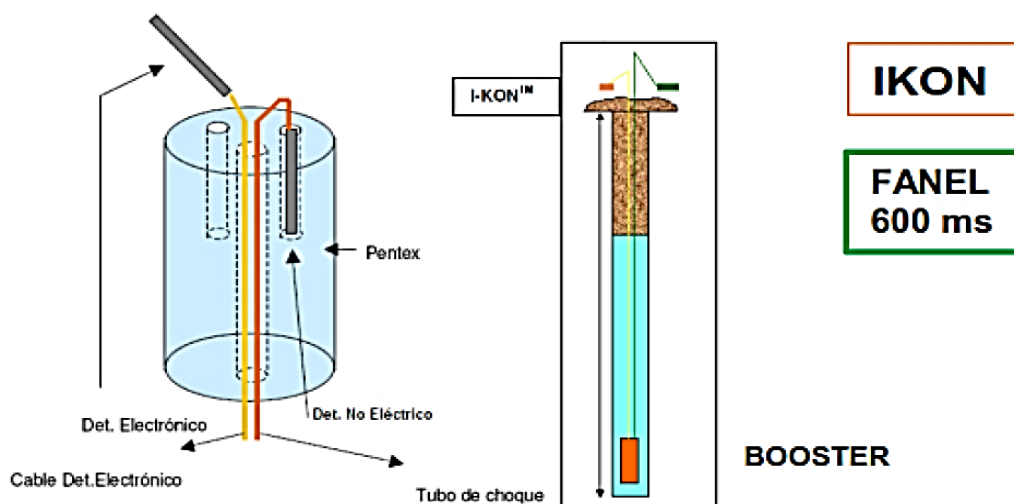


Figura 3.37: Diagrama de Back Up.

Fuente: (Curso de explosivos y voladura ORICA, 2016).

3.3.21. Proceso de perforación y voladura en MMG – Las Bambas

En la parte operativa del proceso de perforación y voladura intervienen principalmente tres áreas importantes que se describen a continuación:

- 1°. **Área de planeamiento de perforación y voladura:** El área de planeamiento a corto plazo es el encargado de realizar la elaboración de la secuencia de perforación, sectorización de zonas por polígonos y diseñar la malla de perforación con el soporte del área de geotecnia y geología. Estos procesos se realizan considerando el plan anual, mensual y semanal de la gerencia de operaciones.
- 2°. **Ore control (Geología):** El área de ore control es el encargado de realizar la toma de muestras de los detritus de perforación, esto con la finalidad de estimar el tipo de roca y la presencia de mineralización dentro de la malla de voladura, este trabajo es diario y se realiza antes de iniciar el carguío de los taladros.
- 3°. **Área de perforación y voladura:** El área de perforación y voladura es el encargado de ejecutar la perforación y voladura de los taladros, para lo cual este proceso inicia con la ubicación de equipos y perforación de taladros.
Los trabajos de voladura inician con la medición de la profundidad de taladros, señalización y delimitación del área de voladura, carguío de taladros con explosivo, tapado de taladros, amarre, detonación de taladros, inspección post voladura y evaluación de resultados (fragmentación).

3.4. Marco conceptual

- a. **Altura de banco:** “Distancia vertical entre dos bancos adyacentes” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).
- b. **Back up:** “Conformado por un detonador pirotécnico (tubo de choque más detonador) que actúa como un detonador auxiliar en caso de la ocurrencia de alguna falla con el detonador electrónico” (Orica Mining Services Peru S.A., 2012).
- c. **Booster:** “Alto explosivo utilizado para iniciar la detonación de la columna explosiva, por lo general se utilizan explosivos encartuchados de alta velocidad de detonación tales como el booster de pentolita” (Orica Mining Services Perú S.A., 2010).
- d. **Buffer:** “Taladros de burden, espaciamiento y longitud de carga reducida, estos taladros son utilizados en voladuras amortiguadas y están ubicados entre la última fila de contorno y los taladros de pre corte” (Agreda T., 2015).
- e. **Burden:** “Es la distancia del taladro a la cara libre más cercana, orientado perpendicularmente al eje del taladro” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).



- f. **Cara libre:** “Superficie de contacto con el medio ambiente, es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión relejadas que provocan la fragmentación” (Exsa S.A., 2012).
- g. **Carga explosiva:** Cantidad de mezcla explosiva utilizado en un taladro de voladura o accesorio de voladura.
- h. **Carguío:** Una de las etapas que forma parte del proceso de voladura a tajo abierto. Se refiere específicamente a la deposición de la mezcla explosiva comercial dentro de los taladros.
- i. **Desplazamiento:** “Consiste en el movimiento de la masa rocosa triturada como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos hacia una dirección establecida” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).
- j. **Detonador:** “Es un dispositivo que contiene una carga para iniciar un explosivo, al que normalmente se le conoce con el nombre de fulminante. Pueden ser electrónicos o no, instantáneos o con retardo” (Orica Mining Services Peru S.A., 2012).
- k. **Detonador electrónico:** “Los detonadores electrónicos tienen un microchip que actualmente se puede programar en incrementos de milisegundos (ms). Esto es mucho más preciso que los iniciadores pirotécnicos que a su vez son más baratos, donde el tiempo de retardo viene de una longitud especificada de elemento pirotécnico. A veces, la imprecisión en estos puede hacer que los agujeros se disparen fuera de secuencia” (Orica Mining Services Peru S.A., 2012).
- l. **Espaciamiento:** “Se define como la distancia entre taladros de una misma fila perpendiculares al Burden” (BERNAOLA ALONSO, y otros, 2013).
- m. **Explosivos:** Son compuestos o mezclas de sustancias 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 microsegundo, en productos gaseosos y condensados, cuyo volumen inicial se convierte en una masa gaseosa que llega a alcanzar muy altas temperaturas y en consecuencia muy elevadas presiones (Exsa S.A., 2012).
- n. **Factor de carga:** “Es la relación entre el peso de explosivo utilizado y el volumen de material roto” (ENAEX S.A., 2014).
- o. **Fragmentación:** “Es la reducción del macizo rocoso a partículas de menor tamaño en un área determinado como consecuencia de la acción ejercida por los explosivos” (ENAEX S.A., 2014).
- p. **Malla:** Es la forma geométrica en la que se disponen los taladros de una voladura, considerando básicamente la relación burden y espaciamiento.



- q. **Taladro:** “Agujero cilíndrico producto de la perforación en la cual se deposita la mezcla explosiva comercial de acuerdo a un diseño” (Exsa S.A., 2012).
- r. **Taco:** “Porción superior del barreno que normalmente se rellena con material inerte, el taco es vital para contener la energía explosiva dentro de la masa rocosa para la fragmentación en lugar de escapar a la parte superior del taladro de voladura. Sin embargo, esta área no tiene carga explosiva y produce fragmentos más grandes como resultado” (Exsa S.A., 2012).
- s. **Tiro cortado:** “Se define como un taladro con carga explosiva que no ha detonado según lo planificado, es un evento de extrema peligrosidad” (ENAEX S.A., 2014).
- t. **Voladura de rocas:** Es un proceso en la cual las presiones generadas por la detonación de explosivos dentro de taladros, originan una zona de alta concentración de energía que producen dos efectos dinámicos: fragmentación y desplazamiento.
- u. **Software Power Sieve:** “Herramienta de medición de fragmentación de Orica. La entrada es fotografías de la cara de fragmentación. Luego, los usuarios procesan previamente las imágenes para el análisis automático y la determinación de la distribución” (Orica Mining Services Peru S.A., 2010)
- v. **Doble iniciación:** Es una variable del primado múltiple que consiste en colocar dos iniciadores dentro de la columna explosiva en un mismo taladro.
- w. **Triple iniciación:** Es una variable del primado múltiple que consiste en colocar tres iniciadores dentro de la columna explosiva en un mismo taladro.



CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

La investigación que se realizó, posee características de acuerdo a los objetivos planteados, por lo cual se le atribuye ser de tipo descriptivo y comparativo.

4.2. Diseño de la investigación

El diseño de investigación aplicado al presente trabajo es descriptivo comparativo. **Descriptivos**, porque se está mencionando todas las formas de trabajo a desarrollarse antes y durante del proyecto.

Comparativo, porque se está realizando comparaciones con otras formas de trabajo ya estandarizadas, para analizar resultados y observar las mejoras que se están obteniendo.

4.3. Población y muestra

4.3.1. Población

Tajo Ferrobamba – Jahuapaylla intermedia (Mini tajo)

4.3.2. Muestra

Nivel (Banco) 3705 y 3720, proyectos de voladura 07,08 y 40.

4.4. Procedimientos de la investigación

- a. **Análisis bibliográficos:** Consiste en realizar el resumen e interpretación de la información bibliográfica, con la finalidad de elaborar el marco teórico, el planteamiento del problema, objetivos e hipótesis.
- b. **Revisión de manuales de explosivos:** Consiste en la recopilación de información de mezclas explosivas para la determinación de sus principales propiedades.
- c. **Trabajos de campo:** Consiste en realizar las pruebas en campo, en esta etapa se realizó el mapeo, carguío, tapado y amarre de los proyectos que fueron sometidas a pruebas de voladura aplicando la triple iniciación electrónica.
- d. **Trabajo de gabinete:** En este punto se procesó y analizo la información obtenida en campo, la fragmentación ha sido analizada conjuntamente con el área de asistencia técnica de la empresa.



- e. **Interpretación de resultados:** Se procedió a realizar la interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas de voladura utilizando técnicas estadísticas.
- f. **Conclusiones y recomendaciones de mejora:** En esta etapa se analizaron todos los resultados obtenidos para plantear mejoras.

4.5. Técnica e instrumentos de investigación

Los materiales que se utilizaron fueron: informes operacionales, bibliografías relacionadas al tema de investigación y base de datos de voladuras anteriores a la investigación.

Los instrumentos utilizados fueron: portametric, cámaras fotográficas, filmadoras, sismógrafos, computadoras, software, logger y blaster.

4.6. Análisis estadístico

4.6.1. Técnicas estadísticas

Para el tratamiento de datos en el presente trabajo de investigación se utilizó la estadística descriptiva, y seguidamente se procedió al análisis de los datos obtenidos.

4.6.2. Hipótesis estadísticas

En el presente trabajo de investigación se emplea la hipótesis estadística de estimación ya que se cuentan con datos de estudio cuantitativos.

➤ Hipótesis alterna (H_a)

La hipótesis alternativa (H_a) es la conclusión a la que el investigador ha llegado a través de su investigación (Diccionario economico, estadistico y matematico, 2019). Por lo tanto, nuestra hipótesis alternativa vendría a ser lo siguiente:

- La triple iniciación electrónica optimiza la fragmentación generando un P80 menor o igual a 4,5 pulgadas.

➤ Hipótesis nula (H_0)

La hipótesis nula (H_0) se refiere a la afirmación contraria a la que ha llegado el investigador, es la hipótesis que se pretende rechazar. (Diccionario economico, estadistico y matematico, 2019). Por lo tanto, nuestra hipótesis nula vendría a ser lo siguiente:

- La triple iniciación electrónica no optimiza la fragmentación si genera un P80 mayor a 4,5 pulgadas.

Simbólicamente se representa:



- $H_0: \mu P80 > 4,5$ pulgadas (si P80 es mayor a 4.5 pulgadas, no se optimiza la fragmentación).
- $H_a: \mu P80 \leq 4,5$ pulgadas (si P80 es menor o igual a 4.5 pulgadas, si se optimiza la fragmentación)

4.6.3. Nivel de significancia

Para esta investigación se eligió un nivel de confianza del 95%, por lo tanto, el nivel de significancia vendría a ser el 5% restante, es decir α es igual a 0.05 que nos indicara la máxima cantidad de errores aceptables en la presenta investigación.

4.6.3.1. Prueba de hipótesis.

Para realizar la prueba de hipótesis se tiene lo siguiente:

- Nivel de significancia $\alpha=0.05$
- $H_0: \mu P80 > 4,5$ pulgadas
- $H_a: \mu P80 \leq 4,5$ pulgadas.
- $n=4$ muestras (se refiere al número de pruebas realizadas)
- Promedio de P80 obtenido= 4.1425 (valor promedio de la muestra).
- Desviación estándar de la muestra=0.2802.

Para obtener el valor critico (T_c) se hace uso de la tabla de distribución T de student, para lo cual se obtiene que el valor critico T_c es -2.35 (Ver figura 3.1).

Para determinar el valor de prueba se hace uso de la siguiente formula:

$$T_p = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 3.1)}$$

Donde:

- T_p =Valor de prueba.
- \bar{x} =Valor promedio de muestra. (Promedio de los P80 obtenidos en las 4 pruebas)
- μ =Valor teórico (4.5 pulgadas)
- σ =Desviación estándar de la muestra
- n =Numero de muestras.

$$T_p = \frac{4.1425 - 4.5}{\frac{0.2802}{\sqrt{4}}} = -2.55$$

El valor de prueba (T_p) obtenido es -2.55, este valor está dentro de la región de rechazo de la hipótesis nula H_0 (Ver figura 3.1).

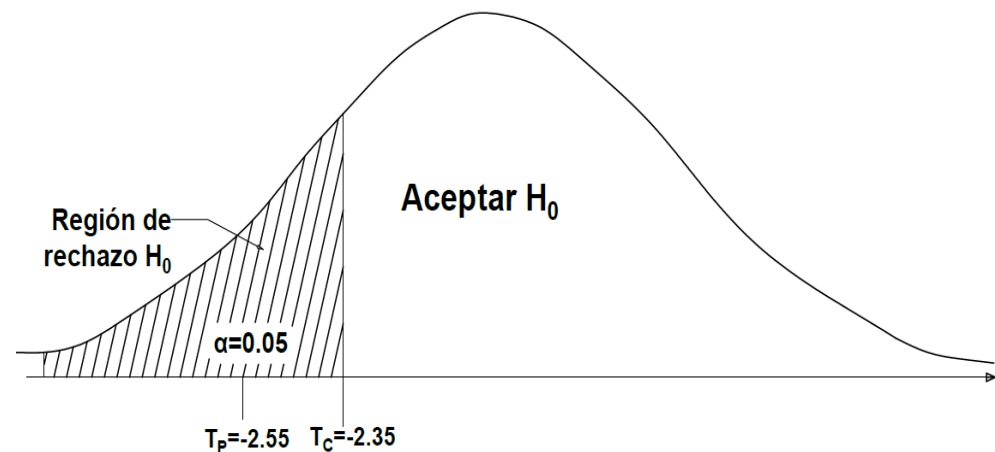


Figura 4.1: Gráfico del nivel de significancia de 0.05.
Fuente: Probabilidad y Estadística (Adolfo, 2015).

4.6.4. Región crítica o regla de decisión

La región crítica estará representado por el valor crítico T_c igual a -2.35, es decir que todos aquellos valores menores al valor crítico (T_c) representan la región de rechazo de la hipótesis nula H_0 .

El valor de prueba T_p obtenido es de -2.55 que es un valor menor al valor crítico, por lo tanto, nuestro valor de prueba se encuentra dentro de la región de rechazo de la hipótesis nula por lo tanto se tiene que:

- **Decisión:** Se rechaza la hipótesis nula.
- **Conclusión:** Se puede afirmar que la triple iniciación electrónica si optimiza la fragmentación.

4.6.5. Metodología del proceso de investigación

1°. Planificación de trabajo

Para la planificación de los trabajos de voladura se tomaron en cuenta lo siguiente:

- a. **Selección y ubicación del proyecto de voladura (muestra):** Como primer paso para iniciar los trabajos de prueba se ubicó y selecciono el proyecto de voladura (nivel de banco y número de malla).
- b. **Análisis del macizo rocoso (mineral):** Se analizaron todas las variables del macizo rocoso tales como las propiedades físico-mecánicas, fallas, rellenos de contactos, etc. teniendo en cuenta que el macizo rocoso es totalmente aleatorio. Esta información fue proporcionada por el área de geotecnia de la unidad minera MMG Las Bambas.
- c. **Diseño de malla de perforación:** De acuerdo al tipo de roca se realizaron los cálculos de burden y espaciamiento, la altura de banco de acuerdo a los estándares de la unidad minera es de 15 metros con una sobre perforación de 1.5 metros, el diámetro de taladro es de 12^{1/4} pulgadas. Teniendo toda esta información se realizaron los trabajos de perforación de los taladros por el área de perforación de la unidad minera MMG Las Bambas.
- d. **Selección de la mezcla explosiva a emplearse:** De acuerdo al tipo de roca y condiciones de los taladros se debe seleccionó la mezcla explosiva. Lo ideal debe ser que de acuerdo al tipo de roca y presencia de agua en los taladros se realiza la configuración de los camiones fabrica para la formulación de la mescla explosiva adecuado.

Entre las mezclas explosivas tenemos.

- ANFO pesado 65/35 (65% de emulsión gasificable y 35% de ANFO).
- ANFO pesado 55 (50% de emulsión gasificable y 50% de ANFO).
- ANFO pesado 64 (60% de emulsión gasificable y 40% de ANFO).
- ANFO pesado 73 (70% de emulsión gasificable y 30% de ANFO).
- Emulsión gasificable 100%.

En esta etapa también se evaluaron los accesorios de voladura a utilizar, generalmente en minería superficial en la actualidad se utilizan los BOOSTER (alto explosivo), detonadores electrónicos y detonador no eléctrico como Back Up.



- e. **Diseño de carguío y voladura:** En este punto teniendo en cuenta el diseño de malla de perforación y la mezcla explosiva a emplearse se procedió a realizar el diseño de carguío tales como: longitud de carga (LC), taco (T), estimación del factor de potencia (FP), factor de carga lineal (FCL) y el sistema de carguío (bombeable o vaciable).
Así mismo se realizó el diseño de la secuencia de salida adecuado para la voladura teniendo en cuenta la cara libre del banco y presencia de infraestructuras cercanas al proyecto de voladura.
- f. **Gestión de material para el tapado:** En punto se realizó la solicitud al área de perforación y voladura de la unidad minera MMG Las Bambas de la roca chancada para realizar el tapado de los taladros cargados.

2º. Ejecución de trabajo

Una vez realizada la planificación se procedió a realizar la ejecución de los trabajos necesarios para realizar las pruebas que son materia de investigación en el presente trabajo de tesis.

- a. **Carguío de taladros:** Se realizó el carguío de los taladros empleando la triple iniciación con detonadores electrónico tomando en cuenta el diseño de carguío.
Para el carguío en mineral se utilizó booster de 2 libras y en desmonte booster de 1 libra de acuerdo a los estándares de la unidad minera MMG Las Bambas.
En esta actividad existe la probabilidad de ocurrencia de cortes o daños en las líneas descendentes, el riesgo es mínimo.
- b. **Tapado de taladros:** Después de concluir con el carguío de los taladros se realizó la colocación del taco, esto consiste en colocar roca chancada en el taco utilizando un mini cargador.
La ocurrencia de cortes o daños en las líneas descendentes de muy alto por lo cual se debe aplicar controles durante el tapado.
- c. **Amarre de malla de voladura:** Una vez concluido con el carguío y tapado de los taladros se realizó el amarre (conectar) todos los taladros con la respectiva secuencia de salida utilizando el cable de conexión y logger para la asignación de los retardos de cada taladro.
En esta tarea es donde se identificarán fallas en los detonadores electrónicos y los cortes de las líneas descendentes que pudieron haber sido ocasionados en los procesos anteriores.



En caso se identifica un detonador electrónico fallado o con el cable de conexión cortado se activa el Back Up que viene a ser un detonador pirotécnico (Fanel, Exel, Exanel, etc).

- d. Ejecución del protocolo de voladura:** Después de realizar el amarre de todos los taladros se da inicio al protocolo de voladura para iniciar con la detonación de todos los taladros cargados.

3°. Controles de calidad de voladura

- a. Análisis de fragmentación de mineral:** Posterior a la voladura se realizaron los análisis de fragmentación en los frentes de minado utilizando un Portametric (equipo para analizar la fragmentación de mineral).
- b. Identificación de tiros cortados:** La identificación de los tiros cortados ocurre durante la asignación de los tiempos de retardo de los taladros, así mismo se puede identificar cualquier falla que pudieran presentar los detonadores electrónicos.

4°. Reporte y análisis de resultados de voladura

Una vez concluido con la voladura se analizó los resultados de fragmentación y los índices de tiros cortados haciendo una comparación con los resultados de voladuras anteriores.

- a. Análisis de fragmentación de mineral:** Se analizó los resultados de fragmentación con la triple iniciación con detonadores electrónicos y se realizó el comparativo con voladuras anteriores.
- b. Análisis de tiros cortados:** Se realizó un análisis de la ocurrencia de tiros cortados.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Análisis de resultados

5.1.1. Descripción del proceso de perforación y voladura

Las pruebas con la triple iniciación electrónica se realizaron en el tajo Ferrobamba en las zonas de Jahuapaylla Baja y Mini Tajo en sus distintos niveles previa coordinación con los responsables del área de perforación y voladura de MMG Limited.

Para realizar la presentación de los resultados es necesario tener en cuenta el proceso de perforación y voladura propuesto. Este proceso es el que será la guía para el presente trabajo de tesis.

Para realizar las pruebas de voladura con la triple iniciación electrónica se consideran los siguientes procesos:

- 1°. Diseño de malla de perforación.
- 2°. Medición de la profundidad de los taladros perforados.
- 3°. Carguío de taladros con explosivos (se considera el tapado y amarre de taladros)
- 4°. Detonación del proyecto de carguío (disparo).
- 5°. Inspección post voladura.
- 6°. Evaluación de resultados (fragmentación).

Estos 6 procesos de perforación y voladura son considerados y tomados en cuenta en el presente trabajo de tesis.



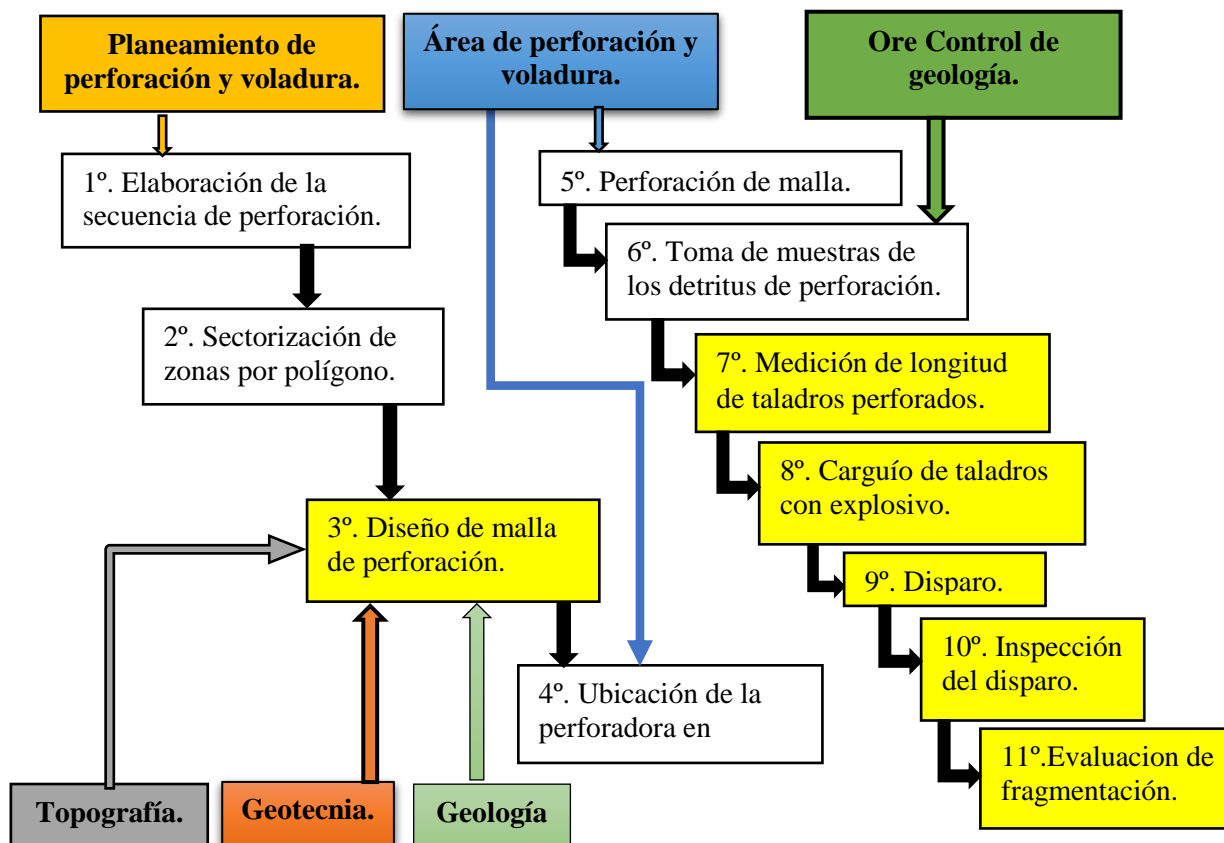


Figura 5.1 Proceso de perforación y voladura en Las Bambas – MMG Limited.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Diseño de malla de perforación para mineral

Es la forma en la que se distribuyen los taladros de una voladura, considerando básicamente a la relación de Burden y espaciamiento y su directa vinculación con la profundidad de taladros. Los diseños de perforación para la voladura controlada, deben considerar taladros de Precorte y/o taladros de amortiguación (Buffer). El diámetro de los taladros de Precorte deberán ser de menor diámetro que los taladros de producción. (<Ø pulgadas).

5.1.2.1. Estimación del diámetro de taladro

Para el siguiente proyecto Se consideró tres aspectos fundamentales para determinar el diámetro óptimo:

- La disponibilidad y aplicabilidad del equipo de perforación en el trabajo proyectado.
- La altura de banco estimada y la amplitud de la voladura a realizar.
- La distancia límite de avance proyectado para el banco.

El diámetro de taladro que se optó fue de 12 ¼ pulgadas por qué se obtiene mejor distribución y consumo específico del explosivo. $\text{Øt} = 12 \frac{1}{4} \text{ pulg} = 311,15 \text{ mm}$.

5.1.2.2. Cálculo del Burden

Para el siguiente proyecto se calculó el Burden bajo las siguientes condiciones:

- Tipo de litología mineralizada: Monzonita cuarcífera 12,52 MPa de resistencia a la tracción de la roca = 127,67 kg/cm².
- Presión de detonación del explosivo Fortis 65 /35 90 Kbar = 91774,46 Kg/cm².
- Diámetro del taladro 12,25 pulg. = 311,15 mm.

Haciendo uso de la ecuación 2.8 para determinar el burden máximo

$$B_{max} = 0,7 \times 10^{-3} \times 311,15 \times \sqrt{\frac{91774,46}{127,67}}$$

$$B_{max} = 5.84 \text{ m}$$

Para fines del proyecto se realizó el ajuste mediante pruebas en campo a 5,20 m.

5.1.2.3. Cálculo del espaciamiento

Para determinar el espaciamiento se utilizó la ecuación 2.9, considerando el resultado del burden obtenido.

$$E = 1,15 \times 5,2 = 5,98 \text{ metros} = 6,00 \text{ metros}$$

El espaciamiento depende básicamente del Burden.

