

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN CON EL
USO DE DETONADORES ELECTRÓNICOS
EN LA MINA TOQUEPALA

TESIS

Presentada por:

Bach. Yony David Mamani Valdez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO DE MINAS

TACNA - PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería de Minas

OPTIMIZACIÓN DE LA FRAGMENTACIÓN CON EL USO DE
DETONADORES ELECTRÓNICOS EN LA MINA
TOQUEPALA

Tesis sustentada y aprobada el 31 de mayo del 2016, estando integrado el Jurado

Calificador por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Julio Miguel Fernández Prado


SECRETARIO


.....
Dr. Dante Urises Morales Cabrera

VOCAL


.....
Dr. Julio Vargas Paniagua

ASESOR


.....
Dr. Carlos Huisa Ccori

DEDICATORIA

A mi madre, mi padre, mis hermanos y mis padrinos, quienes con su constante apoyo hicieron posible mi realización profesional; pero en especial a mis padres quienes son la inspiración de mi vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la empresa Southern Perú, por haber permitido la realización del presente estudio, al Ing. Manfredo Herrera por ser parte de mi crecimiento profesional así como a la empresa EXSA S.A. y a todos los integrantes del servicio integral de voladura EXSA - Toquepala quienes contribuyeron en mi crecimiento profesional.

CONTENIDO

| Tema | Pág. |
|---|-------------|
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| ÍNDICE DE TABLAS | XI |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XII |
| ÍNDICE DE ANEXOS | XVI |
| RESUMEN | XVII |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I | |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | |
| 1.1. Descripción del problema | 3 |
| 1.1.1. Antecedentes del problema | 3 |
| 1.1.2. Problemática de la investigación | 4 |
| 1.2. Formulación del problema | 6 |
| 1.3. Justificación e importancia | 6 |
| 1.4. Objetivos | 8 |
| 1.4.1. Objetivo General | 8 |

| | |
|--|----|
| 1.4.2. Objetivos Específicos | 9 |
| 1.5. Hipótesis | 9 |
| CAPÍTULO II | |
| MARCO TEÓRICO | |
| 2.1. Ubicación y acceso | 11 |
| 2.2. Geología | 12 |
| 2.2.1. Geología general | 12 |
| 2.2.2. Geología regional | 15 |
| 2.3. Causas y consecuencias de la fragmentación gruesa | 18 |
| 2.3.1. Restricciones en el proceso de voladura | 18 |
| 2.3.2. Consecuencias de una fragmentación gruesa | 24 |
| 2.3.3. Sectores de la voladura donde se produce fragmentación gruesa | 29 |
| 2.3.4. Geometría de los proyectos de voladura | 34 |
| 2.3.5. Limitaciones de los detonadores pirotécnicos | 43 |
| 2.3.6. Conceptos básicos para la determinación del diseño de tiempos | 53 |
| 2.3.7. Cómo predecir los resultados de fragmentación | 63 |
| 2.3.8. Cómo evaluar los resultados de las voladuras | 67 |

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

| | |
|--|----|
| 3.1. Metodología de la investigación | 79 |
| 3.2. Definición de Variables | 80 |
| 3.2.1. Variables dependientes | 80 |
| 3.2.2. Variables independientes | 80 |
| 3.2.3. Indicadores | 81 |
| 3.3. Diseño de voladura con detonadores pirotécnicos | 81 |
| 3.3.1. Diseño de perforación | 82 |
| 3.3.2. Diseño de columnas explosivas | 83 |
| 3.3.3. Secuencia de detonación | 85 |
| 3.3.4. Configuración de tiempos de retardo | 86 |
| 3.4. Diseño de voladuras con detonares electrónicos | 87 |
| 3.4.1. Diseño de perforación | 87 |
| 3.4.2. Patrones de voladura | 88 |
| 3.4.3. Diseño de columnas explosivas | 89 |
| 3.4.4. Secuencia de voladura | 90 |
| 3.4.5. Diseño de tiempos | 93 |
| 3.4.6. Traslape de tiempos | 95 |