5.1.2.4. Estimación de la sobre perforación

Aplicando la ecuación 2.13 propuesto por Calvin J. Konya obtendremos lo siguiente:

$$SD = 0,3 \times 5,2 = 1,56 \text{ m.}$$

En Las Bambas la sobre perforación ha sido estandarizada en 1,50 m.

5.1.2.5. Estimación de Altura de banco (H)

La altura de banco está diseñada en función del equipo de excavación y carga (P&H 4100 XPC), del diámetro de perforación (311 mm), de la resistencia de la roca, estabilidad el talud y de aspectos de seguridad considerando una altura de banco de 15 metros.

5.1.2.6. Estimación de la Longitud de taladro (Lt)

La longitud del taladro queda determinada por la altura de banco más la sobre perforación:



$$L_t = H + S_d \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Donde:

L_t: Longitud de taladro (m).

H: Altura de banco (m).

S_d: Sobre perforación (m).

Utilizando la ecuación 4.1 obtenemos la longitud de perforación de los taladros.

$$L_t = 15 + 1,50$$

$$L_t = 16,50 \text{ m.}$$

La longitud de perforación será variable y dependerá de la calidad del piso obtenido en las voladuras anteriores.

5.1.2.7. Diseño de malla de perforación y voladura para zonas de estéril

El diseño de mallas de perforación en estéril y/o desmonte lo realizó el área de perforación y voladura de MMG Las Bambas (*ver anexo D*), a continuación, se describe los parámetros de diseño de las mallas de perforación y voladura para zonas de estéril:

- Burden para zonas de estéril y/o desmonte es de 9.00 m.
- Espaciamiento en zonas de desmonte es de 10.50 m.
- Sobre perforación es de 1.50 m.
- Altura de banco 15 m.
- Longitud de perforación es de 16.50 m.

El explosivo utilizado para el carguío de taladros en zonas de estéril es el Fortis Extra 65/35, así mismo para la detonación de los taladros se utiliza iniciación simple (un solo iniciador) tanto para taladros de producción, contorno y buffer.

La longitud de carga para taladros de producción es de 7.5 metros quedando 9 metros de taco y para taladros de contorno se tiene una longitud de carga de 6.5 metros con taco de 10 metros (*ver anexo D*).

5.1.3. Selección de explosivo

Para seleccionar el tipo de mezcla explosiva tomaremos en cuenta básicamente tres factores:

- Presencia de agua en los taladros.
- Tipo de litología.
- Velocidad de detonación de la mezcla explosiva (VOD).

En la zona de Jahuapaylla Baja donde se realizaron las pruebas con la triple iniciación electrónica tenemos taladros con abundante agua y rocas con resistencias a la compresión de 272,9 MPa en promedio.

5.1.3.1. Resistencia al agua de las mezclas explosivas Fortis Extra

Se tiene que seleccionar una mezcla explosiva con una excelente resistencia al agua y que sea capaz de desplazar el agua presente dentro de los taladros.

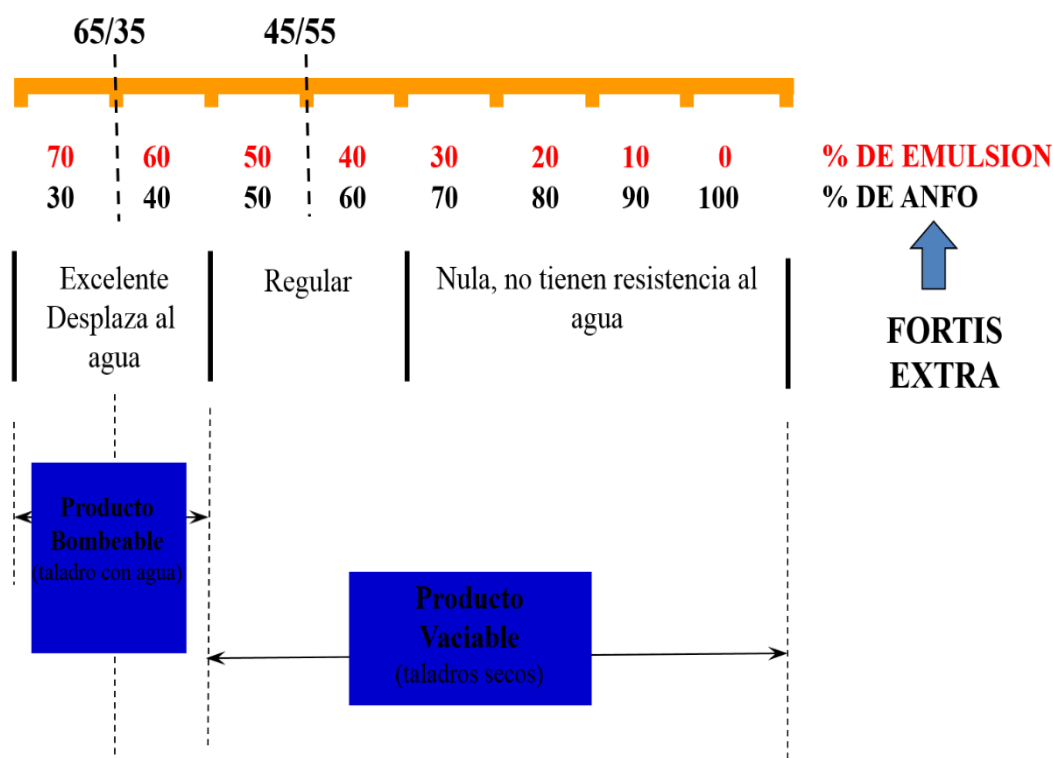


Figura 5.2: Resistencia al agua de los diferentes productos explosivos.

Fuente: Area de Asistencia Tecnica - MMG Las Bambas.

De acuerdo a los parametros que se muestran en la figura 4.2 con respecto a la resistencia al agua de las deferentes mezclas explosivas de Fortis Extra, debemos considerar las mezclas explosivas con una excelente resistencia al agua y estas son:

- Fortis Extra 64 (60 % de emulsion mas 40 % de ANFO).
- Fortis Extra 65/35 (65 % de emulsion mas 35 % de ANFO).
- Fortis Extra 73 (70 % de emulsion mas 30 % de ANFO).

5.1.3.2. Velocidad de detonación (VOD)

En los proyectos de voladura donde se realizaron las pruebas con la triple iniciación electrónica se tiene la presencia de rocas muy duras, así como Skarn, Endo Skarn, Monzonitas cuarcíferas, etc. que tienen una resistencia a la compresión promedio de 271,90 MPa.

Teniendo en cuenta estas condiciones litológicas se tienen que seleccionar un explosivo con un VOD alto.

Tabla 5.1: Velocidad de detonación según el tipo de mezcla explosiva.

Fortis Extra	VOD típico (m/s)	Resistencia al agua
ANFO	3800 - 4300	Nula
20/80	4400 - 4800	Nula
30/70	4800 - 5100	Nula
40/60	4900 - 5700	Regular
50/50	5000 - 5900	Regular
60/40	4800 - 5800	Buena
65/35	4800 - 5800	Muy buena
70/30	4400 - 5700	Muy buena

Fuente: Elaboracion propia.

Tomando en cuenta todas las características de los explosivos antes mencionados y en función a las necesidades de optimización de fragmentación de rocas utilizaremos el Fortis Extra 65/35.

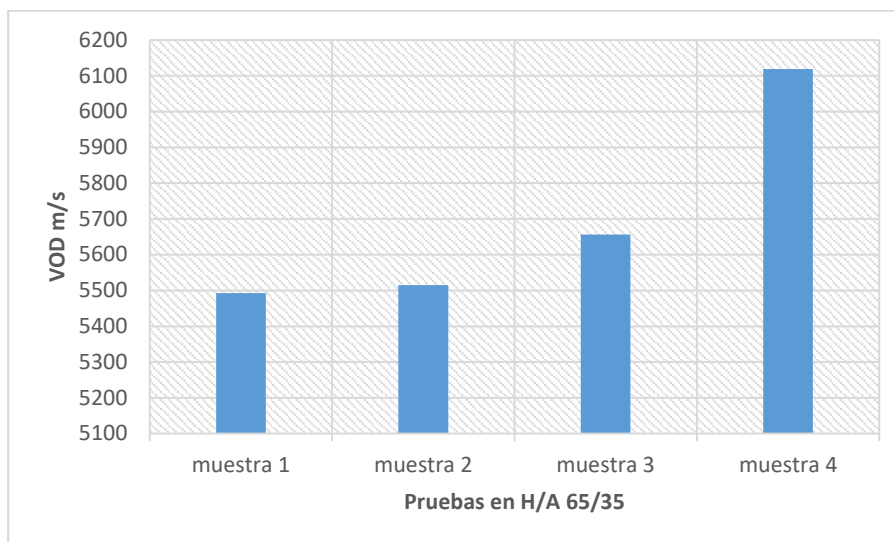


Figura 5.3: pruebas de VOD para el Fortis Extra 65/35.

Fuente: Elaboración propia.

Propuesta del parámetro y diseño de carguío con el explosivo Fortis 65/35

- Explosivo = Fortis extra 65/35
- Diámetro de taladro = 12 ¼ de pulgadas
- Burden = 5,20 m
- Espaciamiento = 6,00 m
- Longitud del taladro = 16,50 m
- Longitud de taco = 6,50 m
- Iniciación triple de acuerdo al diseño de carguío.

5.1.4. Descripción de la propuesta de carguío con triple iniciación electrónica

5.1.4.1. Diseño de carga línea base (doble iniciación electrónica)

Como línea base se está considerando el siguiente diseño de perforación y carguío de taladros con explosivo FORTIS EXTRA 65/35. El diseño de carga estándar para las voladuras con doble iniciación electrónica en la unidad minera Las Bambas MMG Limited es la que se muestra en la figura 4.4.

Parámetros de perforacion y voladura	
Tipo de explosivo	Fortis Extra 65/35
Densidad inicial (gr/cc)	1.32
Densidad final (gr/cc)	1.14
Densidad de carga (kg/m)	100.42
Numero de primas	2
Booster	2 Libras
Detonador Ikon III	2
Linea Back Up (Excel)	2
Diametro de taladro (pulg.)	12 1/4
Burden (m)	5.2
Espaciamiento (m)	6
Profundidad de taladro (m)	16.5
Altura de banco (m)	15
Sobreperforacion (m)	1.5
Densidad de roca (gr/cc)	2.5
Tipo de roca	skarn
Altura de carga (m)	9.5
Taco final (m)	7
Kg de explosivo / taladro	903
Toneladas rotas / taladro	1170 ton.
Factor de potencia (Kg/ton.)	0.77

Figura 5.4: Parámetros de voladura con doble iniciación.

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.2. Diseño de carga propuesta (triple iniciación electrónica)

Para las voladuras de prueba con triple iniciación electrónica, se está considerando los siguientes diseños de perforación y carguío de taladros:

- Triple iniciación:** El taco se reduce de 7,0 metros (doble iniciación) a 6,5 metros (triple iniciación) como se puede ver en la figura 4.5 -a, la carga explosiva será iniciada por tres primas que serán detonadas con el mismo tiempo de retardo para aprovechar las colisiones simultaneas de energía al detonar las tres primas al mismo tiempo.

b) **Triple iniciación con carga satélite:** Se denominará carga satélite a la carga explosiva que estará ubicado en el taco, esta carga será de 150 kilogramos de explosivo separada por un deck de dos metros de la carga de fondo y será iniciada por la tercera prima (ver figura 4.6 - b).

El diseño consiste en ubicar dos primas en la carga de fondo que serán detonados con el mismo tiempo de retardo para aprovechar las colisiones simultáneas de energía al detonar las dos primas al mismo tiempo.

En la parte del taco, la fragmentación de la roca se presenta con mayor tamaño disminuyendo considerablemente el porcentaje de finos y en algunos casos generando bolonería. La carga satélite tiene la finalidad de fragmentar el material en las zonas del taco (ver figura 4.6-b).

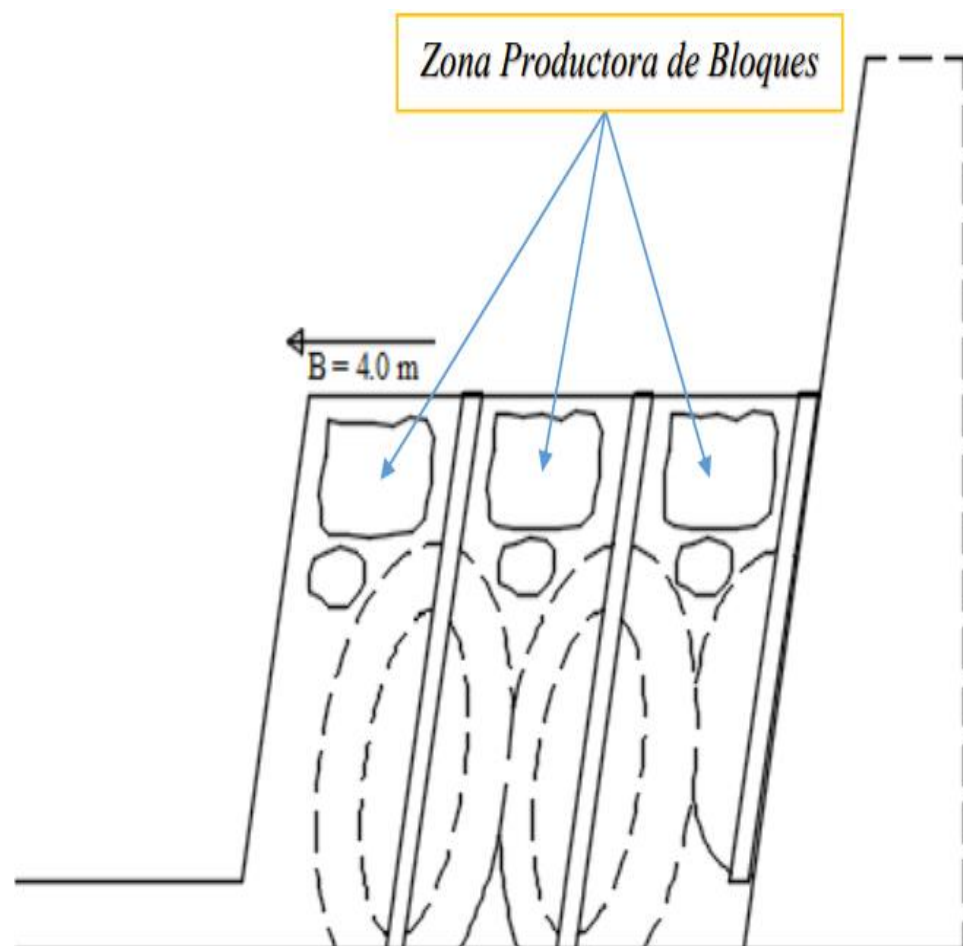


Figura 5.5: Reducción de la fragmentación en la zona del taco.
Fuente: (Sulca Alfaro, 2016 pág. 110).

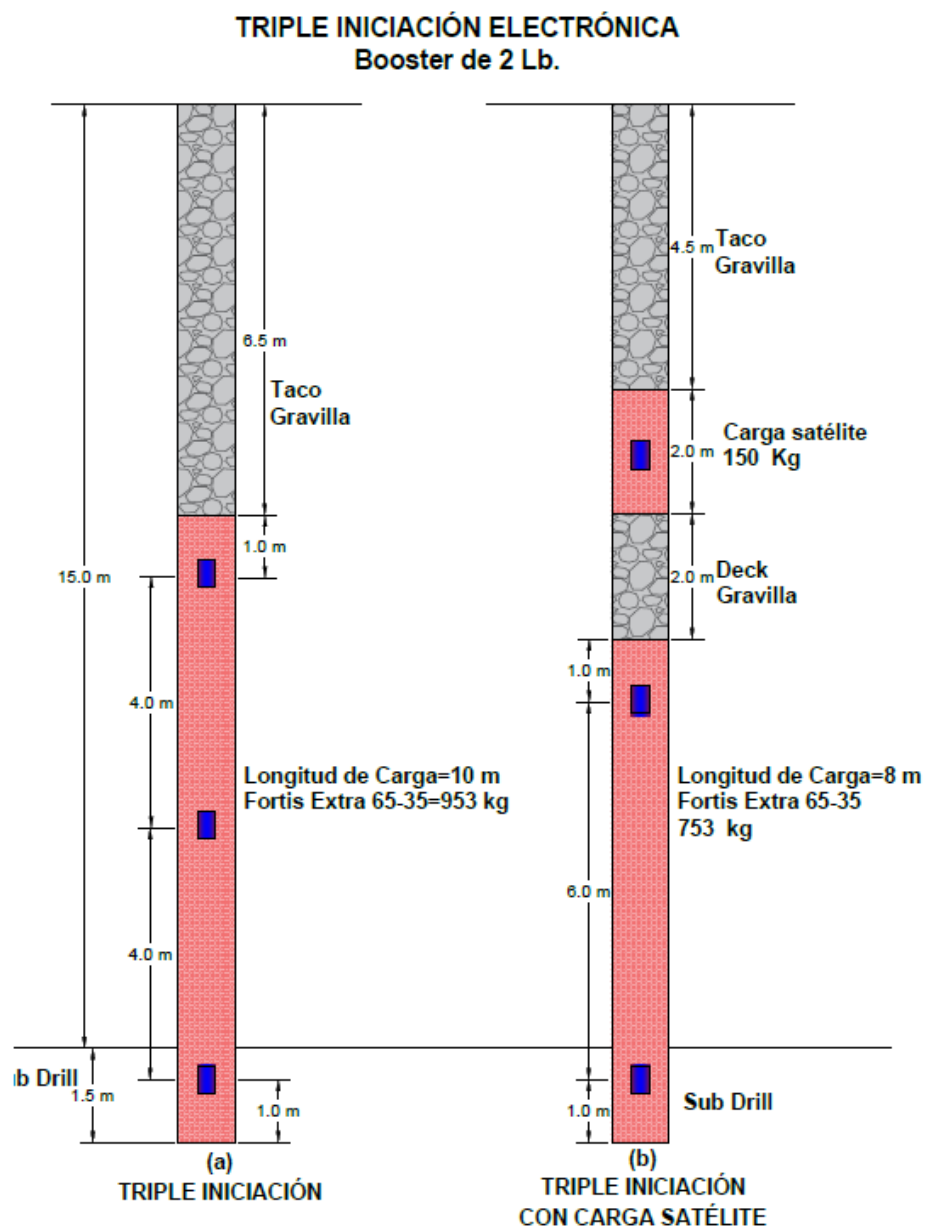


Figura 5.6: Diseño con triple iniciación electrónica en carga corrida (a) y con carga satélite (b).

Fuente: Elaboración propia.

5.1.4.3. Ubicación de las primas con triple iniciación electrónica

Ubicar las primas a 1,0 m del taco y piso respectivamente y no a 2,0 m como se puede ver en la figura 4.4 del diseño de carga línea base. Esto permitirá reducir la eyección de rocas (fly rock), porque se tendrá menos carga en la parte superior del Booster y de esta forma compensar los posibles efectos negativos de la reducción del taco de 7,0 metros a 6,5 metros. En el diseño propuesto la separación entre primas será mayor o igual a 4 metros para evitar posibles problemas de presión dinámica.

5.1.5. Controles de calidad en voladura con triple iniciación electrónica

5.1.5.1. Granulometría de grava para el tapado

De acuerdo a los estudios realizados por el área de perforación y voladura de MMG Limited Las Bambas, la granulometría del material (grava) para el tapado de taladros es de 3 pulgadas.

Tabla 5.2: Análisis de fragmentación de grava para el tapado.

Xc (pulg.)	1,00	
n	1,84	
Tamaño (pulg)	% Pasante	
3	99,9%	
2,5	99,5%	
2	97,2%	
1,5	87,9%	
1	63,2%	
0,75	44,5%	
0,5	24,4%	

Xc : Tamaño característico
n : Índice de uniformidad
P : % de pasante

Fuente: Elaboración propia.

5.1.5.2. Densidad y curva de gasificación del Fortis Extra 65/35

El control de la densidad inicial y final (ver figura 4.7) de la mezcla explosiva FORTIS EXTRA 65/35 se realiza durante el carguío de los taladros para verificar la gasificación del producto. Durante el carguío se realizó el control de densidades iniciales y curvas de gasificación, Se controlaron las medidas de los tacos iniciales y finales, apuntando a obtener un taco final de 6,5 m para la triple iniciación y 4,5 m para la carga satélite, al obtener esta medida, se procedió a tapado.

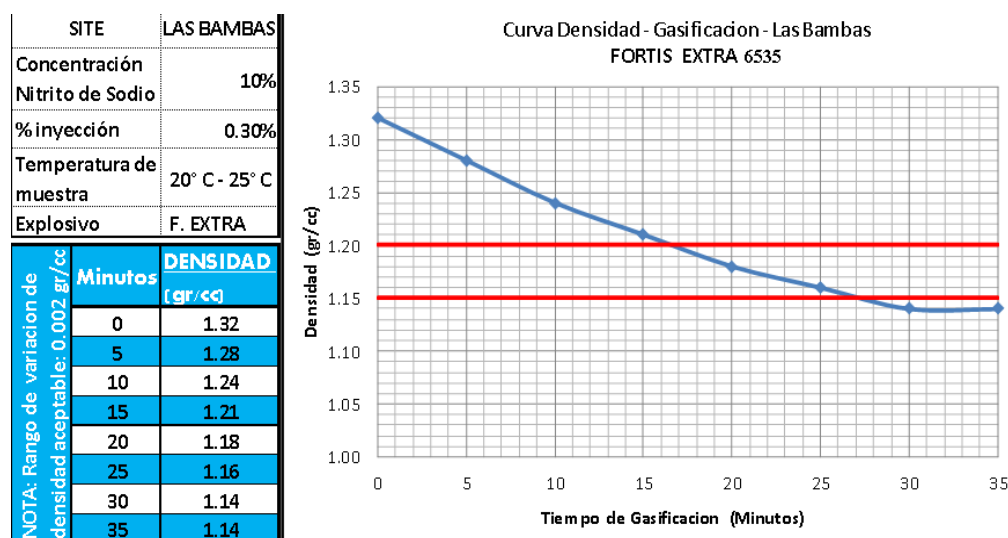


Figura 5.7: Curva de gasificación del Fortis Extra 65/35.

Fuente: Asistencia técnica MMG Limited Las Bambas.

5.1.5.3. Velocidad de detonación de Fortis Extra 65/35

La medición de VOD para FE 65/35 dio como resultado 5896,0 m/s.

Este valor se encuentra en el límite del rango para este producto, dicho rango es [3000 – 5800] m/s.

Información:

- Fecha de la Medición: 30-01-18
- ID taladro: 497.
- Diámetro: 12 1/4 pulgadas.
- Altura de perforación: 14,00 m.
- Longitud de Carga: 7,50 m.
- Explosivo: FE 65/35.
- Densidad inicial: 1,31 gr/cc.
- Densidad final: 1,15 gr/cc.
- Taco final: 6,50 m.

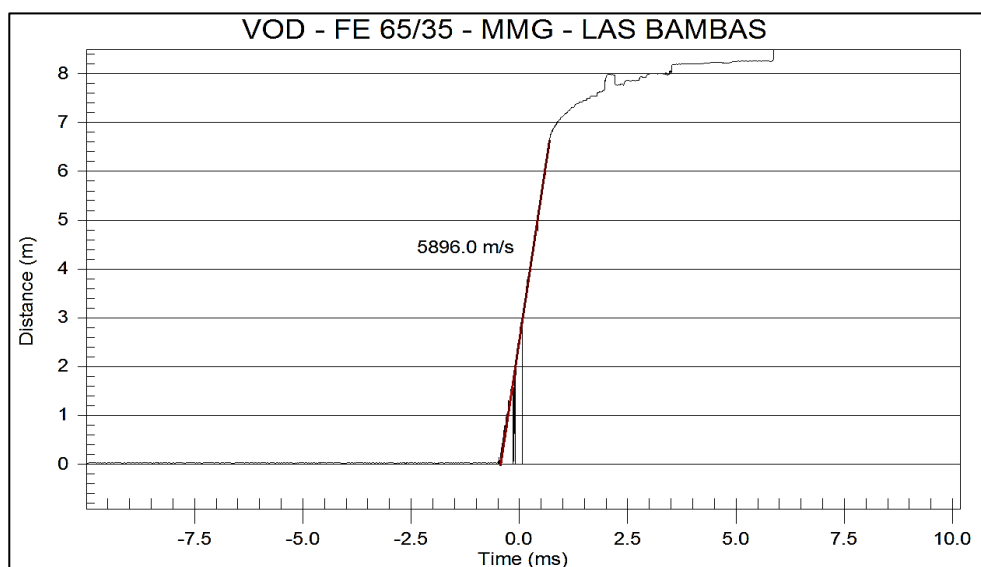


Figura 5.8: Velocidad de detonación de Fortis Extra 65/35.

Fuente: Elaboración propia.

5.2. Descripción de resultados

5.2.1. Resumen de las pruebas realizadas con la triple iniciación electrónica

Con el objetivo de mejorar la fragmentación y aumentar el porcentaje de finos menores a una pulgada (< 1 pulg.) generadas por las voladuras, se propone la aplicación de la triple iniciación electrónica. Esto implica la utilización de tres iniciadores o primas ubicadas a lo largo de la columna de carga explosiva en los taladros con la finalidad de aprovechar la colisión simultánea de energía al detonar las tres primas al mismo tiempo. El periodo de pruebas está comprendido entre los meses de enero del 2018 a marzo del 2018 como se puede observar en la **Tabla 5.3**.

Tabla 5.3: Resumen de pruebas de voladura de enero 2018 a marzo 2018.

Fecha	Zona	Nivel	Proyecto	Explosivo	Iniciación	Taladros	N° Prueba
20/01/18	Jahuapaylla Baja	3720	006	Fortis Extra 65-35	Doble	134	Línea base
30/01/18	Jahuapaylla Baja	3705	07-08	Fortis Extra 65-36	Triple (carga corrida)	161	Prueba 01
15/02/18	Jahuapaylla Baja	3720	040	Fortis Extra 65-37	Triple (carga satélite)	170	Prueba 02
28/02/18	Jahuapaylla Baja	3705	04-03	Fortis Extra 65-38	Triple (carga satélite)	272	Prueba 03 (Ver anexo E)
07/03/18	Jahuapaylla Baja	3720	044-047	Fortis Extra 65-39	Triple (carga corrida)	173	Prueba 04 (Ver anexo D)
TOTAL						910	

Fuente: Elaboración propia.

Durante los meses de prueba (enero – marzo 2018) se realizaron 5 voladuras de prueba haciendo un total de 910 taladros disparados.

- El 20 de enero del 2018 se realizó una voladura línea base con doble iniciación electrónica bajo las mismas condiciones litológicas donde se realizará las pruebas con la triple iniciación electrónica.
- El 30 de enero del 2018 se iniciaron con las pruebas de voladura con triple iniciación electrónica

En las pruebas 01 y 02 con la triple iniciación electrónica, la ubicación de los tres iniciadores es en una sola columna de carga explosiva espaciados a 4 metros entre sí (ver figura 4.6 - a).

En las pruebas de voladura 03 y 04 se realizaron con un diseño aplicando carga satélite el cual consiste en ubicar dos iniciadores en una sola columna de carga explosiva (carga de fondo) y el tercer iniciador estará ubicado en la zona de taco separado por un deck de material inerte de 2 metros (ver figura 4.6 - b).

5.2.2. Análisis de resultados de la voladura línea base (doble iniciación)

El día 20 de enero del 2018 se realizó una voladura Línea Base para obtener los resultados de fragmentación en voladuras con doble iniciación electrónica en zonas de mineral bajo las mismas condiciones litológicas para las pruebas de triple iniciación electrónica. Para este análisis se toma en cuenta el proyecto de disparo en el nivel 3720, proyecto 006, donde se obtuvo un P80 = 6,05 pulgadas con un porcentaje de finos menores a una pulgada de 25,60 %. En la figura 4.8 se puede observar una foto de la malla del proyecto de voladura con doble iniciación electrónica en zona de mineral.



Figura 5.9: Malla de voladura con doble iniciación (línea base).

Fuente: Elaboración propia.

- **Datos del disparo**

Se cargaron 132 taladros de producción y fueron disparados con doble iniciación electrónica en zona de Mineral, algunos datos adicionales se pueden apreciar en la **Tabla 5.4**.

- Secuencia de salida: “En Echelon”, Se coordinó con el área de perforación y voladura de MMG-Las Bambas, tiempo entre taladros: 4,17 ms, tiempo entre filas: 120-140-160-180 ms.
- Se tuvo 05 taladros tapados no cargados ID: B491, B515, B527, B486, B538; 4 taladros alineados, lo cual indicaría un posible cambio estructural (ver figura 4.10).
- Litología: se tiene presencia de monzonitas Cuarcífera (MZQ) y Skarn que presentan una resistencia a la compresión simple de 272,1 MPa.
- Malla 100% taladros con agua.
- Hora de Voladura: 1:30 p.m.

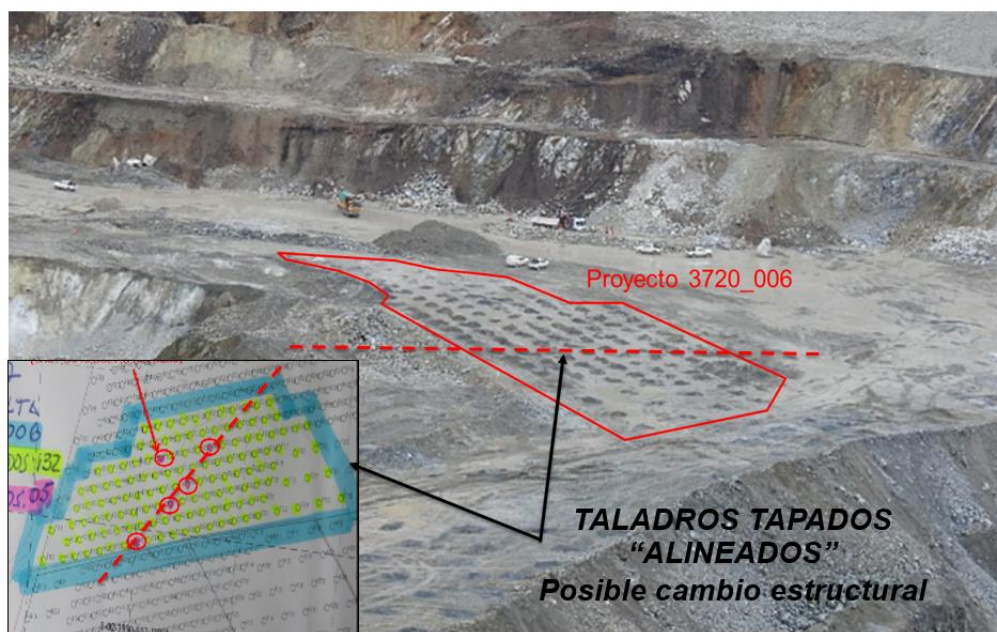


Figura 5.10: Ubicación de taladros tapados, posible cambio estructural.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5.4: Datos del proyecto de voladura con doble iniciación electrónica.

Datos del proyecto de voladura	
Disparo	3720 -006
Diámetro (pulg)	12 1/4 ''
Malla	Producción
Burden (m)	5,20
Espaciamiento (m)	6,00
Altura de banco (m)	15,00
Sobre perforación (m)	1,5
Tipo de roca	Endo Skarn
Resistencia de la roca (MPa)	272,1
Explosivo utilizado	Fortis Extra 65-35
Cantidad de taladros cargados	132
Taladros con 01 I-Kon III	0
Taladros con 02 I-Kon III	132
Taladros con 03 I-Kon III	0
I-Kon III Programados	264
Detonador No Reply	0
Cantidad de Back Up	2
Consumo de I-Kon III	264
Tiempo de retardo (ms)	04,17 / 120,140,160,180

Fuente: Elaboración propia.

• **Diseño de carguío de taladros estándar (Línea Base)**

El diseño de carga estándar para la voladura con doble iniciación electrónica establecida por el área de perforación y voladura de MMG Limited Las Bambas se muestra en la figura 4.11, el carguío de taladros es realizado mediante camiones fábrica por el sistema bombeable.

El tipo de explosivo utilizado es Fortis Extra 65/35 que tiene una densidad inicial de 1,32 gr/cm³ y una densidad de carga lineal de 100,42 kg/m. en taladros de 12 ¼ pulgadas de diámetro.

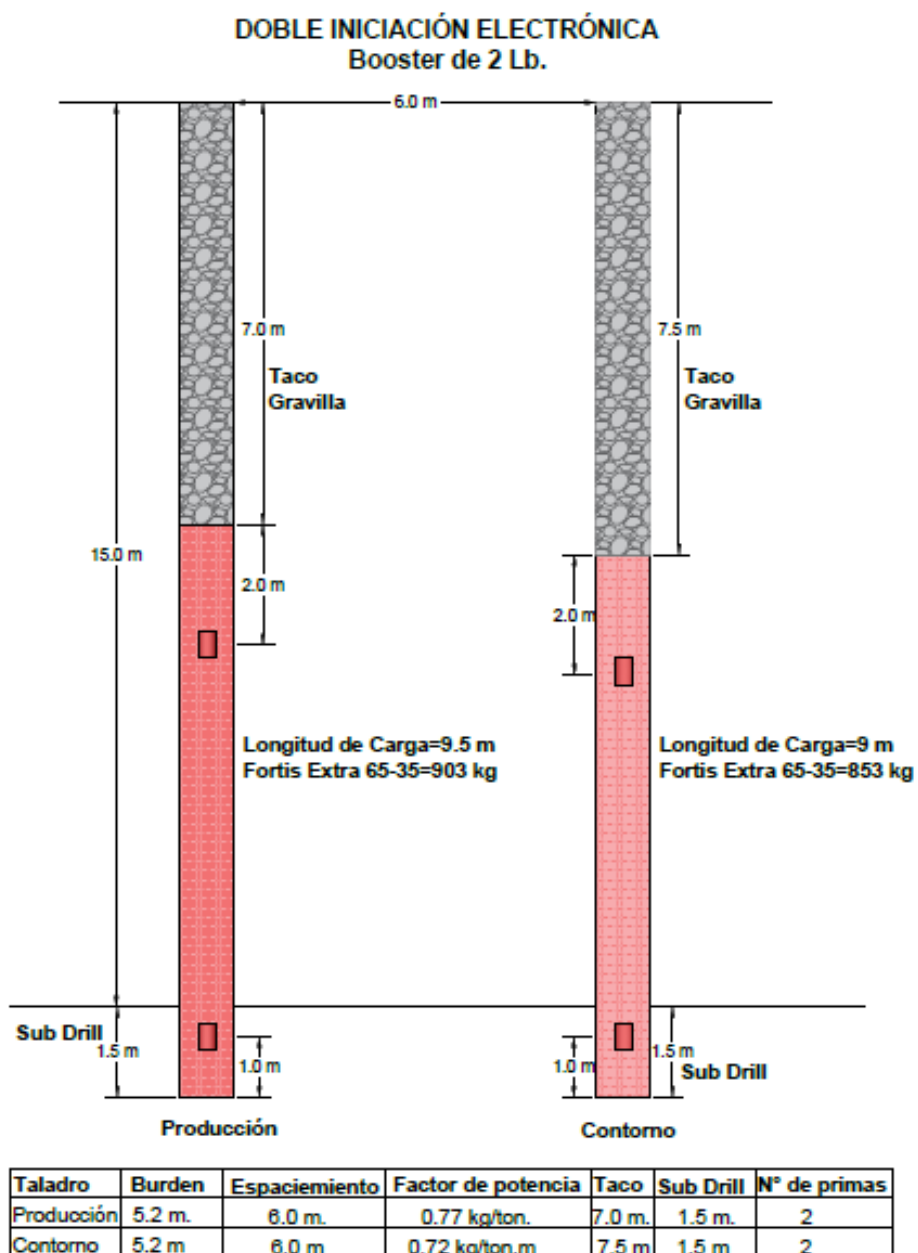


Figura 5.11: Diseño de carguío con doble iniciación electrónica (línea base). Fuente: Elaboración propia.

- **Secuencia de salida y movimiento de material**

La figura 4.12 muestra la secuencia de salida de la voladura (voladura en Echelon) y la dirección del desplazamiento del material volado.

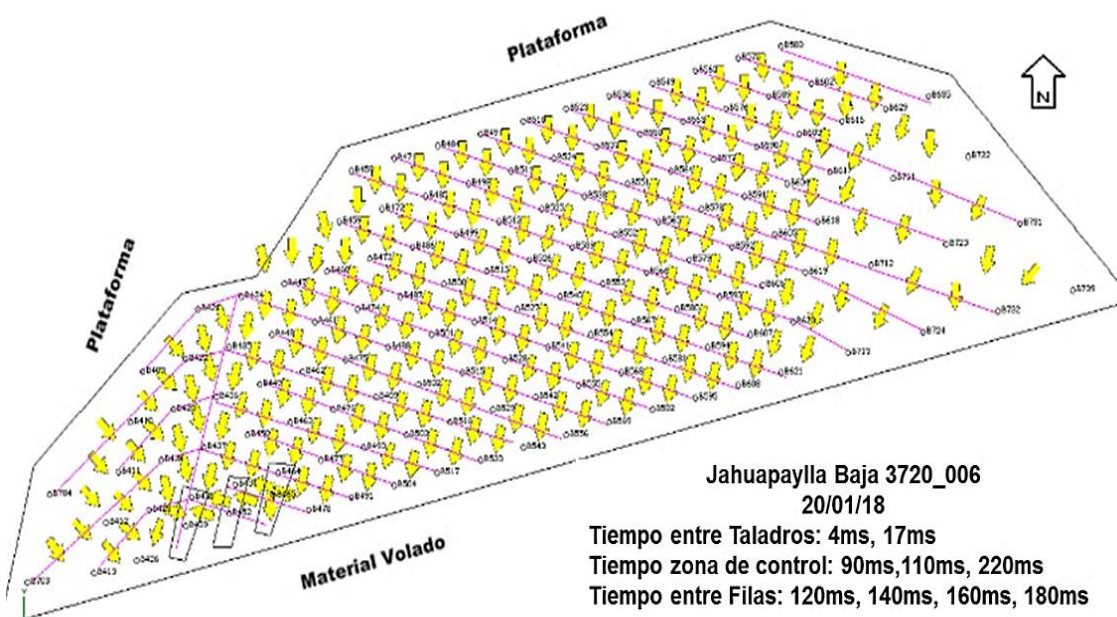


Figura 5.12: Movimiento del material volado con doble iniciación (línea base).
Fuente: Asistencia técnica MMG Limited Las Bambas.

5.2.2.1. Análisis de fragmentación en el frente de minado pala 12, Jahuapaylla Baja Nv. 3720_006

Como resultado del proyecto de voladura línea base obtenemos los siguientes resultados con las fotos (figura 4.13) obtenidas después de ejecutar la voladura. Estas fotos fueron tomadas en Nv. 3720 del proyecto 006.



Figura 5.13: Frente de minado del proyecto 3720-006 (línea base).
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Distribución de fragmentación proyecto 3720_006 mineral**

Se ha realizado el análisis de las fotografías tomadas en los frentes de minado en donde la pala ha estado avanzando, las cuales fueron analizadas con el Software PowerSieve dando como resultado un P80 = 6,05 pulgadas con un porcentaje de finos menores a 1 pulgada de 25,60%. Con este resultado no se está cumpliendo con los requerimientos de planta que es % de finos menores a 1 pulg. $\geq 35\%$ y un P (80) $\leq 4,5$ pulg.

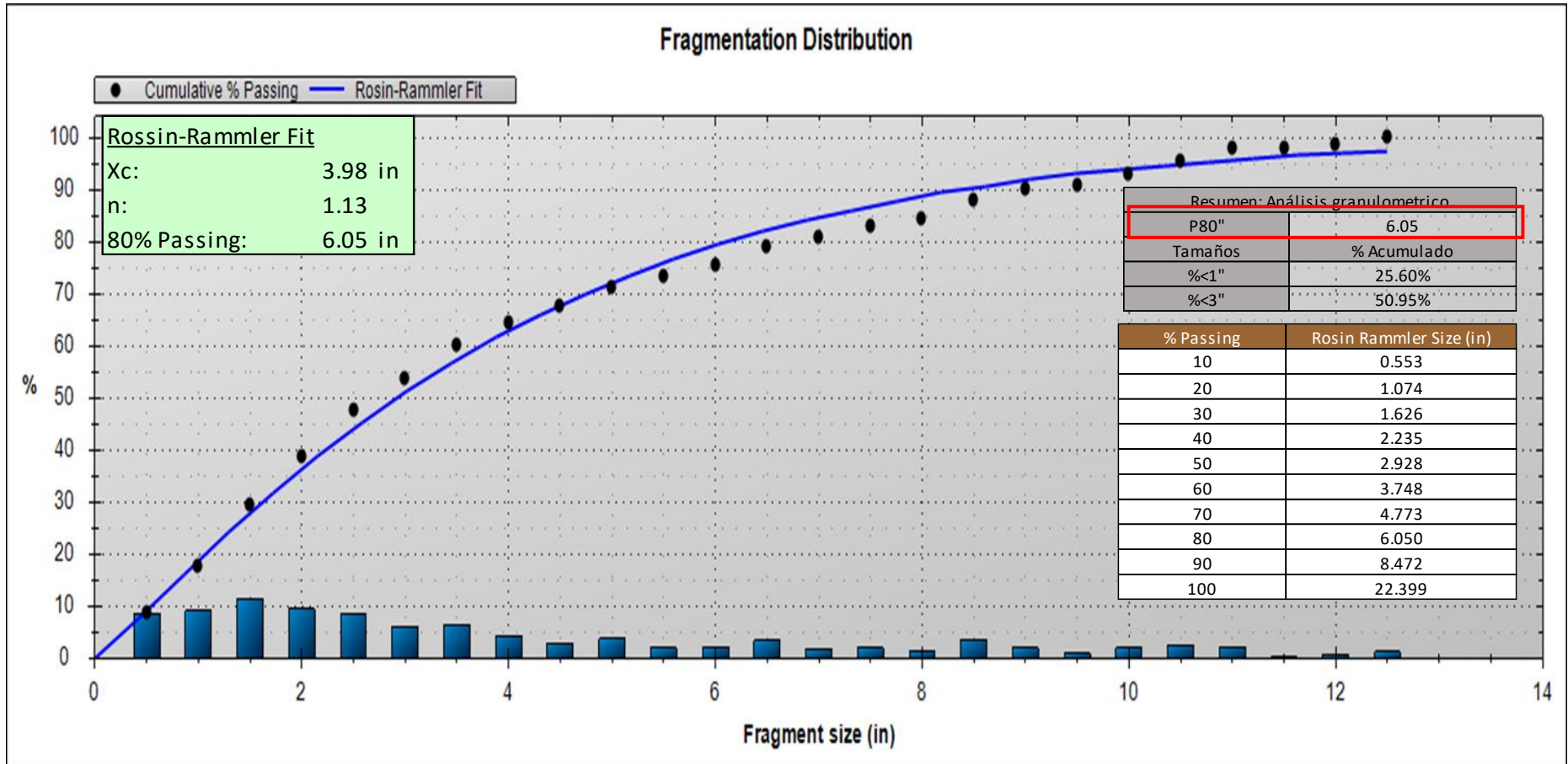


Figura 5.14: Distribución de la fragmentación obtenida con el Software PowerSieve (Línea base).

Fuente: Elaboración propia.



5.2.2.2. Resumen de fragmentación obtenida con doble iniciación electrónica

Se analizó la fragmentación promedio mensual de voladuras con doble iniciación electrónica durante los meses de julio 2017 a marzo 2018 (ver figura 4.15).

La cantidad de imágenes analizadas para cada voladura estuvo en el rango de [30 - 35] fotografías obtenidas de los diferentes frentes de minado del tajo Ferrobamba.

En Las Bambas, se tiene como línea base el uso generalizado de la doble iniciación electrónica en zonas de mineral, los resultados de fragmentación promedio mensual obtenidos son los siguientes:

- P80 (pulgadas) = [4,84–5,98] pulg.
- % de Finos (<1pulgada) = [22,4–29,7]%.

Estos resultados obtenidos en las voladuras con doble iniciación electrónica no cumplen con los requerimientos de planta.

Planta requiere una fragmentación de mineral equivalente a un P₈₀ menor o igual a 4,5 pulgadas (P₈₀ ≤ 4,5 pulg.) y un porcentaje de finos menores a una pulgada igual o mayor al 35% (% de finos menores a 1 pulg. ≥ 35 %).

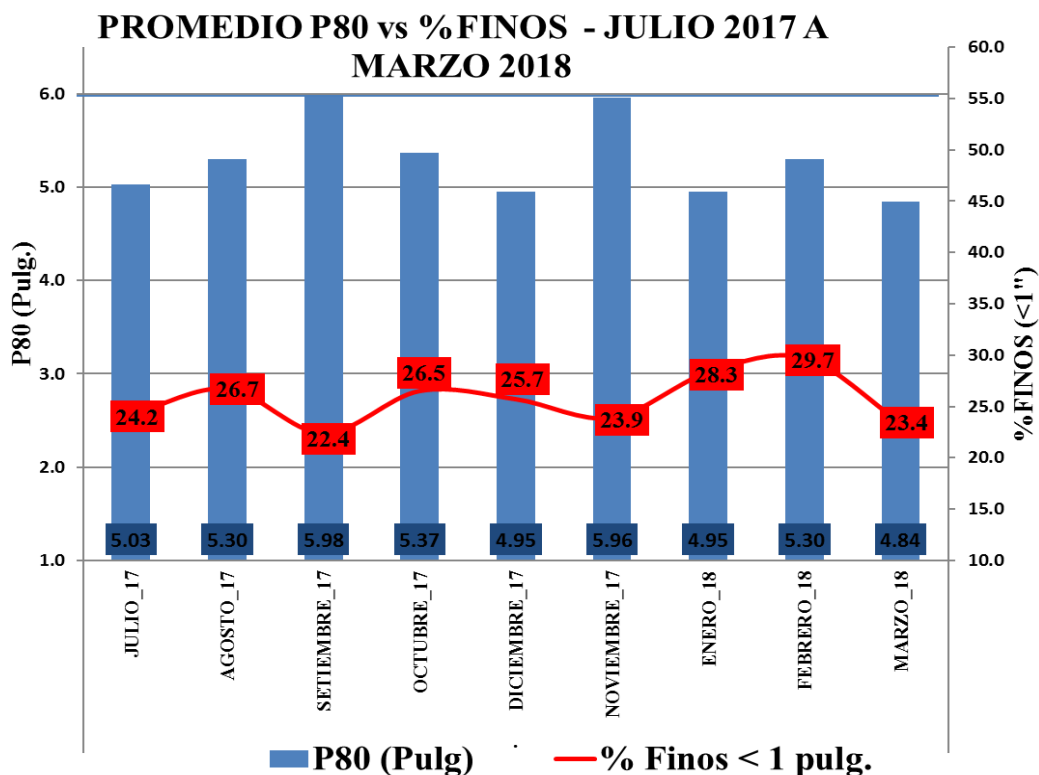


Figura 5.15: Fragmentación promedio mensual con doble iniciación electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.2.3. Tasa de excavación de palas (DIG -RATE)

Se realizó el análisis de la tasa de excavación de los equipos de minado en los proyectos detonados con doble iniciación electrónica, para este caso se considera dos equipos de minado (Pala 01 y Pala 12) que serán utilizados para el minado de los proyectos donde se realizó las pruebas con triple iniciación electrónica. En la siguiente **Tabla 5.5** se aprecia la productividad promedio de los equipos de minado CAT 6060 FS (Pala 12) y CAT 7495 HR (Pala 01) post fragmentación con doble iniciación electrónica en el mes de enero.

Tabla 5.5: Tasa de excavación promedio de los equipos de minado.

TAJO FERROBAMBA	EQUIPO DE MINADO	CÓDIGO (Pala)	TASA DE EXCAVACION (Tm/H)
Jahuapaylla Baja	CAT 6060 FS	12	2377
Jahuapaylla Baja	CAT 7495 HR	01	4856

Fuente: Despacho mina – MMG Limited Las Bambas (ver anexo B).

5.2.2.4. Evaluación económica de carguío con doble iniciación electrónica

En la **Tabla 5.6** se muestra el costo de los accesorios de voladura y explosivo Fortis Extra 65/35 utilizado en el carguío de taladros de producción con doble iniciación electrónica.

El costo que demanda el carguío de un taladro de producción con doble iniciación electrónica es de 629,73 dólares en accesorios de voladura y explosivo.

Tabla 5.6: Costo de explosivos por taladro de producción con doble iniciación.

EXPLOSIVOS Y/O ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO		COSTO TOTAL (\$/Taladro)
		Unidad	Valor	
Booster de pent. 2 LB	2	\$/Pza.	10,50	21
Detonador no eléctrico	2	\$/Pza.	4,45	8,90
Detonador electrónico	2	\$/Pza.	24,50	49
Fortis Extra 65/35	903	\$/kg.	0,61	550,83
COSTO TOTAL POR TALADRO (\$/Taladro)				629,73

Fuente: Elaboración propia.



En la **Tabla 5.7** se muestra el costo de los accesorios de voladura y explosivo Fortis Extra 65/35 para un taladro de contorno con doble iniciación.

Tabla 5.7: Costo de explosivos por taladro de contorno con doble iniciación.

EXPLOSIVOS Y/O ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO		PRECIO TOTAL (\$/Taladro)
		Unidad	Valor	
Booster de pent. 2 LB	2	\$/Pza.	10,5	21
Detonador no eléctrico	2	\$/Pza.	4,45	8,90
Detonador electrónico	2	\$/Pza.	24,5	49
Fortis Extra 65/35	853	\$/kg.	0,61	520,33
COSTO TOTAL POR TALADRO (\$/Taladro)				599,23

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 5.8** se muestra el costo de los accesorios de voladura y explosivo Fortis Extra 65/35 para un taladro de Buffer (amortiguado) con iniciación electrónica simple.

Tabla 5.8: Costo de explosivos por taladro de Buffer con iniciación simple.

EXPLOSIVOS Y/O ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO		PRECIO TOTAL (\$/Taladro)
		Unidad	Valor	
Booster de pent. 2 LB	1	\$/Pza.	10,5	10,5
Detonador no eléctrico	1	\$/Pza.	4,45	4,45
Detonador electrónico	1	\$/Pza.	24,5	24,5
Fortis Extra 65/35	350	\$/kg.	0,61	213,5
COSTO TOTAL POR TALADRO (\$/Taladro)				252,95

Fuente: Elaboración propia.

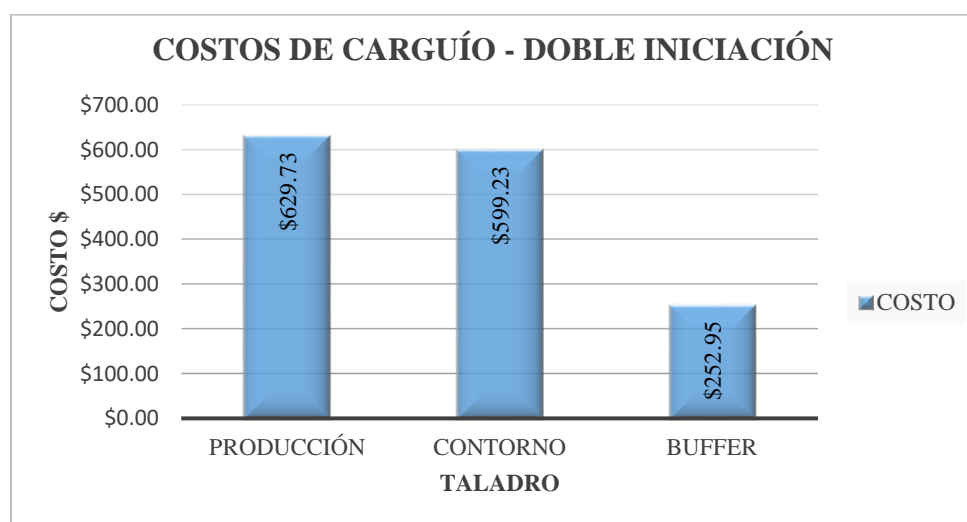


Figura 5.16: Costos de carguío de taladro de producción, contorno y buffer. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Análisis de las pruebas de voladura desarrolladas con la triple iniciación electrónica

A continuación, veremos el seguimiento, análisis y el estudio de las pruebas que se desarrollaron bajo las mismas condiciones litológicas, y observar los resultados de fragmentación en cada uno de las pruebas realizadas.

5.2.3.1. Prueba 01: Voladura con triple iniciación electrónica en carga corrida

El día 30 de enero del 2018 se realizó la primera prueba de voladura con triple iniciación electrónica en zonas de mineral, en el Nv. 3705_007-008 de Jahuapaylla Baja. Para este análisis se toma en cuenta el proyecto de disparo en el nivel 3705, proyecto 007-008 (ver figura 4.17).



Figura 5.17: Malla de voladura con triple iniciación (Prueba 01).
Fuente: Elaboración propia.

- **Datos del proyecto**

Se cargaron y dispararon 161 taladros (producción y buffer) con detonadores electrónicos i-kon III en zona de Mineral, algunos datos adicionales se pueden apreciar en la Tabla 5.9.