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

| | |
|--|-----|
| 4.1. Resultados con detonadores pirotécnicos | 96 |
| 4.1.1. Estadística de fragmentación | 96 |
| 4.1.2. Porcentaje de fragmentación gruesa | 97 |
| 4.1.3. Ciclo de minado | 98 |
| 4.1.4. Velocidad de minado | 98 |
| 4.1.5. Factor de carga explosiva | 99 |
| 4.1.6. Nivel de vibraciones de la voladura | 100 |
| 4.2. Resultados con detonadores electrónicos | 100 |
| 4.2.1. Estadística de fragmentación | 101 |
| 4.2.2. Porcentaje de fragmentación gruesa | 102 |
| 4.2.3. Ciclo de minado | 102 |
| 4.2.4. Velocidad de minado | 103 |
| 4.2.5. Factor de carga explosiva | 104 |
| 4.2.6. Niveles de vibraciones de la voladura | 104 |
| 4.2.7. Evaluación visual de las voladuras | 105 |
| 4.3. Comparación de resultados entre detonadores pirotécnicos y electrónicos | 106 |
| 4.3.1. Niveles de minado 2800 y 2875 | 106 |
| 4.3.2. Diseño de columnas explosivas | 107 |
| 4.3.3. Estadísticas de fragmentación | 108 |

| | |
|---|-----|
| 4.3.4. Porcentaje de fragmentación gruesa | 109 |
| 4.3.5. Ciclo de minado | 109 |
| 4.3.6. Velocidad de minado | 110 |
| 4.3.7. Factor de carga explosiva | 110 |
| 4.3.8. Nivel de vibraciones de la voladura | 111 |
| 4.3.9. Interpretación y análisis de resultados | 111 |
| 4.4. Evaluación económica de las voladuras con detonadores electrónicos | 113 |
| 4.4.1. Costos Unitarios de los insumos de voladura | 113 |
| 4.4.2. Resumen de los resultados de voladura | 114 |
| 4.4.3. Consumo de los insumos de voladura | 115 |
| 4.4.4. Análisis de costos de las voladuras | 117 |
| 4.4.5. Costo ahorrado en voladura con detonadores electrónicos | 118 |
| 4.4.6. Proyección de ahorro en voladura durante el año 2013 | 119 |
| 4.4.7. Rendimientos y costos del equipo de carguío | 120 |
| 4.4.8. Costo ahorrado en carguío con detonadores electrónicos | 121 |
| 4.4.9. Proyección de ahorro en carguío durante el año 2013 | 122 |
| 4.4.10. Proyección total de ahorro | 123 |

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

| | |
|--|-----|
| 5.1. Análisis de resultados mina Toquepala vs. Mina Cerro de Pasco | 124 |
| 5.1.1. Comparación de resultados de fragmentación | 124 |
| 5.1.2. Comparación de resultado de costos | 125 |
| 5.1.3. Resultados de fragmentación Toquepala - Cerro Verde | 134 |
| 5.1.4. Resultados en seguridad | 136 |
| 5.1.5. Resultados en versatilidad | 137 |
| 5.1.6. Resultados en monitoreo de vibraciones | 139 |
| CONCLUSIONES | 140 |
| RECOMENDACIONES | 141 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 143 |