- Se cargaron 44 taladros de buffer (amortiguado) con iniciación simple (un iniciador), 37 taladros de contorno con doble iniciación electrónica (dos iniciadores) y 80 taladros de producción con triple iniciación electrónica.
- Secuencia de salida: “En V”, se coordinó con el personal de MMG-Las Bambas, tiempo entre taladros: 2 ms, 65 ms, 120 ms, tiempo entre filas: 160 ms, 180 ms, 200 ms.
- Se tuvo 07 pares de taladros cercanos IDE427-462-478-501-473-495-252-253-240-241-A1-1-201-5 y 03 triples cercanos ID: E223-2-222-218-3-217-216-4-

215, Se distribuyó las cargas, y fueron detonados en el mismo tiempo de acuerdo a la secuencia de voladura (ver figura 4.18).

- Se tuvo 05 taladros tapados ID: 226-451-209-207-407.
- Las condiciones mencionadas son debido a que la zona ha sido re-perforada.
- Litología: El tipo de roca predominante está conformado principalmente de Endo Skarn y Monzonita Quarcifera que presentan una resistencia a la compresión simple de 271,9 MPa y 270,5 MPa respectivamente
- Malla 100% taladros con agua.
- Hora de Voladura: 1:30 p.m.

Se tuvo 07 pares de taladros cercanos IDE427-462-478-501-473-495-252-253-240-241-A1-1-201-5 y 03 triples cercanos ID: E223-2-222-218-3-217-216-4-215, Se distribuyó las cargas, y fueron detonados en el mismo tiempo de acuerdo a la secuencia de voladura.



Figura 5.18: Taladros cercanos debido a re-perforación de taladros.

Fuente: Elaboración propia.

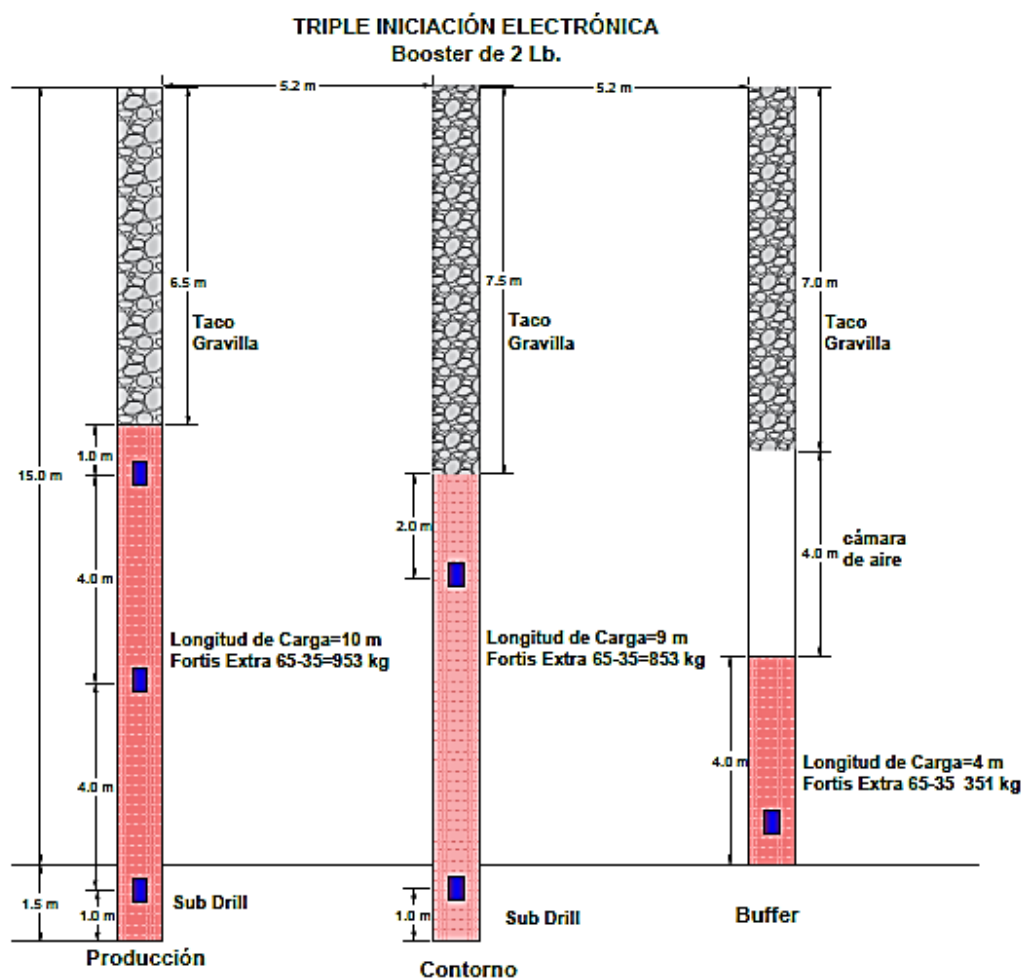
Tabla 5.9: Datos del proyecto de voladura con triple iniciación electrónica.

Datos de Disparo		
Proyecto de voladura		3705-007,008
Diámetro de taladro (Pulg.)		12 1/4"
Malla		Mineral
Burden(m)		5,20
Espaciamiento(m)		6,00
Altura de banco (m)		15
Sobre perforación (m)		1,50
Tipo de roca	Endo Skarn/Monzonita Quarcifera	
Resistencia de la roca (MPa)	272,9/271,1	
Explosivo utilizado	Fortis Extra 65-35	
Cantidad de taladros cargados		161
Taladros con 01 i-kon III (Buffer)		44
Taladros con 02 i-kon III (Contorno)		37
Taladros con 03 i-kon III (Producción)		80
I-kon III Programados		402
Detonador No Reply		00
Cantidad de Back Up		00
Consumo de i-kon III		402
Tiempo de retardo (ms)	2,65,120/160,180,200	Entre taladros/filas

Fuente: Elaboración propia.

- **Diseño de carguío de taladros con triple iniciación electrónica**

El diseño de carga para la voladura con triple iniciación electrónica propuesto al área de perforación y voladura de MMG Limited Las Bambas se muestra en la figura 4.19. El carguío de taladros es realizado mediante camiones fabrica por el sistema bombeable. El explosivo utilizado es Fortis Extra 65/35 que tiene una densidad inicial de $1,32 \text{ gr/cm}^3$ y una densidad de carga lineal de $100,42 \text{ kg/m}$. en taladros de $12 \frac{1}{4}$ pulgadas de diámetro.



Taladro	Burden	Espaciamiento	Factor de potencia	Taco	Sub Drill	N° de primas
Producción	5.2 m.	6.0 m.	0.81 kg/ton.	6.5 m	1.5 m	3
Contorno	5.2 m	6.0 m	0.72 kg/ton.	7.5 m	1.5 m	2
Buffer	5.2 m	4.5 m	0.40 kg/ton.	7.0 m	—	1

Figura 5.19: Diseño de carguío de taladros con triple iniciación (Prueba 01).
Fuente: Elaboración propia.

La triple iniciación electrónica se aplicó netamente en taladros de producción, en los taladros de contorno se aplicó doble iniciación electrónica con la finalidad de evitar posibles proyecciones de roca principalmente en zonas de cresta.

En taladros de buffer se aplicó iniciación simple con una carga de 35 kg de explosivo y 4 metros de cámara de aire.

- **Secuencia de salida y movimiento de material**

La figura 4.20, muestra la secuencia de salida de la voladura (voladura en V) de la misma forma específica el inicio de voladura, la figura 4.22 indica la dirección del desplazamiento del material volado.

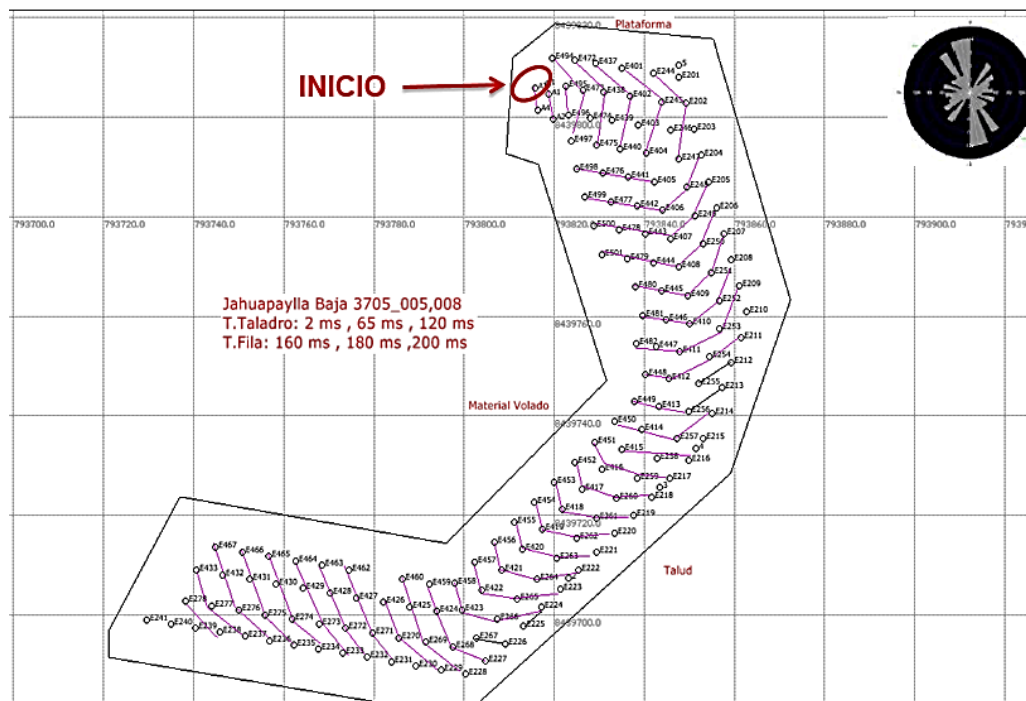


Figura 5.20: Secuencia e inicio de voladura del proyecto (Prueba 01).

Fuente: Asistencia técnica MMG Limited Las Bambas.

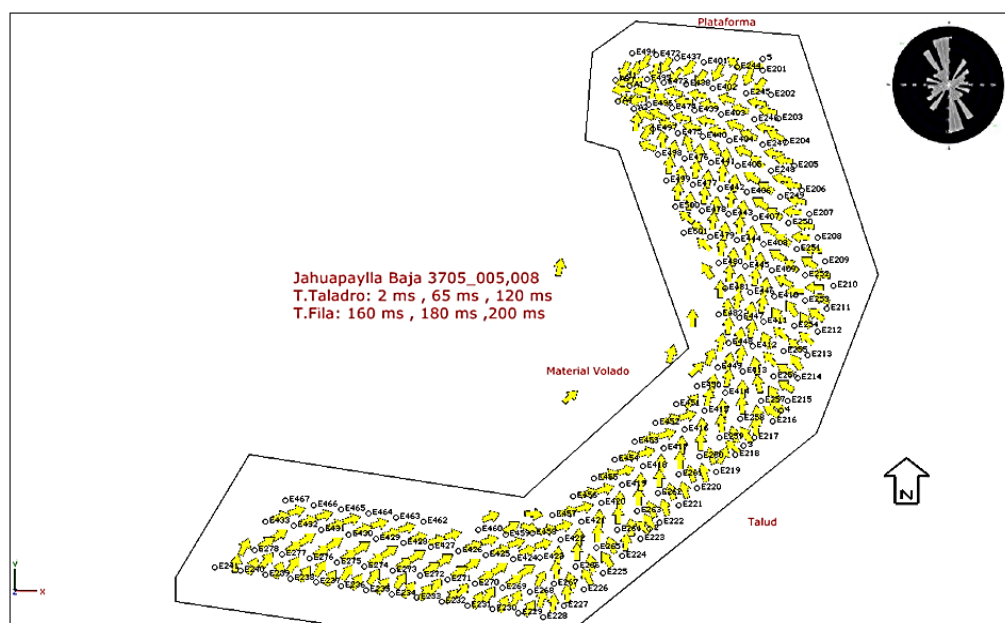


Figura 5.21: Dirección del desplazamiento de material volado (Prueba 01).

Fuente: Asistencia técnica MMG Limited Las Bambas.

5.2.3.2. Análisis de fragmentación en el frente de minado pala 12 (Prueba 01)

➤ Ubicación del frente de minado

La figura 4.22 indica la ubicación de la pala 12 en el frente de minado del proyecto de voladura donde se realizaron las pruebas con la triple iniciación electrónica.

La ubicación de cargadores y palas lo establece el área de planeamiento mina de acuerdo a los planes de minado de MMG Limited Las Bambas.

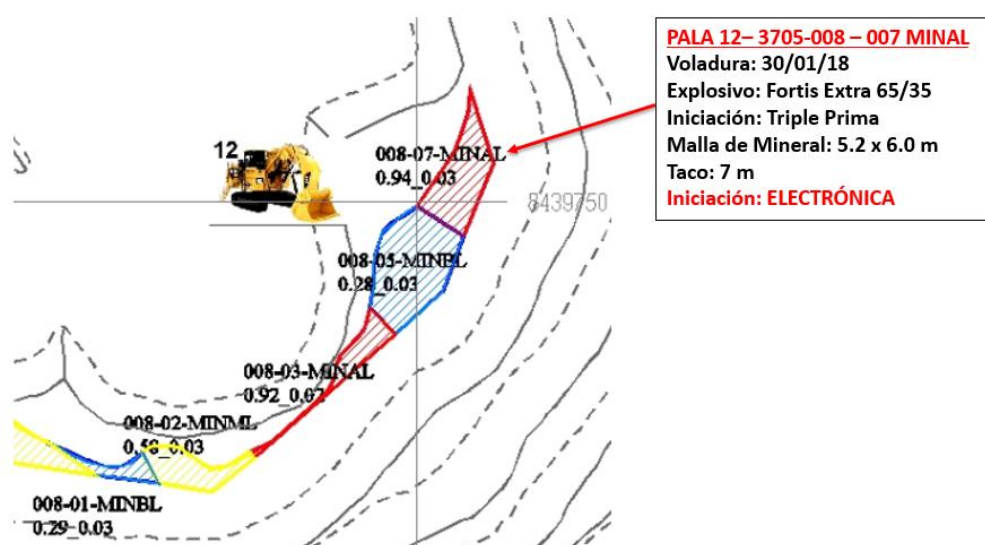


Figura 5.22: Ubicación de la pala 12 en el frente de minado (Prueba 01).
Fuente: Las bambas – MMG Limited (Área de perforación y voladura)



Figura 5.23: Minado del polígono 7 (Prueba 01).
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Fotografías tomadas para el análisis de fragmentación**

A nivel superficial se observa una buena fragmentación como se puede observar en la figura 4.24.

Se ha realizado análisis de 30 fotografías tomadas en los frentes de minado de la pala 12 (ver figura 4.25), las cuales fueron analizadas con el Software PowerSieve dando como resultado un P80 = 4,45 pulgadas. Estas fotos fueron tomadas en Nv. 3705 de los proyectos 007-008.



Figura 5.24: Imagen post voladura del proyecto (Prueba 01).
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.25: Análisis de fragmentación (Prueba 01).
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Distribución de fragmentación proyecto 3705_007-008 mineral**

Se ha realizado el análisis de 30 fotografías tomadas en los frentes de minado en donde la pala 12 ha estado avanzando, las cuales fueron analizadas con el Software PowerSieve dando como resultado un $P_{80} = 4,45$ pulgadas con un porcentaje de finos menores a una pulgada de 25,76 %. Planta solicita un $P_{80} \leq 4,5$ pulgadas con un % de finos < 1 pulgada = 35%, haciendo un análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que el P_{80} obtenido con la triple iniciación cumple satisfactoriamente los requerimientos de planta, el % de fino menor 1 pulgada obtenido no cumple con lo solicitado por planta por que se obtuvo un valor inferior a 35% de finos.

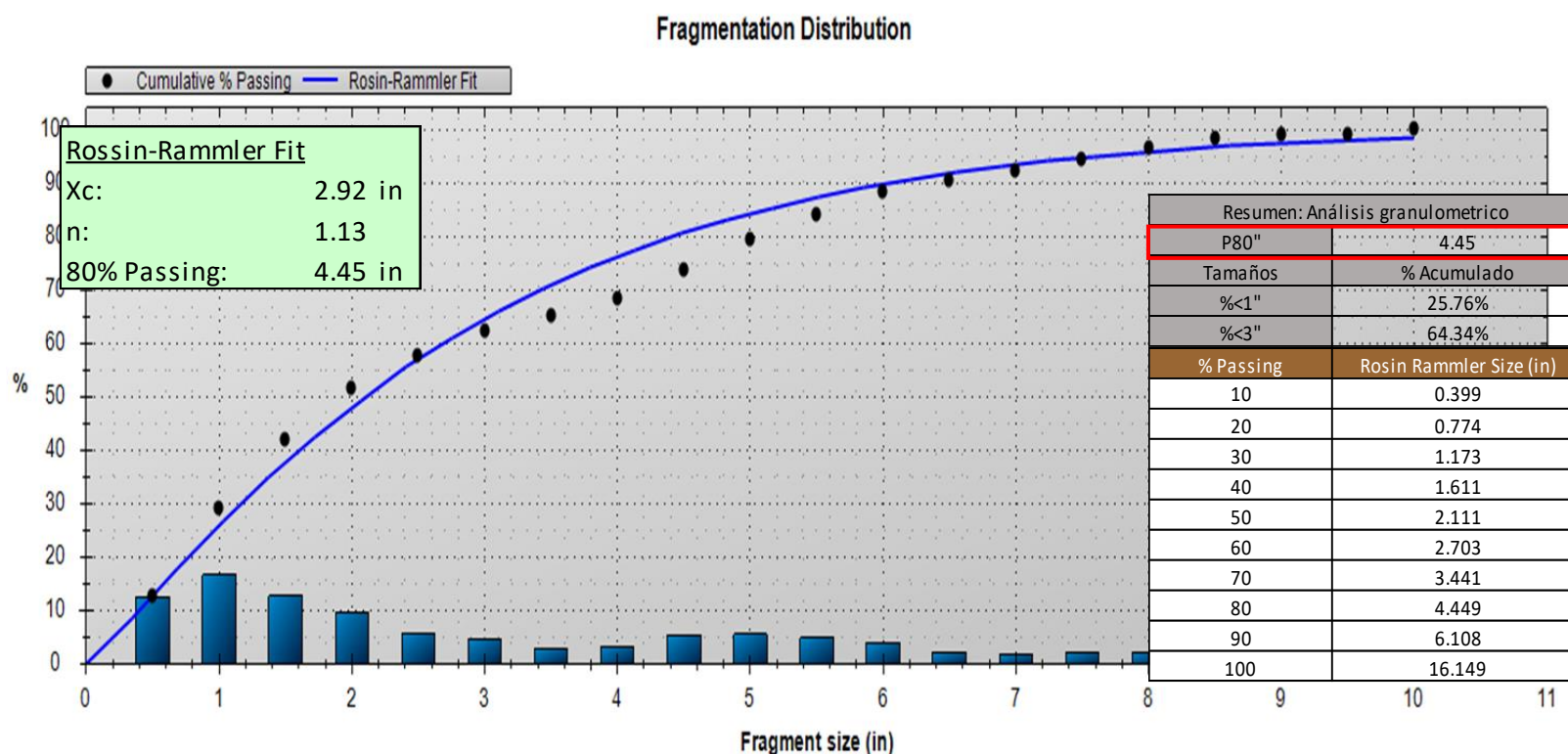


Figura 5.26: Distribución de fragmentación obtenida con el Software PowerSieve (Prueba 01).

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3.3. Tasa de excavación de pala en el material volado con triple iniciación

Se realizó el análisis y comparación de la tasa de excavación del equipo de minado en el proyecto de voladura con triple iniciación electrónica, para este caso se considera la pala 12 (CAT 6060 FS) que será utilizado para el minado del proyecto 3705_007-008 donde se realizó la prueba N° 01 con triple iniciación electrónica. En la siguiente **Tabla 5.10** se aprecia la comparación de la productividad promedio de la pala 12 en el material volado con doble y triple iniciación electrónica.

Tabla 5.10: Tasa de excavación promedio de la pala 12.

EQUIPO DE MINADO	CODIGO (Pala)	RENDIMIENTO PROMEDIO (Tm/H)	
		(Doble iniciación)	(Triple iniciación)
CAT 6060 FS	12	2377	2743,5

Fuente: Despacho mina – MMG Limited Las Bambas.

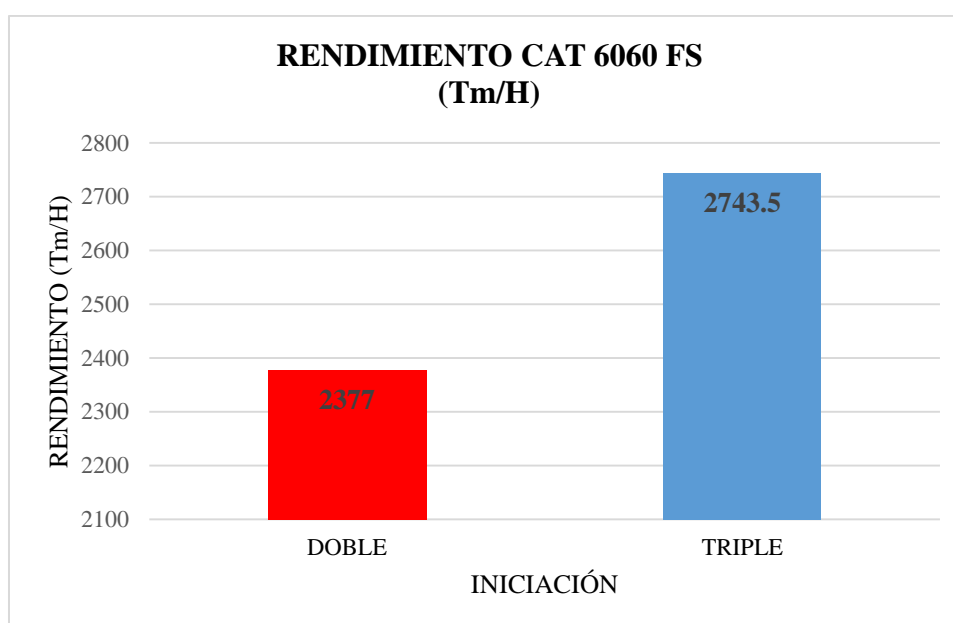


Figura 5.27: Comparación de rendimientos del equipo de minado (Prueba 01).
Fuente: Elaboración propia.

Se puede concluir que el rendimiento de la pala 12 en el material volado con la triple iniciación electrónica se incrementó en un 15,42 % con respecto al rendimiento obtenido en el material volado con doble iniciación electrónica.

5.2.4. Prueba 02: Voladura con triple iniciación electrónica aplicando carga satélite

El día 15 de febrero del 2018 se realizó la prueba de voladura N° 02 aplicando la triple iniciación electrónica con carga satélite en zonas de mineral, fue realizada en el Nv. 3720_040 Jahuapaylla Baja.

La carga satélite consiste en ubicar una carga explosiva de 150 kilogramos en la zona del taco (ver figura 4.6 - b) que será iniciado por una prima. La finalidad de esta carga es fragmentar el material en la zona del taco

Para este análisis se toma en cuenta el proyecto de disparo en el nivel 3720, proyecto 040. En la figura 4.28 se puede observar una foto de la malla del proyecto de voladura con triple iniciación electrónica con carga satélite.



Figura 5.28: Malla de voladura con triple iniciación con carga satélite.
Fuente: Elaboración propia.

- **Datos del proyecto**

Se cargaron y dispararon 170 taladros (producción) con detonadores electrónicos i-kon III en zona de Mineral, algunos datos adicionales se pueden apreciar en la Tabla 4.11.

- Se cargaron 73 taladros de contorno con doble iniciación electrónica (dos primas) y 97 taladros con triple iniciación electrónica (tres primas) con carga satélite.

- Secuencia de salida: “En Echelon”. Se coordinó con el personal de MMG-Las Bambas, tiempo entre taladros: 17, 110,220 ms, tiempo entre filas: 160-180 ms.
- Se tuvo 03 taladros tapados no cargados ID: 505, 602,494.
- Litología: El tipo de roca predominante está conformado principalmente de EndoSkarn y Monzonita Cuarcifera que presentan una resistencia a la compresión simple de 271,9 MPa y 270,5 MPa respectivamente
- Malla 100% taladros con agua.
- Hora de Voladura: 1:30 p.m.

Tabla 5.11: Datos del proyecto de voladura con triple iniciación electrónica.

Datos de Disparo		
Proyecto de voladura	3720-040	
Fecha de voladura	07/03/2018	
Diámetro de taladro (Pulg.)	12 1/4”	
Malla	Mineral	
Burden(m)	5,2	
Espaciamiento(m)	6,0	
Altura de banco (m)	15	
Sobre perforación (m)	1,5	
Tipo de roca	Endo Skarn/Monzonita Cuarcifera	
Resistencia de la roca (MPa)	272,9/271,1	
Explosivo utilizado	Fortis Extra 65-35	
Cantidad de taladros cargados	170	
Taladros con 01 i-kon III (Buffer)	00	
Taladros con 02 i-kon III (Contorno)	73	
Taladros con 03 i-kon III (Producción)	97	
I-kon III Programados	437	
Detonador No Reply	00	
Cantidad de Back Up	00	
Consumo de i-kon III	437	
Tiempo de retardo (ms)	2,17/,160,180	Entre taladros/filas

Fuente: Elaboración propia.

- **Diseño de carguío de taladros con triple iniciación electrónica**

El diseño de carga para la voladura con triple iniciación electrónica propuesto al área de perforación y voladura de MMG Limited Las Bambas se muestra en la figura 4.29. El carguío de taladros es realizado mediante camiones fábrica por el sistema bombeable.