ÍNDICE DE TABLAS

| Tabla | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 Niveles de daños producidos por voladuras | 74 |
| Tabla 2 Propiedades del macizo rocoso (Yeso Anhidrita) | 84 |
| Tabla 3 Parámetros de voladura para Yeso Anhidrita | 93 |
| Tabla 4 Precios unitarios de los insumos de voladura | 114 |
| Tabla 5 Resumen de resultados con detonadores pirotécnicos | 115 |
| Tabla 6 Resumen de resultados con detonadores electrónicos | 115 |
| Tabla 7 Consumo de insumos con detonadores pirotécnicos | 116 |
| Tabla 8 Consumo de insumos con detonadores electrónicos | 116 |
| Tabla 9 Costos por voladura con detonadores pirotécnicos | 117 |
| Tabla 10 Costos por voladura con detonadores electrónicos | 118 |
| Tabla 11 Resumen de costos y tonelajes | 119 |
| Tabla 12 Resumen de costos y tonelaje anual | 120 |
| Tabla 13 Rendimientos y costos de palas P&H4100A | 121 |
| Tabla 14 Resumen de costos y tonelajes | 121 |
| Tabla 15 Resumen de costos y tonelajes | 122 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| Figura | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Acomodo de material para perforación secundaria | 5 |
| Figura 2. Operación de carguío y transporte | 6 |
| Figura 3. Ubicación de la mina Toquepala | 12 |
| Figura 4. Sector con presencia de agua | 20 |
| Figura 5. Taladro perforado en zona de agua | 21 |
| Figura 6. Material grueso durante el carguío | 25 |
| Figura 7. Macizo rocoso pre - fragmentado | 30 |
| Figura 8. Collar del taladro con material fragmentado | 31 |
| Figura 9. Secciones de perforación a talud final | 32 |
| Figura 10. Minado de pala a talud final | 33 |
| Figura 11. Nivel 2860 sector yeso anhidrita | 34 |
| Figura 12. Diseño de voladura proyecto 2875 053 | 36 |
| Figura 13. Análisis de voladura proyecto 2875 053 | 36 |
| Figura 14. Diseño de voladura proyecto 2800 008 | 38 |
| Figura 15. Análisis de voladura proyecto 2800 008 | 39 |
| Figura 16. Diseño de voladura proyecto 2845 030 | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 17. Análisis de voladura proyecto 2845 030 | 42 |
| Figura 18. Diseño de cargas explosivas proyecto 2845 030 | 42 |
| Figura 19. Campana de Gauss | 44 |
| Figura 20. Campana de Gauss | 45 |
| Figura 21. Porcentaje de dispersión del retardo de 600 MS | 46 |
| Figura 22. Diseño de voladura en “v” | 49 |
| Figura 23. Montaje de carga explosiva | 50 |
| Figura 24. Detonaciones por intervalo de tiempo | 50 |
| Figura 25. Interacción de ondas. Teoría de Lagrange | 56 |
| Figura 26. Esquema de voladura, teoría de Lagrange | 58 |
| Figura 27. Mecánica de colisión de ondas, teoría de Lagrange | 61 |
| Figura 28. Roca volada para análisis de Wip frag | 64 |
| Figura 29. Curva de fragmentación | 64 |
| Figura 30. Porcentaje de tamaños medios de roca | 65 |
| Figura 31. Geometrías de apilamiento de material | 73 |
| Figura 32. Proyectos del nivel 2800 con detonadores pirotécnicos | 82 |
| Figura 33. Patrones de diseño de perforación | 83 |
| Figura 34. Diseño de cargas explosivas para taladros con agua | 84 |
| Figura 35. Diseño de cargas explosivas para taladros secos | 85 |
| Figura 36. Configuración de retardos y secuencia de disparo | 86 |
| Figura 37. Proyectos de voladura nivel 2785 | 87 |