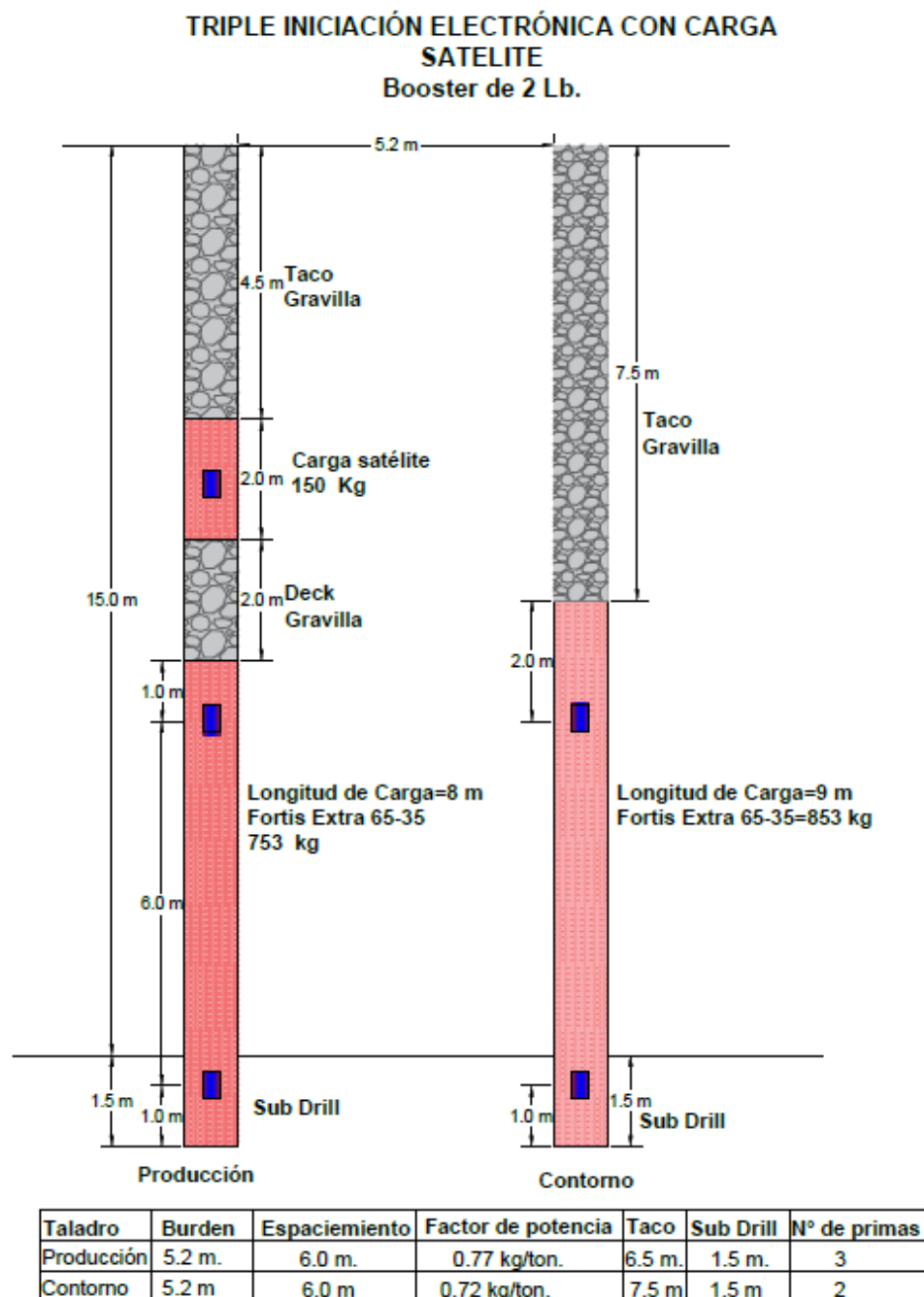
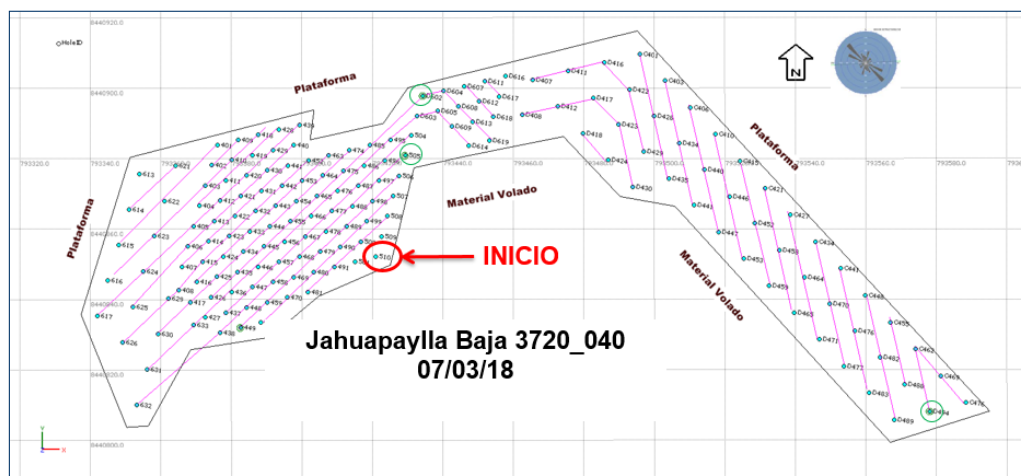


Figura 5.29: Diseño de carguío de taladros con triple iniciación (Prueba 02).
Fuente: Elaboración propia.

La triple iniciación electrónica se aplicará netamente en taladros de producción, en los taladros de contorno se aplicará doble iniciación electrónica con la finalidad de evitar posibles proyecciones de roca principalmente en zonas de cresta.

- **Secuencia de salida y movimiento de material**

La figura 4.30, muestra la secuencia de salida de la voladura (voladura en Echelon) de la misma forma específica el inicio de voladura, la figura 4.31 indica la dirección del desplazamiento del material volado.



 TALADROS TAPADOS

Figura 5.30: Secuencia e inicio de voladura del proyecto (Prueba 02)

Fuente: Asistencia técnica MMG Limited Las Bambas.

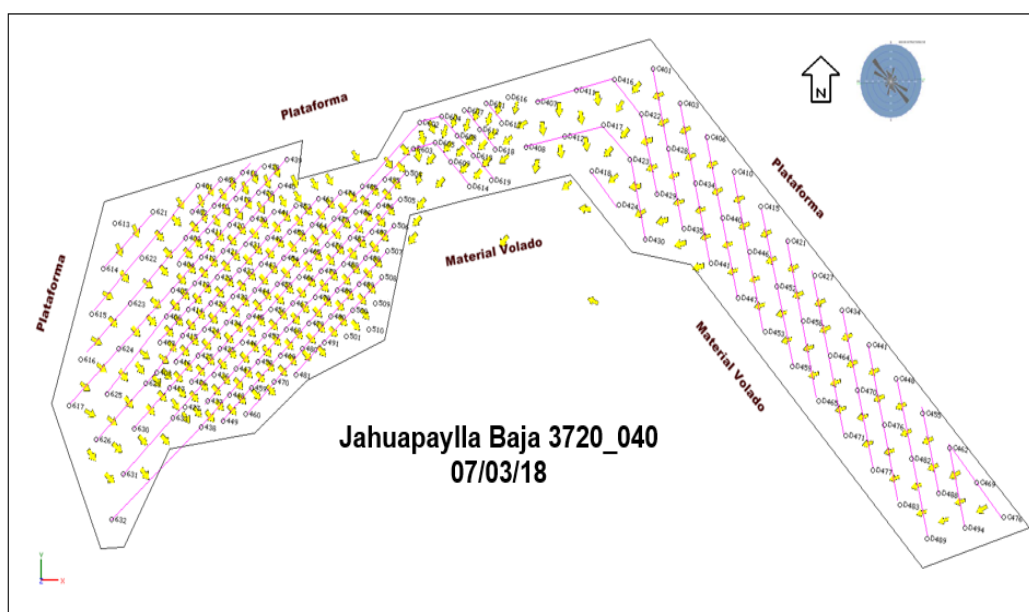


Figura 5.31: Dirección de desplazamiento del material volado (Prueba 02).

Fuente: Asistencia técnica MMG Limited Las Bambas.

5.2.4.1. Análisis de fragmentación en el frente de minado de pala 12 (Prueba 02)

- **Ubicación del frente de minado**

La figura 4.32 indica la ubicación de la pala 12 en el frente de minado del polígono 04 (mineral) donde se realizó la prueba de voladura número 03 aplicando la triple iniciación electrónica con carga satélite en la zona de Jahuapaylla Baja, nivel 3720_40 del Tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas - MMG Limited.

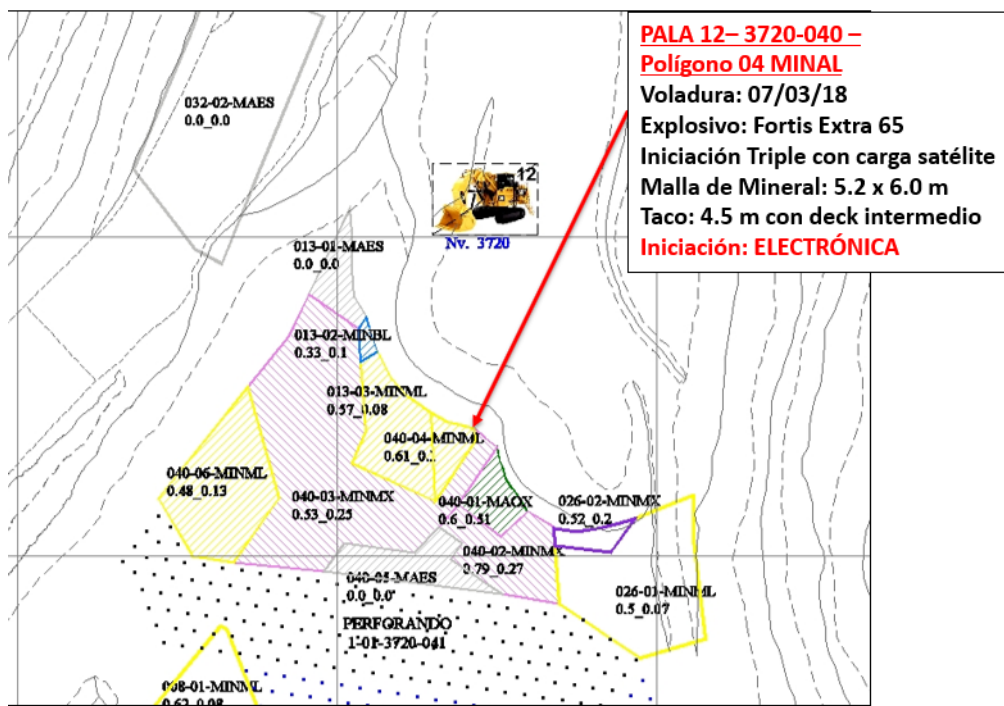


Figura 5.32: Ubicación de la pala 12 en el frente de minado (Prueba 02).
Fuente: Las bambas – MMG Limited (Área de perforación y voladura).



Figura 5.33: Frente de minado del polígono 04 (Prueba 02).
Fuente: Elaboración propia.

- **Fotografías tomadas para el análisis de fragmentación**

A nivel superficial se observa una buena fragmentación como se puede observar en la figura 4.34.

Se ha realizado análisis de 30 fotografías tomadas en los frentes de minado del cargador 12, las cuales fueron analizadas con el Software PowerSieve dando como resultado un $P80 = 3,99$ pulgadas. Estas fotos fueron tomadas en Nv. 3720 de los proyectos 040.



Figura 5.34: Imagen post voladura del proyecto (Prueba 02)
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5.35: Análisis de fragmentación (Prueba 02).
Fuente: Elaboración propia.

- **Distribución de fragmentación proyecto 3720_040 mineral**

Se ha realizado el análisis de 30 fotografías tomadas en los frentes de minado en donde el cargador 12 ha estado avanzando, las cuales fueron analizadas con el Software PowerSieve dando como resultado un $P_{80} = 3,90$ pulgadas con un porcentaje de finos menores a una pulgada de 36,68 %. La triple iniciación electrónica con carga satélite obtiene unos resultados muy óptimos así cumpliendo satisfactoriamente los requerimientos de planta, haciendo un análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que el P_{80} obtenido con la triple iniciación cumple satisfactoriamente los requerimientos de planta que es % de finos > 1 pulg. $= 35$ % y un $P_{80} \leq 4,5$ pulg.

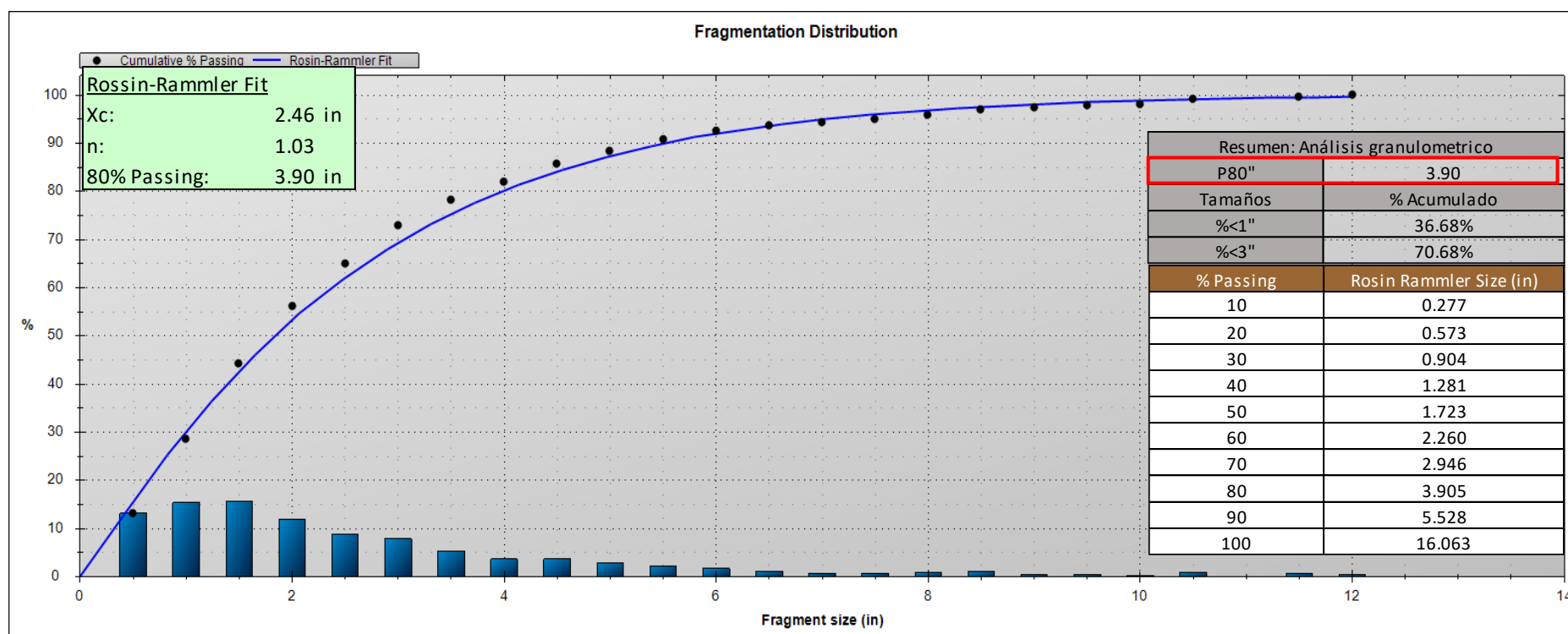


Figura 5.36: Distribución de la fragmentación obtenida con el Software PowerSieve (Prueba 02).

Fuente: Elaboración propia.

5.2.4.2. Tasa de excavación de pala en el material volado con triple iniciación

Se realizó el análisis y comparación de la tasa de excavación del equipo de minado en el proyecto de voladura con triple iniciación electrónica, para este caso se considera la pala 12 (CAT 6060 FS) que será utilizado para el minado del proyecto 3705_003-004 donde se realizó la prueba N° 02 con triple iniciación electrónica con carga satélite. En la siguiente Tabla 5.2 se aprecia la comparación de la productividad promedio de la pala 12 en el material volado con doble y triple iniciación electrónica.

Tabla 5.12: Tasa de excavación promedio de la pala 12.

EQUIPO DE MINADO	CODIGO (PALA)	RENDIMIENTO PROMEDIO (TM/H)	
		(Doble iniciación)	(Triple iniciación)
CAT 6060 FS	12	2377	2748,7

Fuente: Despacho mina – MMG Limited Las Bambas.

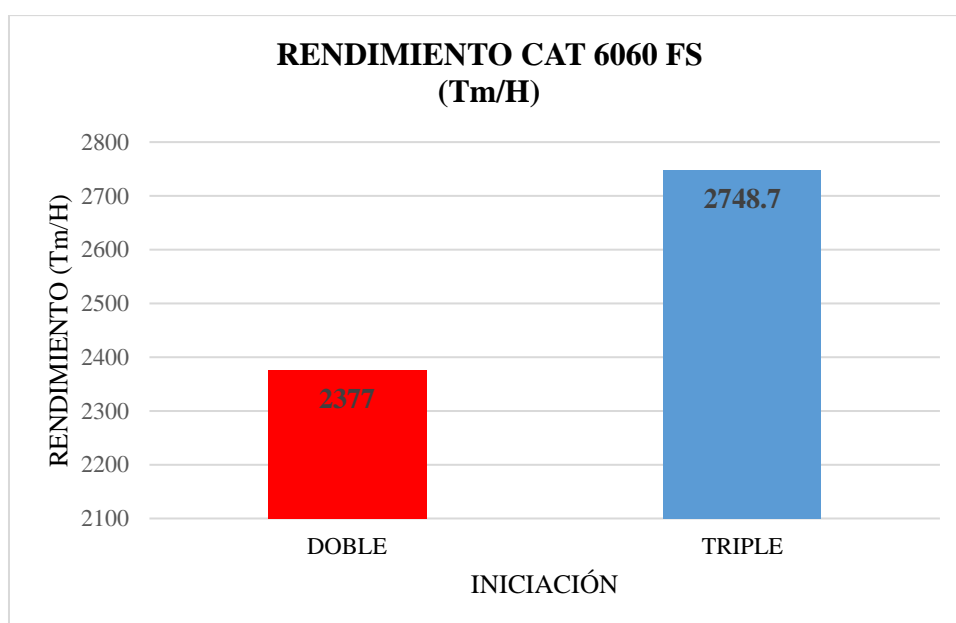


Figura 5.37: Comparación del rendimiento de los equipos de minado (Prueba 02). Fuente: Elaboración propia.

Se puede concluir que el rendimiento de la pala 12 en el material volado con la triple iniciación electrónica se incrementó en un 15,64 % con respecto al rendimiento obtenido en el material volado con doble iniciación electrónica.

5.2.5. Evaluación económica de carguío con triple iniciación electrónica

La evaluación económica de carguío de taladros con triple iniciación electrónica estará orientado solo a los taladros de producción, mas no a los taladros de contorno y buffer porque no hay ningún cambio en los diseños de carguío. Para el carguío de taladros de contorno y buffer con triple iniciación electrónica se considera el mismo diseño empleado en el carguío con doble iniciación electrónica (ver figura 4.11).

A. Triple iniciación electrónica en carga corrida (Prueba 01)

En la **Tabla 5.13** se muestra el costo de los accesorios de voladura y explosivo Fortis Extra 65/35 utilizado en el carguío de taladros de producción. El costo que demanda el carguío de un taladro de producción con triple iniciación electrónica (carga corrida) es de 701,18 dólares en accesorios de voladura y explosivo.

Tabla 5.13: Costo de explosivos para taladros de producción con triple iniciación.

EXPLOSIVOS Y/O ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO		PRECIO TOTAL (\$/Taladro)
		Unidad	Valor	
Booster de pentolita 2 LB	3	\$/Pza.	10,50	31,5
Detonador no eléctrico	3	\$/Pza.	4,45	13,35
Detonador electrónico	3	\$/Pza.	25,00	75
Fortis Extra 65/35	953	\$/kg.	0,61	581,33
COSTO TOTAL POR TALADRO (\$/Taladro)				701,18

Fuente: Elaboración propia.

B. Triple iniciación electrónica con carga satélite (Prueba 02)

En la Tabla 5.4 se muestra el costo de los accesorios de voladura y explosivo Fortis Extra 65/35 utilizado en el carguío de taladros de producción. El costo que demanda el carguío de un taladro de producción con triple iniciación electrónica (carga satélite) es de 670,68 dólares en accesorios de voladura y explosivo.

Tabla 5.14: Costo de explosivos para taladros de producción con triple iniciación.

EXPLOSIVOS Y/O ACCESORIOS	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO		PRECIO TOTAL (\$/Taladro)
		Unidad	Valor	
Booster de pentolita 2 LB	3	\$/Pza.	10,50	31,5
Detonador no eléctrico	3	\$/Pza.	4,45	13,35
Detonador electrónico	3	\$/Pza.	25,00	75
Fortis Extra 65/35	903	\$/kg.	0,61	550,83
COSTO TOTAL POR TALADRO (\$/Taladro)				670,68

Fuente: Elaboración propia.

5.2.5.1. Resumen de costos de carguío con triple iniciación electrónica

En la Tabla 5.5 se puede observar que el costo de carguío de los taladros de contorno y buffer no varía, esto es debido a que no se hicieron cambios en el diseño de carguío establecidos para el carguío con doble iniciación electrónica.

Los cambios en el diseño de carguío con la triple iniciación electrónica solo aplican para los taladros de producción.

Tabla 5.15: Costo de accesorios y explosivos de acuerdo al tipo de iniciación.

TALADRO	COSTO DE ACUERDO AL TIPO DE INICIACIÓN		
	Doble	Triple Carga corrida	Triple Carga satélite
Producción	\$629,73	\$701,18	\$670,68
Contorno	\$599,23	\$599,23	\$599,23
Buffer	\$252,95	\$252,95	\$252,95

Fuente: Elaboración propia.

Se observa un incremento en los costos de carguío de la triple iniciación con respecto al carguío con doble iniciación.

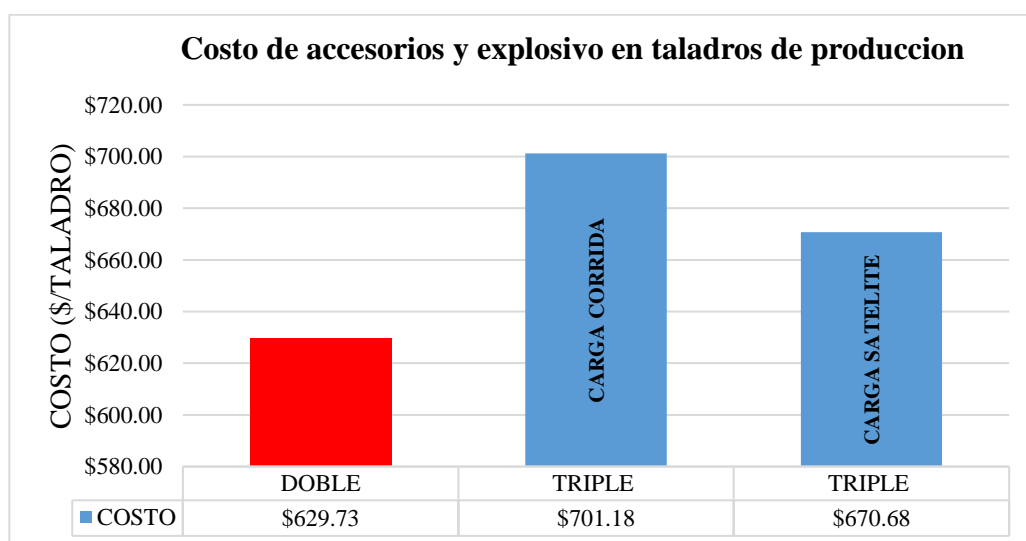


Figura 5.38: Comparación de los costos de carguío en taladros de producción.

Fuente: Elaboración propia.

- El costo de carguío de taladros con triple iniciación en carga corrida (caso de pruebas 01) se incrementó en un 11,3 % con respecto a la doble iniciación.
- El costo de carguío de taladros con triple iniciación con carga satélite (caso de pruebas 02) tiene un incremento de 6,5 % con respecto a la doble iniciación.

5.2.5.2. Resumen general de pruebas de fragmentación

En la Tabla 4.16 se puede observar un resumen de los resultados de fragmentación obtenidas en cada una de las pruebas realizadas, así mismo se detalla la cantidad de tiros cortados ocurridos durante las pruebas.

Tabla 5.16: Resumen de resultados de fragmentación obtenidos.

Numero de prueba	P80 (pulgadas)	Fino menor a 1 pulgada (%)	N° de cortes
Prueba línea base	6.05	25.6	2
Prueba 01 (carga corrida)	4.31	33.66	0
Prueba 02 (carga satélite)	3.90	36.68	1

Fuente: Elaboración propia.

5.2.6. Evaluación y mitigación de tiros cortados

5.2.6.1. Resumen histórico de tiros cortados

En la figura 4.39 se muestra el resumen de la ocurrencia de tiros cortados en los años 2016 y 2017, en el año 2016 las voladuras se realizaban con iniciación electrónica simple (una prima).

Para el año 2017 se implementó las voladuras con doble iniciación electrónica (dos primas) con la finalidad de mejorar la fragmentación y reducir la incidencia de tiros cortados.

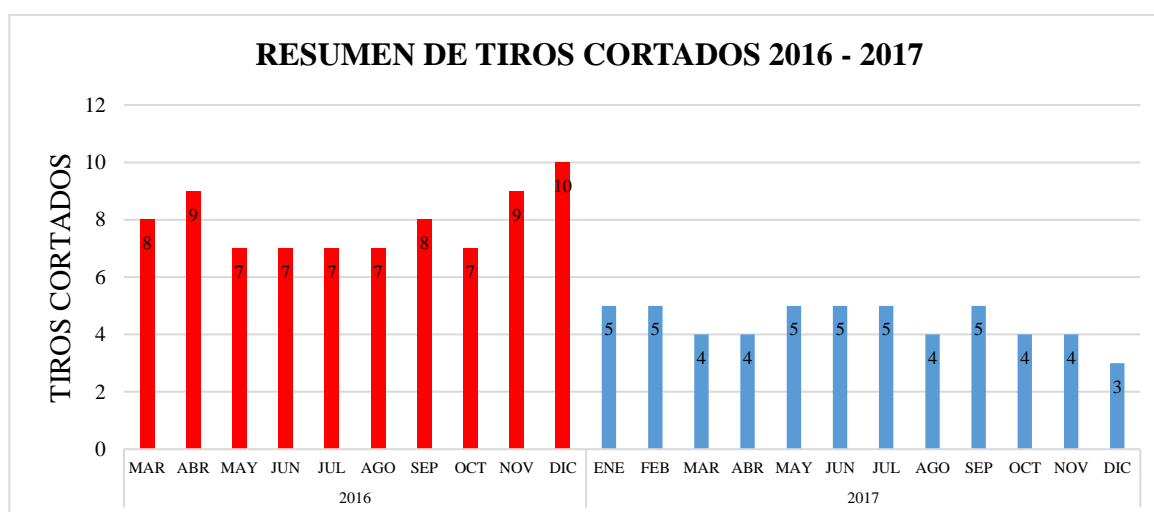


Figura 5.39: Resumen de tiros cortados en el año 2016 y 2017 con doble iniciación.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando el gráfico de la figura 4.39 podemos concluir que con la implementación de la doble iniciación electrónica se logró reducir la tasa de ocurrencia de tiros cortados.

Con este análisis se puede concluir que la doble iniciación electrónica reduce la probabilidad de ocurrencia de un tiro cortado.

5.2.6.2. Principales causas de un tiro cortado

Se identificaron dos principales factores que causan los tiros cortados, uno de los factores más importantes es el factor humano y el factor operacional (ver figura 4.40).

La falta de capacitación del personal y restricción de habilidades sumado al incumplimiento de los procedimientos de tapado de taladros (ver anexo PETS TAPADO) conllevan a la generación de tiros cortados.

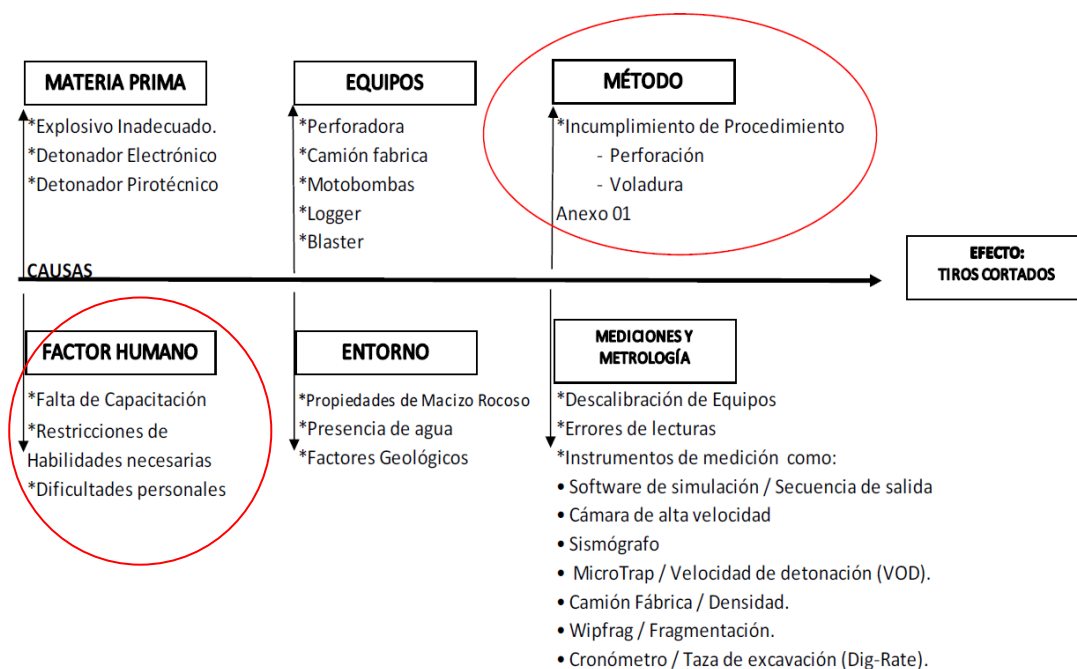


Figura 5.40: Factores que causan los tiros cortados en MMG Limited – Las Bambas. Fuente: Excelencia operacional.

5.2.6.3. Planes de acción para mitigar los tiros cortados

- Capacitación del personal operativo en buenas prácticas operativas.
- Se implementó un plan de capacitación y entrenamiento del personal operativo en temas de carguío y tapado de taladros de acuerdo a los procedimientos escritos de trabajo seguro.
- Se realizaron jornadas de concientización sobre las consecuencias fatales de la presencia de un tiro cortado en un proyecto de voladura que va a ser minado.

5.2.6.4. Controles durante el tapado de taladros

A. Tubo de PVC

Se implementó la utilización de tubos de PVC con una longitud de 5 metros con la finalidad de proteger las líneas descendentes durante la colocación del taco (tapado de taladros).

Este tubo cuenta con una ranura longitudinal en donde se introducen las líneas quedando estas dentro del tubo de PVC.

B. Granulometría del material de tapado

Se implementaron controles de la granulometría del material de tapado (grava), estas debían tener un P80 igual a 3 pulgadas para garantizar una mejor retención de la energía y reducir los cortes ocasionados por fragmentos de roca de mayor tamaño.

5.2.6.5. Detalles de tiros cortados en voladuras con doble y triple iniciación electrónica

En la figura 4.41 se muestra el resumen de tiros cortados con doble iniciación electrónica en el año 2017, en enero del 2018 se iniciaron las pruebas con la triple iniciación para su posterior implementación en zonas de mineral.

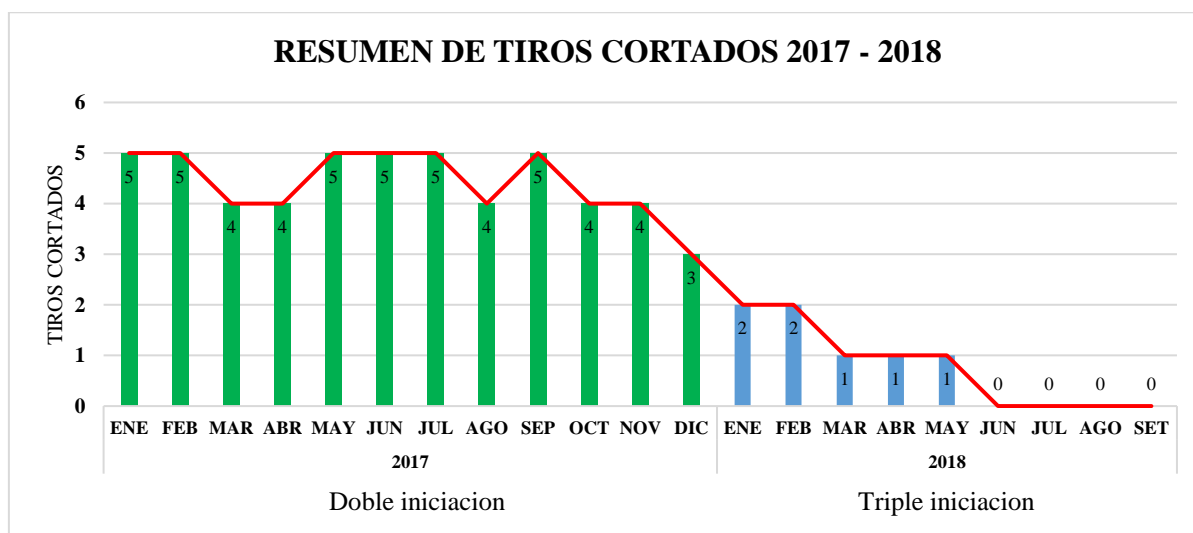


Figura 5.41: Resumen de tiros cortados con doble y triple iniciación electrónica.

Fuente: Elaboración propia.

Los Tiros Cortados, son el riesgo mayor del proceso de voladura, lo que podría ocasionar una detonación no deseada durante el proceso de minado del material volado.

5.2.6.6. Resumen general de tiros cortados por años

En el periodo de marzo a diciembre del 2016 se empleaba voladuras con iniciación simple, en ese año se reportaron 79 tiros cortados que representan el 0.1 % de los detonadores consumidos en ese periodo.

En el año 2017 se emplearon doble iniciación electrónica en las voladuras primarias donde se reportaron 53 tiros cortados que representan el 0.05 % de los detonadores I-Kon consumidos en ese año, se puede observar reducción en la cantidad de los tiros cortados.

En el año 2018 se iniciaron las pruebas con la triple iniciación electrónica, en el periodo de enero a setiembre solo se reportaron 8 tiros cortados la cual representa el 0.01 % de los detonadores consumidos en ese periodo; por lo cual se puede concluir que con la triple iniciación se logró reducir considerablemente los tiros cortados.

La información con más detalle se puede observar en el **Anexo C**.

Tabla 5.17: Resumen del porcentaje de tiros cortados con respecto al número de detonadores consumidos.

INICIACION	Consumo I-Kon	N° Tiros Cortados	% 2016	% 2017	% 2018
SIMPLE	78178	79	0.10 %	-	-
DOBLE	104312	53	-	0.05 %	-
TRIPLE	75265	8	-	-	0.01 %

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Discusión

5.3.1. Análisis de resultados de diseño de perforación

Para lograr la optimización de los resultados de fragmentación de rocas se realizaron diferentes pruebas para determinar el diseño de perforación más adecuado y orientado al mayor aprovechamiento de la velocidad de detonación del explosivo a utilizar, por lo que utilizamos el modelo de Pearce para obtener los parámetros de perforación obteniendo lo siguiente:

$$B_{\max} = 5,82 \text{ m}$$

A partir de este Burden y mediante pruebas realizadas en campo se realizó el ajuste a:

$$B = 5,20 \text{ m}$$

A partir de este resultado pudimos obtener los demás parámetros de diseño utilizando modelos matemáticos como el de Lopez Jimeno, obteniendo:

$$E = 6,0 \text{ m}$$

$$J = 1,5 \text{ m (estandarizado en bambas)}$$

$$L_t = 6,5 \text{ m}$$

$$H = 15,0 \text{ m (diseñado en función a los equipos de minado)}$$

Donde:

$$B = \text{Burden}$$

$$E = \text{Espaciamiento}$$

$$L_t = \text{Longitud de taco}$$

$$H = \text{Altura de banco}$$

El diseño obtenido dio mejores resultados en fragmentación final en comparación con el diseño antes utilizado.

5.3.2. Análisis de los resultados en la elección de mezcla explosiva

Para la determinar la mezcla explosiva a utilizar se tomaron en cuenta las características propias de cada configuración de mezcla de Heavy Anfo que pueden producirse en los camiones mezcladores que se utilizan para el carguío de taladros, tomando en cuenta únicamente a los de tipo bombeable ya que la zona donde se realizaron las pruebas se encontró la presencia predominante de taladros con agua.

Las pruebas de velocidad de detonación realizadas en las mezclas explosivas Fortis Extra 100, Fortis extra 70/30 y Fortis extra 65/35 se obtuvo que la configuración de

Fortis extra 65/35 obtiene la mayor valoración en velocidad de detonación por lo que se eligió esta mezcla para realizar las pruebas con triple iniciación electrónica.

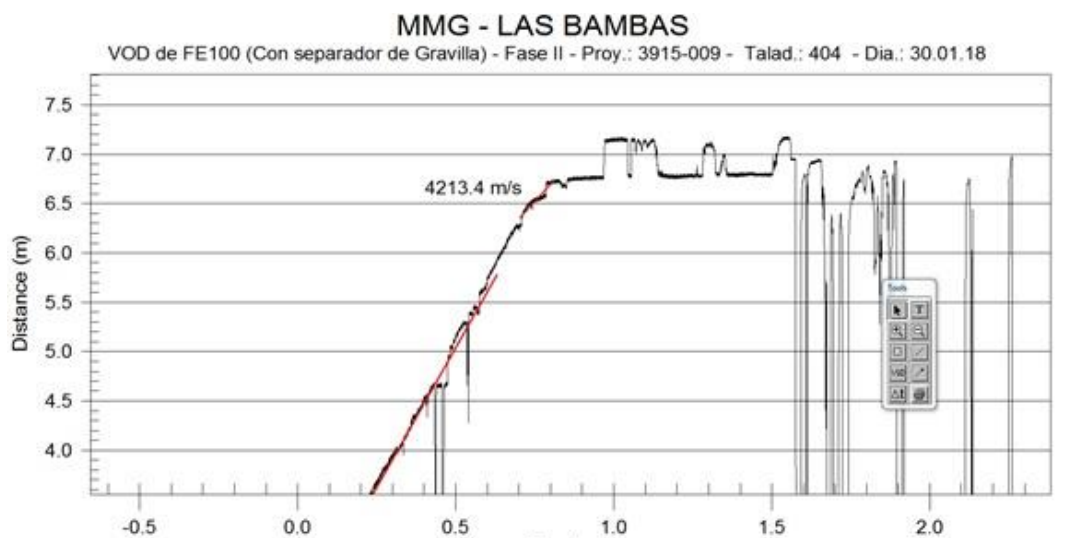


Figura 5.42: Medición de VOD en el explosivo Fortis Extra 100.

Fuente: Asistencia técnica OMS.

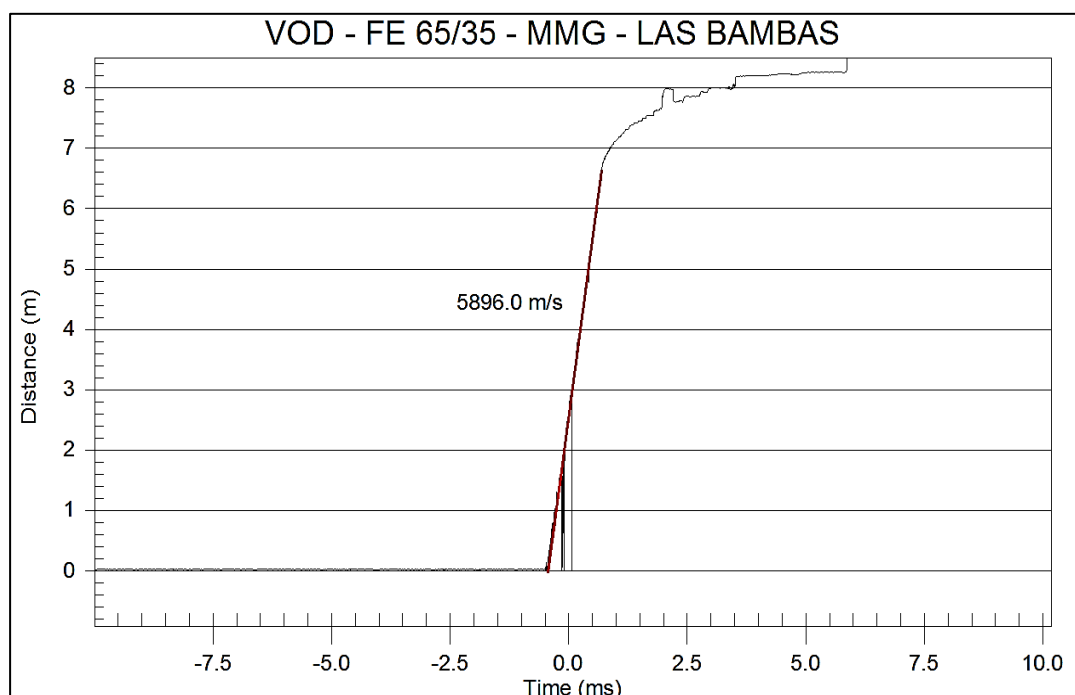


Figura 5.43: Medición de VOD en el explosivo Fortis Extra 65/35.

Fuente: Asistencia técnica OMS.

5.3.3. Análisis de los resultados de fragmentación

Planta solicita un $P80 \leq 4,5$ pulgadas, haciendo un análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que el P80 obtenido con la triple iniciación electrónica cumple

satisfactoriamente los requerimientos de planta, sin embargo, el P80 = 6,05 pulg. Obtenido con la doble iniciación electrónica no cumple con los requerimientos de planta.

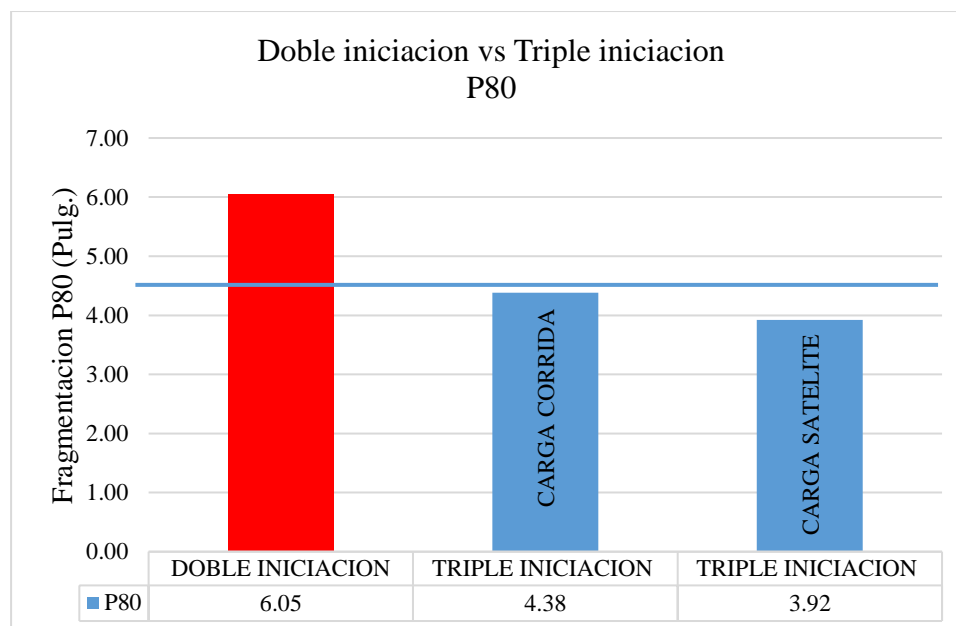


Figura 5.44: Comparación del P80 obtenido con doble y triple iniciación.
Fuente: Perforación y voladura – MMG Limited Las Bambas.

De los resultados obtenidos se puede concluir que el P80 más óptimo obtenido durante las pruebas, es con la triple iniciación electrónica con carga satélite.

El P80 obtenido con la triple iniciación electrónica en carga corrida es aceptable ya que se encuentra por debajo del P80 = 4,5 pulg. requerido por planta.

Planta solicita un % de finos < 1 pulgada mayor o igual a 35%, haciendo un análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que el % de finos < 1 pulgada obtenido con la triple iniciación electrónica con carga satélite cumple satisfactoriamente los requerimientos de planta.

El % de fino < 1 pulgada obtenido con la triple iniciación electrónica en carga corrida no cumple con lo solicitado por planta porque se obtuvo un valor inferior a 35% de finos (ver figura 4.66)

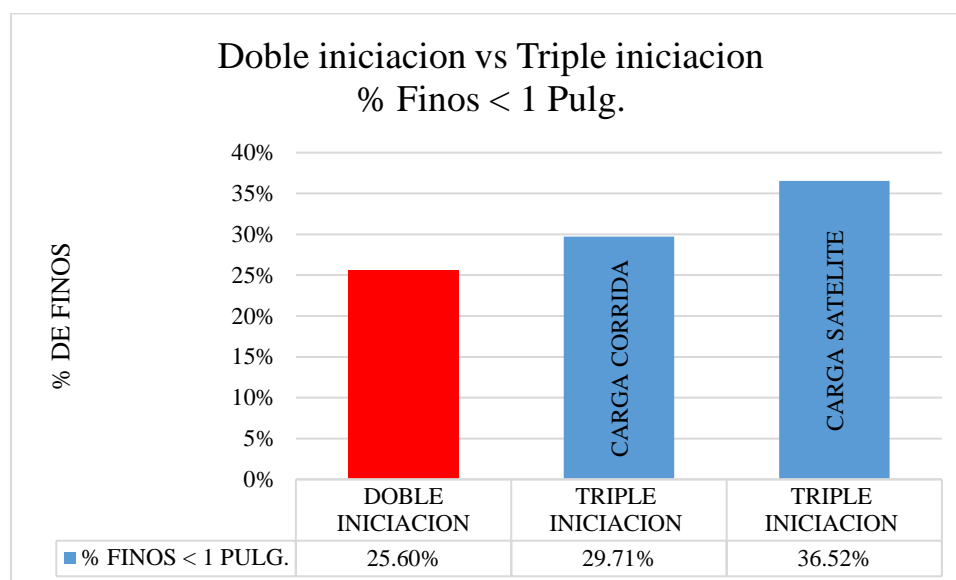


Figura 5.45: Porcentaje de finos obtenidos con doble y triple iniciación.
Fuente: Perforación y voladura – MMG Limited Las Bambas.

Se mejora la fragmentación en todas las zonas donde se realizaron las pruebas, lo que se ve reflejado también en la mejora de la productividad de los equipos de carguío, chancadora y molienda.

5.3.4. Análisis de la tasa de excavación (DIG RATE) de los equipos de minado

Haciendo el análisis y comparación de la tasa de excavación de los equipos de minado en los proyectos de voladura con doble y triple iniciación electrónica se puede observar que el rendimiento de los equipos de minado se incrementa en los frentes de minado de los proyectos de voladura en donde se aplicó la triple iniciación electrónica (ver Tabla 5.18).

Tabla 5.18: Tasa de excavación promedio de los equipos de minado.

PRUEBAS REALIZADAS	EQUIPO DE MINADO		RENDIMIENTO (TM/H)		
	Código	Modelo	Doble iniciación	Triple iniciación	Incremento
Prueba 01	Pala 12	CAT 6060 FS	2377	2743,5	15,42%
Prueba 02	Pala 12	CAT 6060 FS	2377	2741,5	15,33%
Prueba 03	Pala 01	CAT 7495 HF	4856	5898,7	21,47%
Prueba 04	Pala 12	CAT 6060 FS	2377	2748,7	15,64%

Fuente: Despacho mina – MMG Limited Las Bambas.

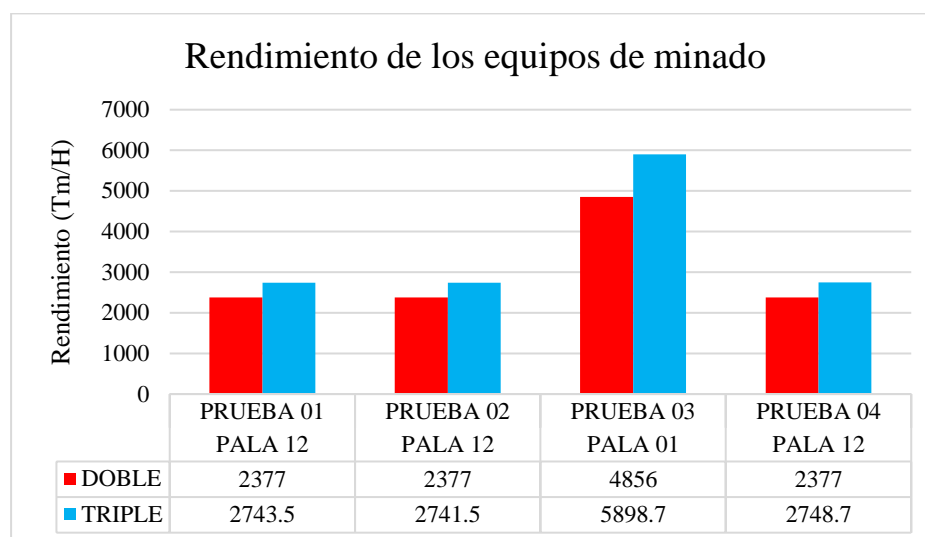


Figura 5.46: Rendimiento de los equipos de minado (doble vs triple iniciación).
Fuente: Elaboración propia

5.3.5. Análisis económico de los accesorios de voladura y explosivo Fortis Extra

Se observa un incremento en los costos de carguío de la triple iniciación electrónica con respecto al carguío con doble iniciación electrónica.

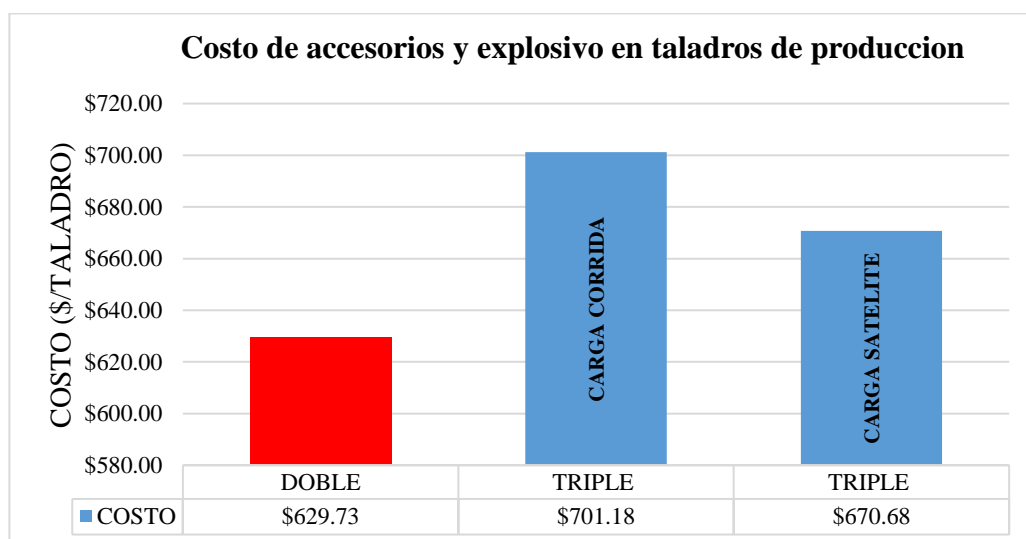


Figura 5.47: Costo de carguío en taladros de producción – doble vs triple iniciación.

Fuente: Elaboración propia

- El costo de carguío de taladros con triple iniciación en carga corrida (caso de pruebas 01) se incrementó en un 11,3 % con respecto a la doble iniciación.
- El costo de carguío de taladros con triple iniciación con carga satélite (caso de pruebas 02) tiene un incremento de 6,5 % con respecto a la doble iniciación.

5.3.6. Evaluación de resultados de tiros cortados

Se observa una tendencia a reducir la ocurrencia de tiros cortados a partir del mes de enero del 2018, mes en donde se iniciaron las pruebas con la triple iniciación y al mismo tiempo se implementaron los planes de acción para mitigar los tiros quedados.

La ocurrencia de tiros quedados descendió a cero a partir del mes de junio del 2018, con este resultado podemos concluir que la efectividad de los planes de acción empleados para mitigar los tiros quedados sumado a la implementación de la triple iniciación electrónica conllevan a la mitigación total de la presencia de tiros cortados en los proyectos de voladura.

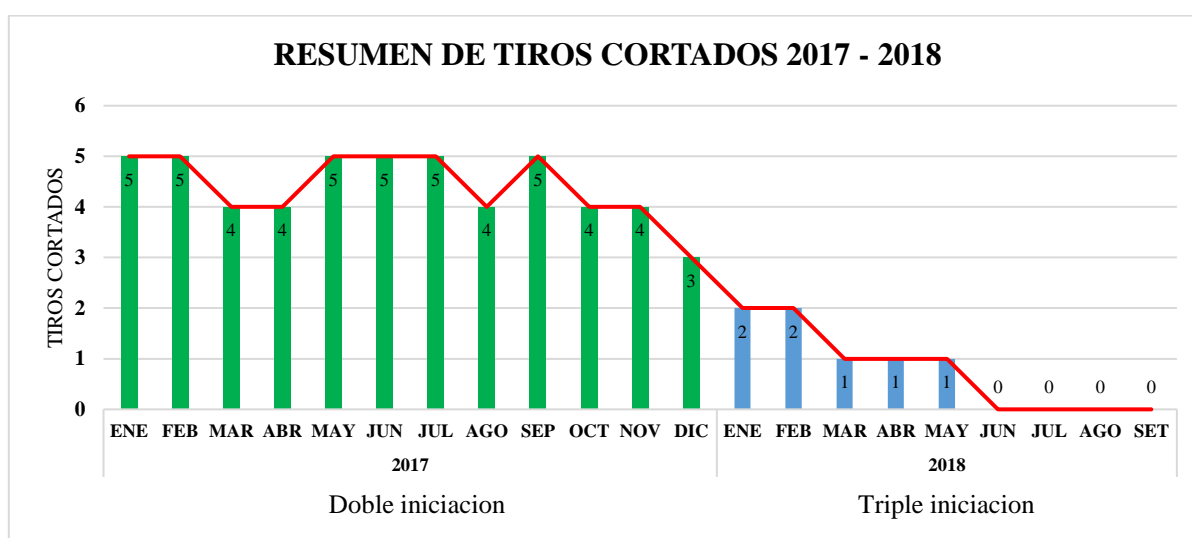


Figura 5.48: Resumen de tiros cortados con doble y triple iniciación.
Fuente: Perforación y voladura – MMG Limited Las Bambas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El diseño de la malla de perforación de 5.20 metros de burden por 6.00 metros de espaciamiento determinado contribuye en la optimización de la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas.
- La mezcla explosiva seleccionada Fortis Extra 65/35 por sus características como la resistencia al agua y alta velocidad de detonación contribuyeron significativamente en la optimización de los resultados de la fragmentación de mineral en el tajo Ferrobamba de la unidad minera Las Bambas obteniendo una fragmentación con porcentaje de finos menores a una pulgada de 29.71% a 36.52% en promedio.
- La triple iniciación electrónica si genera voladuras más eficientes con respecto a la doble iniciación electrónica, estos resultados eficientes de voladura están reflejado en los resultados óptimos de fragmentación (valores de P80 inferiores a lo solicitado y porcentaje de finos menores a una pulgada por encima del 35%), así mismo en el incremento del rendimiento de los equipos de minado.
- El uso de la triple iniciación electrónica contribuye en la reducción y/o mitigación de tiros cortados, ya que se tiene tres o dos primas que van a iniciar la columna explosiva en caso de que unos de los iniciadores fallasen.

La triple iniciación electrónica sumada a los planes de acción implementados para mitigar los tiros cortados lograron reducir la ocurrencia de tiros cortados a partir del mes de junio del 2018.



6.2. Recomendaciones

- Estandarizar el uso de la triple iniciación electrónica con carga satélite para obtener una buena fragmentación y al mismo tiempo optimizar el rendimiento de los equipos de minado y chancadora.
- El personal encargado de operar los camiones fábricas debe estar debidamente capacitado en la operación del equipo para poder obtener una mezcla explosiva de calidad ya que así se obtendrán mejores resultados.
- Antes de iniciar cualquier actividad se debe revisar los taladros de la malla de perforación, verificando que estos cumplan con todos los parámetros establecidos en el diseño evitando así cualquier desviación en el carguío de taladros.
- Utilización del tubo de PVC durante el tapado de taladros para proteger las líneas descendentes del detonador y asegurarse que el material de tapado tenga una granulometría uniforme y esté libre de rocas muy grandes que puedan producir daños en el cable del detonador. Durante en el primado, descender la prima hasta el fondo del taladro por el centro del mismo cuidando al cable del detonador; luego, asegurar las líneas descendentes en la superficie para evitar su caída al fondo del taladro.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adolfo, Preciado Contreras Luis. 2015.** Probabilidad y Estadística. [En línea] 22 de Mayo de 2015. <http://probabilidadyestadisticagpp.blogspot.com/>.
- Agreda T., Carlos. 2015.** *Voladura de Rocas en Minería Superficial*. Lima : Camiper, 2015. págs. 112-117.
- Aguirre Garcia , Andres Alejandro. 2016.** *Optimización de parámetros de tronadura en función de explosivos de alta energía* . Santiago : Universidad de Chile, 2016.
- Ames L., Victor. 2012.** *Perforación y Voladura de Rocas I*. Cuarta. Peru : PNCP, 2012. pág. 9
- Area de Asistencia Técnica - MMG Las Bambas. 2017.** *Eventos de presión dinámica*. Challhuahuacho : s.n., 2017.
- Atlas Powder Company. 2012.** *Explosives and Rock Blasting*. s.l. : Dallas: Atlas Powder Company, 2012.
- Barra Nayhua , Junior Percy. 2017.** *Influencia de los factores de riesgo que provocan accidentes de trabajo, aplicación de la seguridad basada en el comportamiento*. Arequipa : UNSA, 2017.
- BERNAOLA ALONSO, José, CASTILLA GÓMEZ, Jorge y HERRERA HERBERT, Juan. 2013.** *Perforación y Voladura de Rocas en Minería*. Madrid : UPM, 2013.
- Brookes, M. 2006.** *Structural Review of the Las Bambas Project Area: Informe Interno Xstrata Peru*. 2006.
- Chiapetta, Raul F., BAUER, Alan y BURCHELL, S. L. 1983.** *The use of high speed motion picture photography in blast evaluation and design*. s.l. : ISEE, 1983.
- Curso de explosivos y voladura Dyno nobel* . **CAMIPER. 2016.** Lima : s.n., 2016.
- Curso de explosivos y voladura ORICA*. **Mantilla Chavez, Jose. 2016.** Chalhuahuacho : s.n., 2016.
- Diccionario económico, estadístico y matemático*. **Marco Sanjuan, Francisco Javier. 2019.** s.l. : Econopedia, 2019.
- DS N°024-2016-EM. 2016.** *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería*. Lima : Distribuciones Gutierrez, 2016.



- ENAE S.A. 2014.** *Manual de Tronadura*. Chile : s.n., 2014. pág. 149.
- Exsa S.A. 2012.** *Manual Practico de Voladura*. Lima, Peru : s.n., 2012.
- Google Earth, Pro. 2019.** Tajo Ferrobamba - MMG Las Bambas. 2019.
- HOPLER, R.B. 2008.** *Manual del Especialista en Voladura*. 17 va. EE.UU. : s.n., 2008.
- Humeres, Ignacio y Ferrada, Alejandro. 2014.** *Determinación de Presion Diámica y su Efecto en la Voladura*. Chile : ASIEX Valdivia, 2014.
- Hurtado Nuñez, Bladimir. 2017.** *Influencia del mantenimiento de vias de acarreo en la productividad del tajo Ferrobamba*. Cusco : UNSAAC, 2017.
- Hustrulid, William. 1999.** *Blasting Principles For Open Pit Mining*. Netherlands : A.A Balkema, 1999.
- IME, Institute of Makers of Explosives. 2014.** *Safety Library Publications (SLP#17)*. Neeva York : The Institute of Makers of Explosives, 2014.
- Ingemmet. 2019.** Geocatmin. [En línea] Ingemmet, 28 de Enero de 2019. [Citado el: 17 de Abril de 2019.] <http://geocatmin.ingemmet.gob.pe/geocatmin/>. 1.
- Inostroza Sierra , Jaime Roosevelt. 2014.** *Optimizacion de la fragmentacion en las rocas con la aplicacion de la doble iniciacion electronica en la explotacion de cobre porfirítico a cielo abierto*. Lima, Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2014. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero de Minas.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. 2003.** *Manual de Perforacion y Voladura de Rocas*. Madrid : ITGE, 2003.
- ISEE. 2008.** *Manual del Especialista en Voladura*. EE.UU. : ISEE, 2008.
- Johnson E, Catherine. 2014.** *Fragmentation Analysis in the Dynamic Stress Wave Collision Regions in Bench Blasting*. 2014.
- Kanchobolta , Sarma S. 1998.** *Optimum Blasting*. 1998.
- Konya C., J. 1988.** *Manual de Voladura de Rocas*. 1988.
- Las Bambas. 2017.** Conociendo Las Bambas. [En línea] Copyright © Las Bambas 2017, 2017. <http://www.lasbambas.com/conociendo-las-bambas>.
- Lopez J., Carlos. 2008.** *Manual de Perforacion y Voladura de rocas*. Madrid : s.n., 2008.



Lownds C., Michael Mick. 2000. *between - hole shock pressures in blasting for various hole diameters.* EE.UU : s.n., 2000.

Mac Kenzie, C. 1984. *Estado del Arte de la Tronadura.* Santiago : Chile, 1984.

Manual del Sistema Exel. **Orica Mining Services Perú S.A. 2010.** 2010.

Mauricio, Joze Briceño. 2015. Proyecto Las Bambas. [En línea] 31 de Marzo de 2015.

https://prezi.com/sxk4j7ddsy_i/proyecto-las-bambas/.

Miranda Salas , Yoshiro. 2009. *Estudio del rendimiento entre detonadores electronicos y no electricos e imoplicancia en la economia del proceso y seguridad en tajo abierto.* Lima, uni. Arequipa : s.n., 2009.

Orica Mining Services Peru S.A. 2012. *Curso de Explosivos y Voladura de Rocas.* Lima : s.n., 2012.

—. **2010.** *Manual de Explosivos.* 2010.

Orica Mining Services Perú S.A. 2010. *Manual del Sistema Electronico.* Lima : s.n., 2010.

Palomino F., Luis Francisco. 2010. *Geometalurgia de los yacimientos Ferrobamba y Chalcobamba - Proyecto minero Las Bambas.* Lima : UNI, 2010.

Palomino Vilca, Jheinz. 2013. *Diseño de mallas de perforación y voladura para optimizar la fragmentación en el tajo Jessica - Cia Minera Arasi SAC.* Puno : UNA, 2013.

POMA FERNÁNDEZ, José Luis. 2012. *Importancia de la fragmentacion de la roca en el proceso gold mill (caso minera Yanacocha).* Lima : PUCP, 2012.

Powder International, Austin. 2012. *Causa, Prevencion y Acciones correctivas.* Cleveland, Estados Unidos : Austin Powder, 2012.

Queque Arias, Marcoantonio. 2017. *Estudio tecnico-Economico para la reduccion de tiros cortados y tiros falados en mineria superficial.* Tacna : Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, 2017. Vol. 1.

Quispe Arenas, Cesar Dalmiro. 2016. *Analisis de la fragmentacion resusltante de voladuras para la evaluacion de la expansion de las mallas de perforacion.* Cajamarca : Universidad Nacional Santiago Atunéz de Mayolo, 2016.

Ramirez Oyanguren, Pedro y Alejano Monge , Leandro. 2004. *Mecanica de Rocas: Fundamentos e Ingenieria de Taludes.* España : Red DESIR, 2004.



Ramirez y Alejano. 2004. *Mecanica de Rocas.* 2004.

Romero Paucar, Roger. 2016. *Voladura con detonadores electronicos para optimizar la fragmentacion y seguridad en el tajo Toromocho.* Huancayo : Universidad nacional del centro del peru, 2016.

ROMERO, Roger. 2016. Voladura de Rocas. [En línea] Noviembre de 2016.

<http://royer92voladura.blogspot.com/2016/11/>.

Rossmanith. 2003. *The Mechanics of Electronic Blasting.* 2003.

Sulca Alfaro, Rene. 2016. *Diseño de malla de perforacion y voladura en la cantera sur para la produccion de roca escollera en CIA minera El Brocal.* Puno : s.n., 2016.

Tecnologia de Explosivos. **AMES LARA, Victor. 2012.** Peru : PNCP, 2012, pág. 2.

The Mechanics of Electronic Blasting. **P., Rossmanith H. 2003.** 2003.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. 2016. Ciencia y tecnologia de los materiales. *Ciencia y tecnologia de los materiales.* [En línea] Universidad de Cantabria, 25 de enero de 2016.

[Citado el: 27 de OCTUBRE de 2020.] <https://ocw.unican.es>.

Xstrata Tintaya S.A. 2010. *EIA - Las Bambas.* Lima : Golder Associates Peru S.A., 2010.

Yamamoto. 1999. *Experimental and theoretical study on smooth blasting with electronic delay detonators.* 1999.



ANEXOS



Anexo B: Rendimiento de los equipos de minado y chancadora primaria.

FECHA DE VOLADURA	NIVEL	PROYECTO	TIPO DE MALLA	DIAMETRO DE TALADRO	ALTURA DE TALADRO	TACO	BURDEN	ESPACIAMIENTO	NUMERO DE TALADROS	TIPO DE EXPLOSIVO	INICIACIÓN	PALA		TONELAJE ROTO	P 80	RENDIMIENTO DE PALA	THROUGHPUT CHANCADORA
												Cod.	Modelo				
08/01/2018	3720	11	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	281	FE 65/35	Doble	12	CAT 6060 FS	328770.00	6.47	2382.4	3547
09/01/2018	3735		Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	266	FE 65/35	Doble	12	CAT 6060 FS	311220.00	5.48	2356.5	3458
10/01/2018	3705	4	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	196	FE 65/35	Doble	12	CAT 6060 FS	229320.00	5.17	2395.2	3320
11/01/2018	3735	1	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	224	FE 65/35	Doble	12	CAT 6060 FS	262080.00	5.56	2366.7	3445
12/01/2018	3750	17	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	263	FE 65/35	Doble	12	CAT 6060 FS	307710.00	5.68	2378.4	3497
13/01/2018	3735	7	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	346	FE 65/35	Doble	12	CAT 6060 FS	404820.00	6.17	2380.1	3525
15/01/2018	3735		Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	150	FE 65/35	Doble	01	CAT 7495 HF	175500.00	6.25	4825.6	3538
16/01/2018	3750	14	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	237	FE 65/35	Doble	01	CAT 7495 HF	277290.00	6.19	4858.7	3518
17/01/2018	3705	5	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	180	FE 65/35	Doble	01	CAT 7495 HF	210600.00	5.63	4854.8	3495
18/01/2018	3735	44	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	244	FE 65/35	Doble	01	CAT 7495 HF	285480.00	5.98	4861.7	3498
19/01/2018	3720	2	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	213	FE 65/35	Doble	01	CAT 7495 HF	249210.00	5.51	4875.1	3428
20/01/2018	3720	6	Mineral	12 1/4	16.5	7.00	5	6.0	134	FE 65/35	Doble	01	CAT 7495 HF	156780.00	6.17	4859.8	3550
PRUEBAS CON TRIPLE INICIACION ELECTRONICA																	
30/01/2018	3705	07-08	Mineral	12 1/4	16.5	6.5	5	6.0	161	FE 65/35	Triple	12	CAT 6060 FS	188370.00	4.45	2743.5	3966
15/02/2018	3720	11-12	Mineral	12 1/4	16.5	6.5	5	6.0	144	FE 65/35	Triple	01	CAT 6060 FS	168480.00	4.31	2741.5	3976
28/02/2018	3705	03-04	Mineral	12 1/4	16.5	4.5	5	6.0	272	FE 65/35	Triple	12	CAT 7495 HF	318240.00	3.95	5845.8	3997
07/03/2018	3720	40	Mineral	12 1/4	16.5	4.5	5	6.0	170	FE 65/35	Triple	12	CAT 6060 FS	198900.00	3.9	2748.7	3999

Fuente: (Area de Asistencia Tecnica - MMG Las Bambas, 2017)



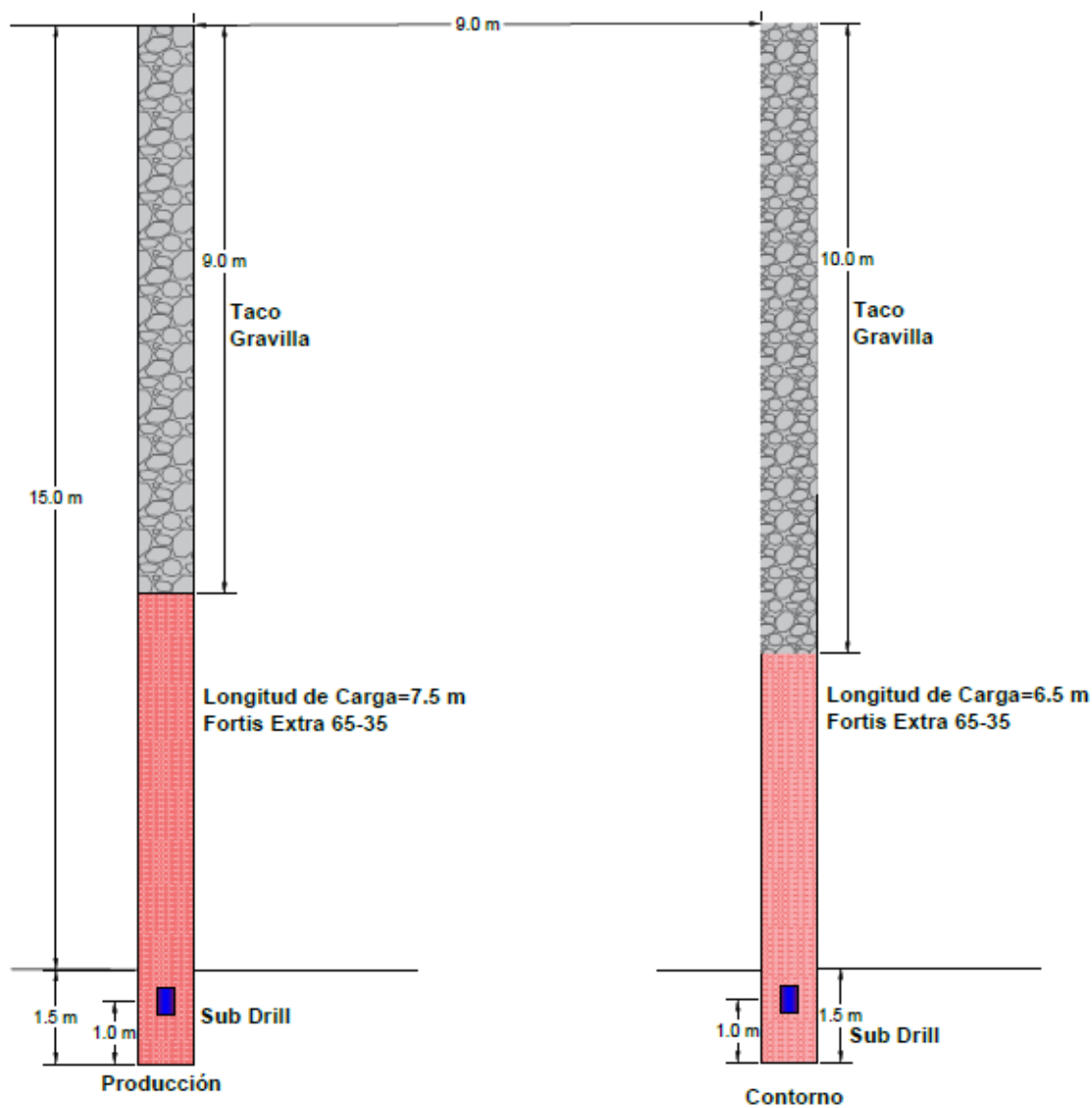
Anexo C: Resumen de consumo de Ikon vs número de tiros cortados periodo 2016 – 2018.

AÑO	MES	CONSUMO TOTAL DE I-KON (Und)	TIROS CORTADOS			TOTAL DE CORTES (Und.)	TASA DE BACK UP MENSUAL
			NO REPLY (Und.)	FUGA ALTA(Und.)	OTROS (Und.)		
2016	MAR	7,746	2	1	5	8	0.103%
	ABR	7,598	1	1	7	9	0.118%
	MAY	7,839	7	0	0	7	0.089%
	JUN	8,204	7	0	0	7	0.085%
	JUL	8,453	7	0	0	7	0.083%
	SEP	6,884	7	0	3	7	0.102%
	AGO	7,244	2	2	4	8	0.110%
	OCT	8,598	5	0	2	7	0.081%
	NOV	7,746	6	1	2	9	0.116%
	DIC	7,856	3	1	6	10	0.127%
2017	ENE	8,298	3	2	0	5	0.060%
	FEB	8,293	2	1	2	5	0.060%
	MAR	8,235	1	1	2	4	0.049%
	ABR	8,345	2	0	2	4	0.048%
	MAY	9,856	5	0	0	5	0.051%
	JUN	8,398	1	0	4	5	0.060%
	JUL	9,456	1	0	4	5	0.053%
	SEP	9,788	3	0	1	4	0.041%
	AGO	8,369	4	0	1	5	0.060%
	OCT	8,686	4	0	0	4	0.046%
	NOV	7,799	2	1	1	4	0.051%
	DIC	8,789	1	0	2	3	0.034%
2018	ENE	8,500	0	1	1	2	0.024%
	FEB	8,746	2	0	0	2	0.023%
	MAR	9,391	1	0	0	1	0.011%
	ABR	8,272	1	0	0	1	0.012%
	MAY	7,498	1	0	0	1	0.013%
	JUN	8,805	0	0	0	0	0.000%
	JUL	7,623	0	0	0	0	0.000%
	AGO	8,587	1	0	0	1	0.012%
SET	7,843	0	0	0	0	0.000%	
	TOTAL	190,980	82	12	49	134	0.070%

Fuente: Elaboración Propia.

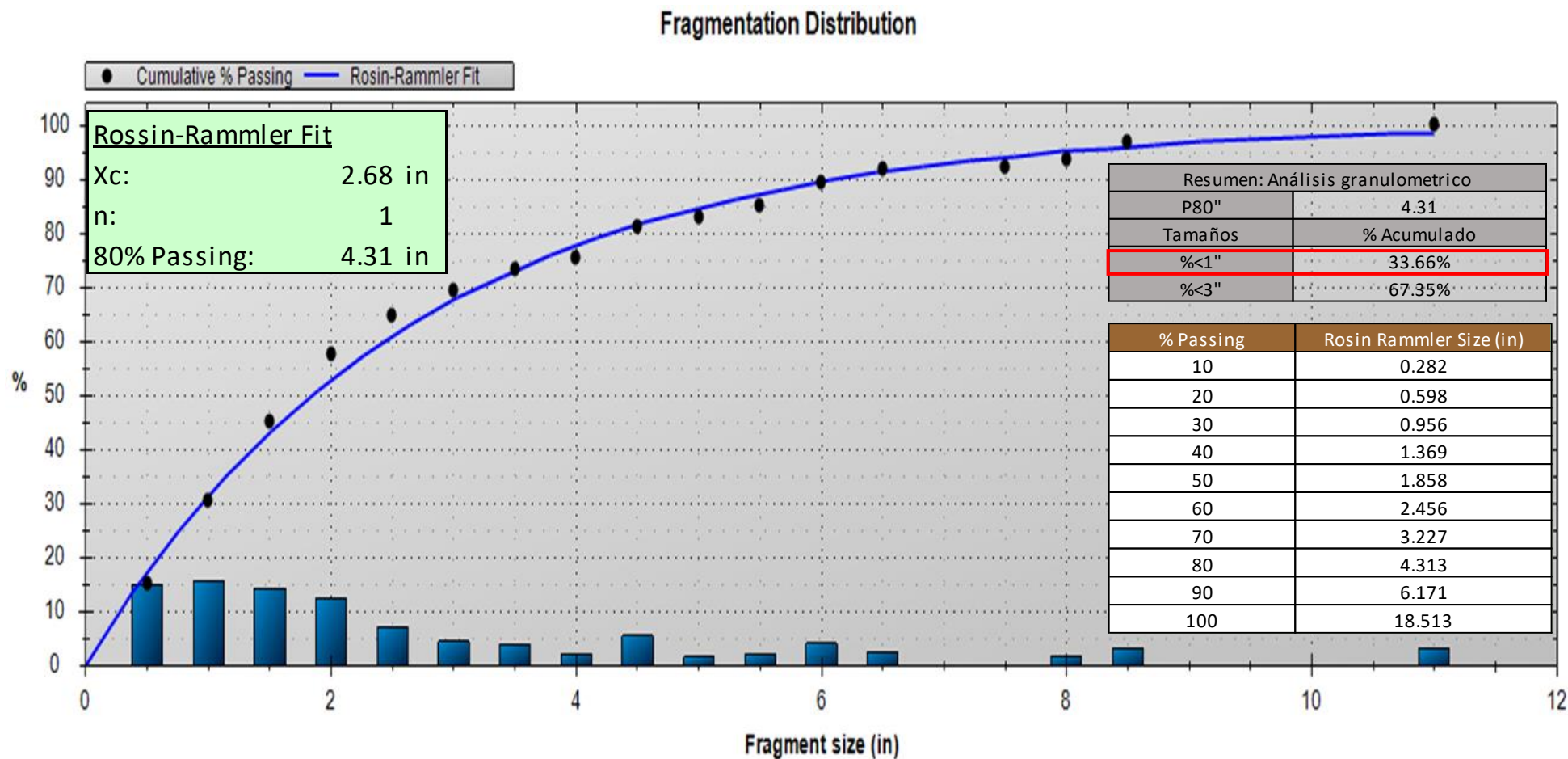
Anexo D: Diseño de carguío para taladros en zonas de desmonte o estéril.

DISEÑO DE CARGUÍO PARA TALADROS DE ESTÉRIL
Booster de 1 Lb.



Taladro	Burden	Espaciamiento	Taco	Sub Drill	Nº de primas
Producción	9.00 m.	10.50 m.	9.0 m.	1.5 m.	1
Contorno	9.00 m	10.50 m	10.0 m	1.5 m	1

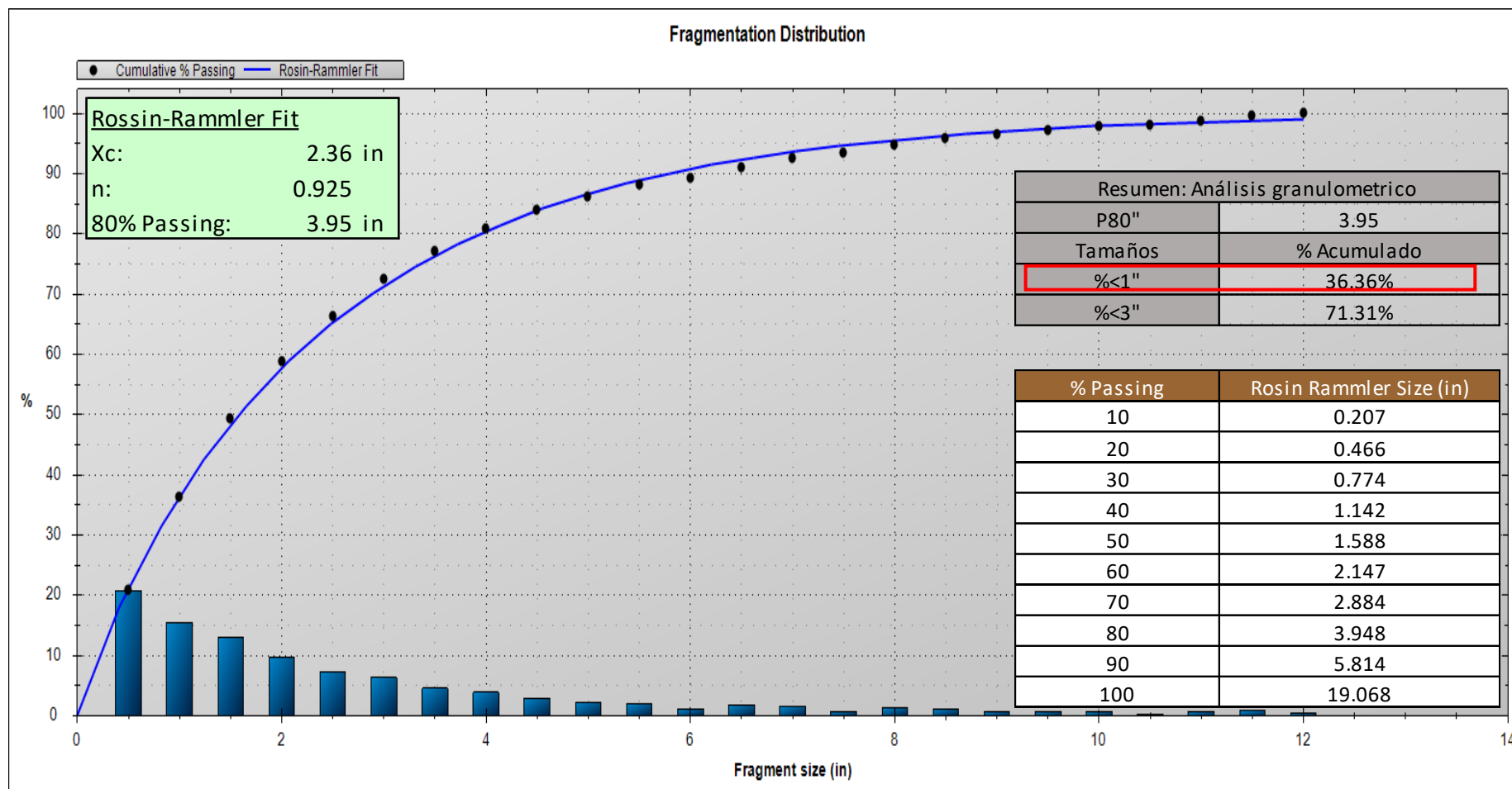
Anexo E: Distribución de fragmentación del proyecto 3720_044-047 mineral (Prueba 04)



Fuente: elaboración propia – Software PowerSieve.



Anexo F: Distribución de fragmentación proyecto 3705_003-004 mineral (Prueba 03).



Fuente: Elaboración propia – Software PowerSieve



Anexo G: Propiedades geomecánicas de macizo rocoso.

PROPIEDADES GEOMECAICAS DE MACIZO ROCOSO															
LITOLOGIA	CODIGO	UCS (Mpa)			RQD (%)			Modulo de Young (Gpa)			Modulo de Poisson			Res. A la traccion (MPa)	
		Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Mean	
40	Exoskarn	SK	87.76	131.86	175.96	68.45	82.18	95.91	31.55	102.34	173.14	0.12	0.18	0.24	12.796
47	Mármol	MBL	124.86	152.85	180.84	71.16	78.59	86.02	51.19	73.09	94.99	0.21	0.27	0.34	6.62
48	Mármol	MBC	73.74	142.75	211.76	75.58	84.11	92.64		82.79			0.32		7.6
50	Endoskarn	ENDO	111.91	167.74	223.57	68.23	82.11	95.99							12.55
62	Brecha de Contacto	BX	42.59	75.92	109.25	26.51	45.37	64.23							-
76	Monzonita Biotitica	MZB	166.26	197.62	228.98	51.64	67.32	83		78.14			0.28		13.038
77	Monzonita Horbléndica	MZH	134.2	187.8	241.4	64.86	77.1	89.34		85.3			0.19		11.13
78	Monzonita Máfica	MZM	121.3	172.42	223.54	69.54	78.73	87.92		78.14			0.32		13.157
79	Monzonita Cuarcifera	MZQ	188.78	215.52	242.26	68	74.62	81.24	76.41	85.49	94.56	0.13	0.21	0.29	12.52
86	Monzonita Biotitica Fina	MBF	177.62	208.89	240.16	59.61	70.94	82.27							11.754

Fuente: Las Bambas – MMG limited (Área de geomecanica)



Anexo H: Láminas

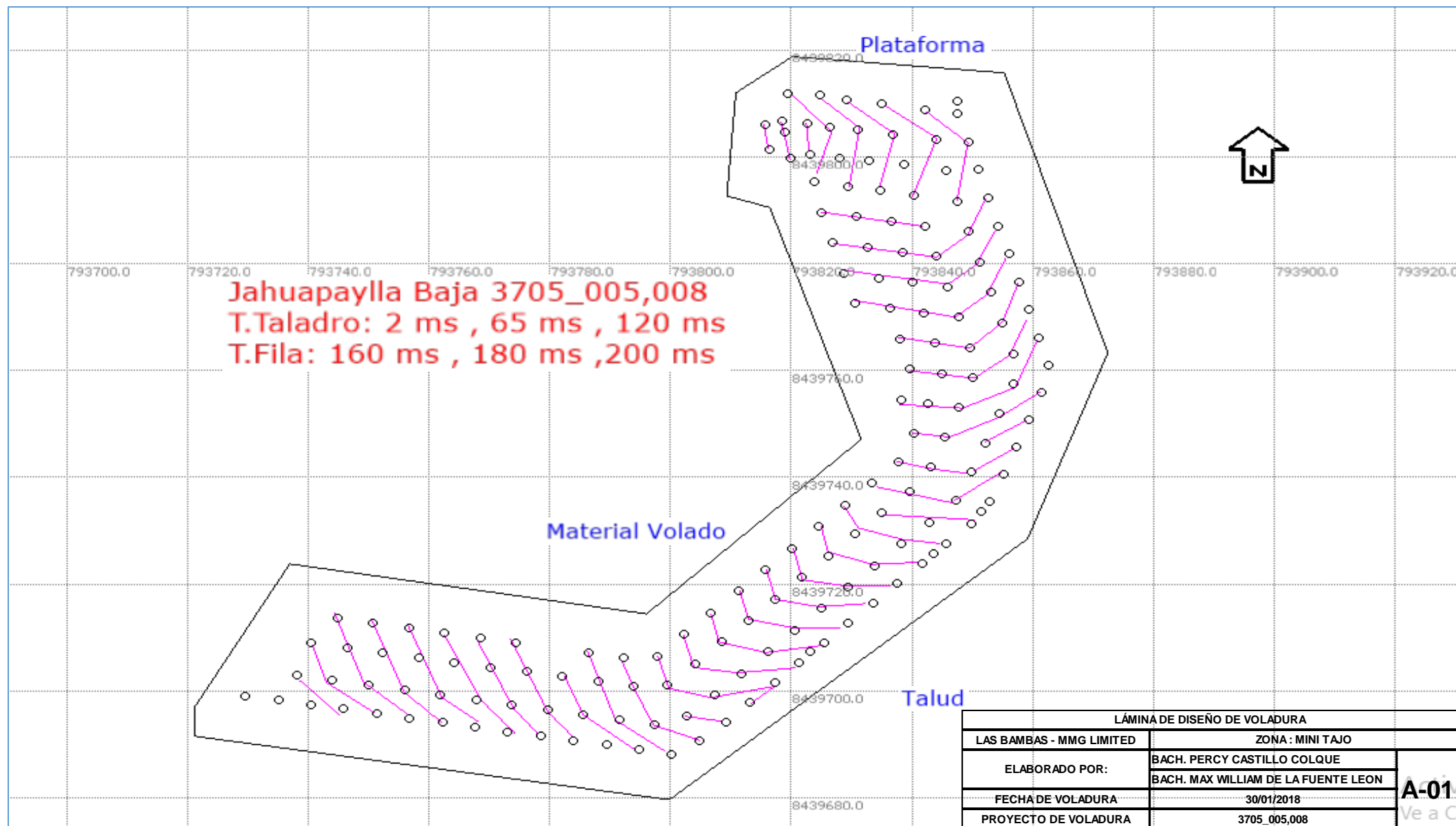
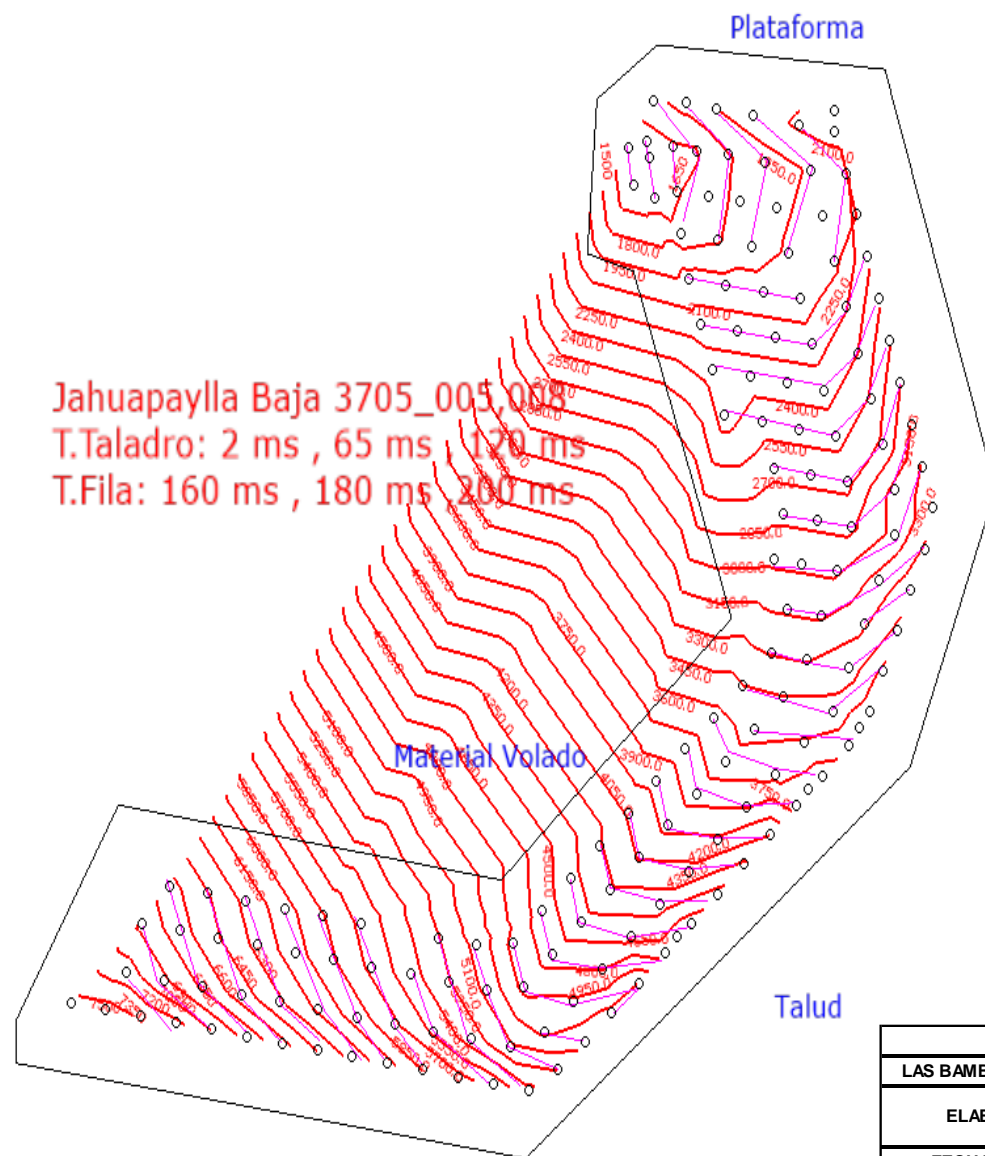


LÁMINA DE DISEÑO DE VOLADURA	
LAS BAMBAS - MMG LIMITED	ZONA : MINI TAJO
ELABORADO POR:	BACH. PERCY CASTILLO COLQUE BACH. MAX WILLIAM DE LA FUENTE LEON
FECHA DE VOLADURA	30/01/2018
PROYECTO DE VOLADURA	3705_005,008

A-01
Ve a C





Jahuapaylla Baja 3705_005_008
 T.Taladro: 2 ms , 65 ms , 120 ms
 T.Fila: 160 ms , 180 ms , 200 ms



LÁMINA DE LINEAS DE ISOTIEMPO	
LAS BAMBAS - MMG LIMITED	ZONA : MINI TAJO
ELABORADO POR:	BACH. PERCY CASTILLO COLQUE BACH. MAX WILLIAM DE LA FUENTE LEON
FECHA DE VOLADURA	30/01/2018
PROYECTO DE VOLADURA	3705_005,008

A-02

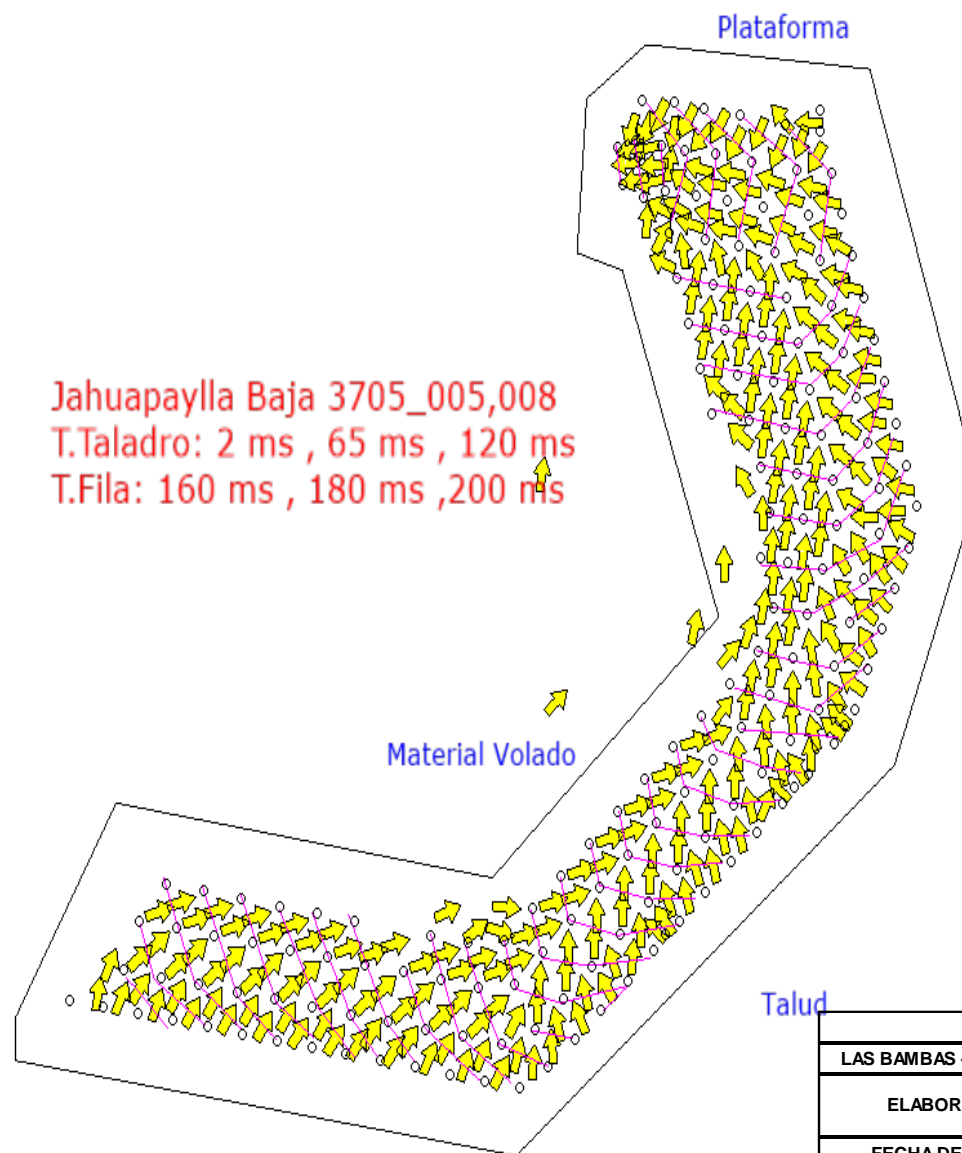
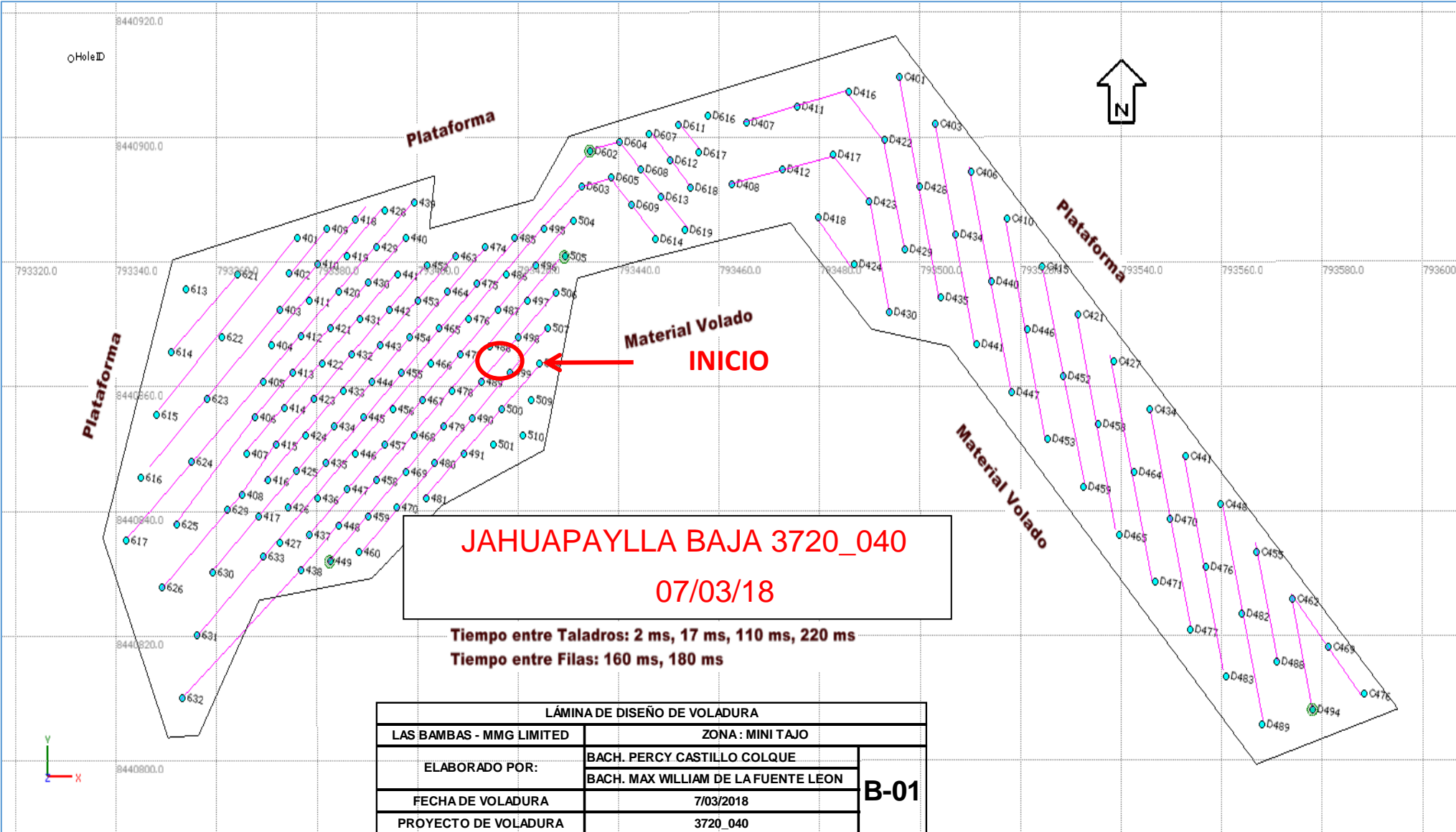
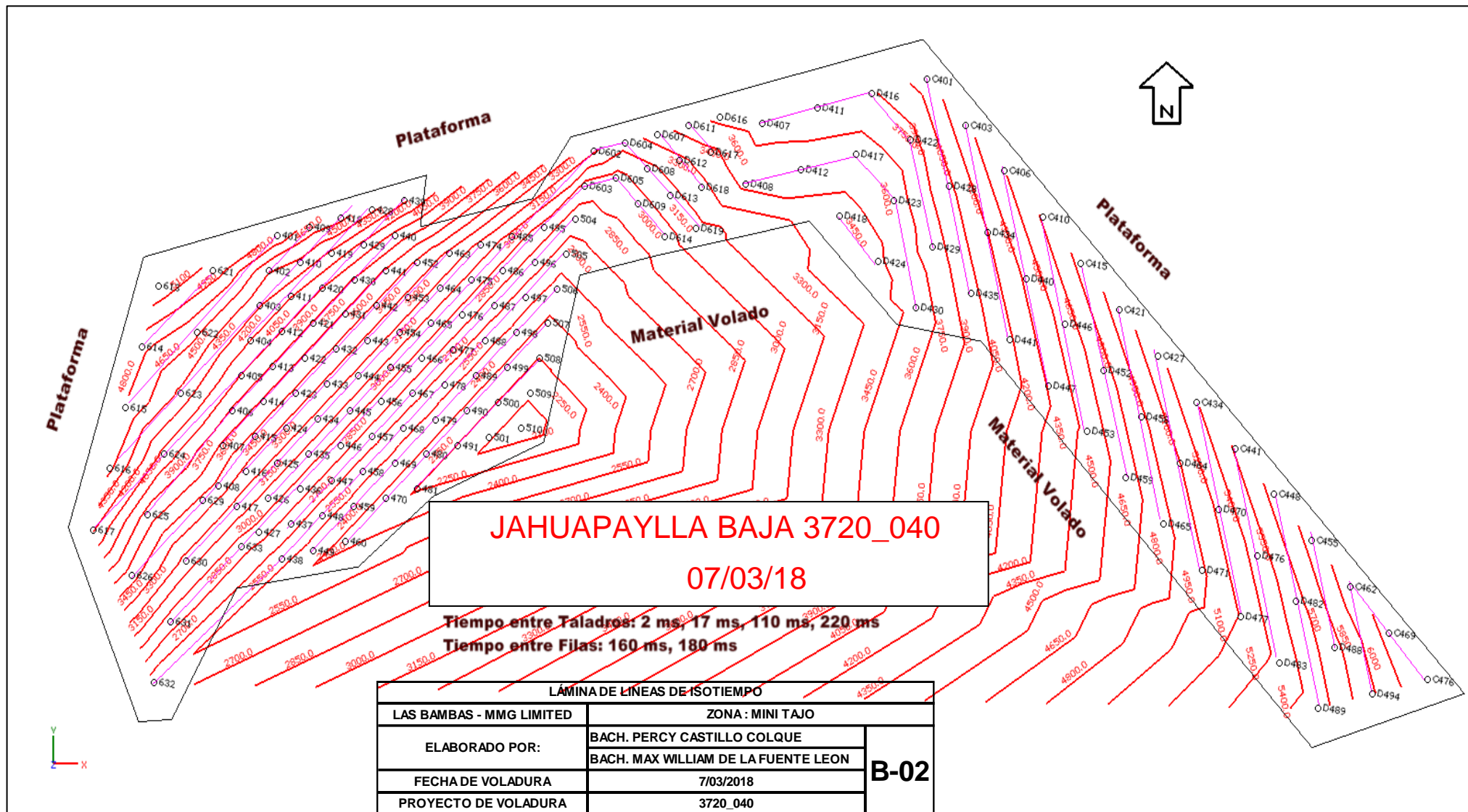


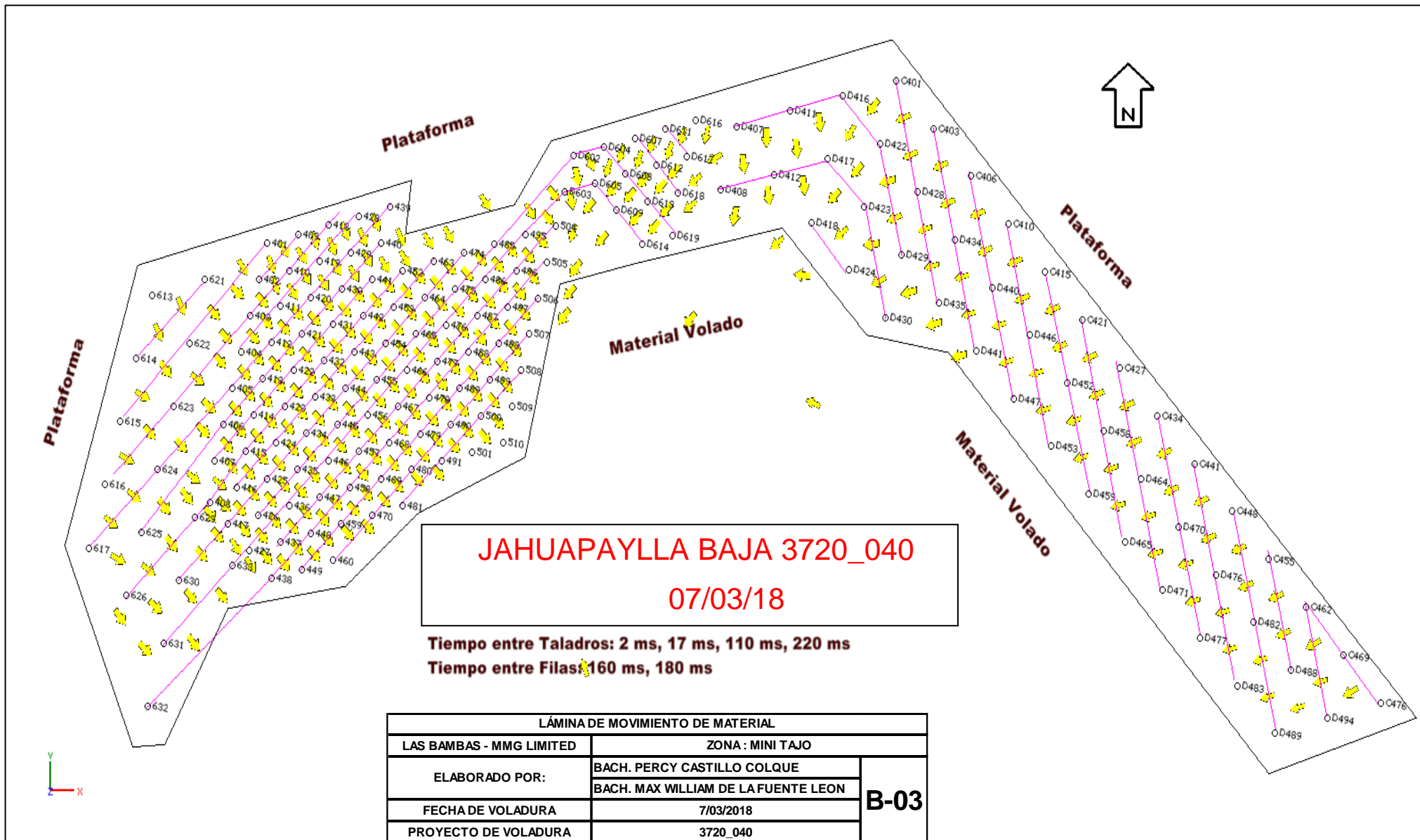
LÁMINA DE MOVIMIENTO DE MATERIAL	
LAS BAMBAS - MMG LIMITED	ZONA : MINI TAJO
ELABORADO POR:	BACH. PERCY CASTILLO COLQUE
	BACH. MAX WILLIAM DE LA FUENTE LEON
FECHA DE VOLADURA	30/01/2018
PROYECTO DE VOLADURA	3705_005,008

A-03









JAHUAPAYLLA BAJA 3720_040
07/03/18

Tiempo entre Taladros: 2 ms, 17 ms, 110 ms, 220 ms
Tiempo entre Filas: 160 ms, 180 ms

LÁMINA DE MOVIMIENTO DE MATERIAL		
LAS BAMBAS - MMG LIMITED	ZONA: MINI TAJO	
ELABORADO POR:	BACH. PERCY CASTILLO COLQUE	B-03
	BACH. MAX WILLIAM DE LA FUENTE LEON	
FECHA DE VOLADURA	7/03/2018	
PROYECTO DE VOLADURA	3720_040	