| | |
|---|-----|
| Figura 38. Diseño de patrones de voladura | 88 |
| Figura 39. Diseño de carga explosiva para taladros secos | 90 |
| Figura 40. Proyecto de voladura 2785 011 | 91 |
| Figura 41. Secuencia de disparo proyecto 2785 011 | 92 |
| Figura 42. Líneas de isotiempo del proyecto 2785 011 | 92 |
| Figura 43. Configuración de tiempos proyecto de voladura 2785 011 | 94 |
| Figura 44. Apilamiento de material | 94 |
| Figura 45. Imagen post voladura proyecto 2785 011 | 95 |
| Figura 46. Resultados de fragmentación - Nivel 2800 | 97 |
| Figura 47. Resultados de bolonería - Nivel 2800 | 97 |
| Figura 48. Ciclo de minado - Nivel 2800. | 98 |
| Figura 49. Velocidad de minado - Nivel 2800 | 99 |
| Figura 50. Factor de carga - Nivel 2800 | 99 |
| Figura 51. Niveles de vibraciones - Nivel 2800 | 100 |
| Figura 52. Resultados de fragmentación - Nivel 2785 | 101 |
| Figura 53. Resultados de bolonería - Nivel 2785 | 102 |
| Figura 54. Ciclo de minado - Nivel 2785 | 103 |
| Figura 55. Velocidad de minado - Nivel 2785 | 103 |
| Figura 56. Factor de carga - Nivel 2785 | 104 |
| Figura 57. Niveles de vibraciones Nv 2785 | 104 |
| Figura 58. Proyecto de voladura 2785 013 | 106 |

| | |
|---|-----|
| Figura 59. Diseño de carga explosiva | 108 |
| Figura 60. Fragmentación (Pirotécnico vs Electrónico) | 108 |
| Figura 61. Bolonería (pirotécnico vs electrónico) | 109 |
| Figura 62. Ciclo de minado (pirotécnico vs electrónico) | 109 |
| Figura 63. Velocidad de minado (pirotécnico vs electrónico) | 110 |
| Figura 64. Factor de carga (pirotécnico vs electrónico) | 110 |
| Figura 65. Vibraciones (pirotécnico vs electrónico) | 111 |
| Figura 66. Resultados de fragmentación | 125 |
| Figura 67. Resultado de costo total | 134 |
| Figura 68. Resultado de fragmentación | 135 |
| Figura 69. Comparación de resultado de fragmentación | 135 |
| Figura 70. Porcentaje de reducción de fragmentación | 136 |

ÍNDICE DE ANEXOS

| Anexo | Pág. |
|---|-------------|
| ANEXO A Simulación de voladura mediante JK Lasting | 147 |
| ANEXO B Sistema de iniciación electrónica | 159 |
| ANEXO C Conexión e iniciación de detonadores electrónicos | 168 |
| ANEXO D Monitores de vibraciones | 172 |
| ANEXO E Procedimiento de voladura - mina Toquepala | 176 |

RESUMEN

El presente trabajo titulado Optimización de la fragmentación con el uso de detonadores electrónicos en la mina Toquepala tuvo como objetivo principal estudiar y ofrecer oportunidades de mejoras en el tema de fragmentación del macizo rocoso, el cual estuvo íntimamente ligado a las operaciones unitarias de perforación y voladura, empleando detonadores electrónicos, los que permiten brindar variados diseños de voladura en cuanto a configuración de tiempos de salidas de los taladros, los cuales interactúan directamente con las propiedades y velocidad de onda del macizo rocoso, este efecto brindará una calidad de la granulometría que tendrá directa implicancia en las operaciones de carguío, acarreo y chancado. Finalmente, los resultados obtenidos son reflejados en valores como la fragmentación que mejoró en un 13,6 %, viéndose reflejado en la bolonería generada que disminuyó en un 43,0 %; el ciclo de minado de la pala P&H4100A mejoró en un 12,0 %, lo cual se plasmó en la velocidad de minado, pues ésta mejoró en un 10,0 %. Palabras claves: optimización, fragmentación, detonadores electrónicos.

INTRODUCCIÓN

La mina Toquepala, concesión de Southern Perú, es un yacimiento de pórfidos de cobre. Durante el año 2012, se vienen desarrollando fases de minado de expansión y profundidad, en cuyas operaciones deben reflejarse la seguridad, calidad y productividad, estos tres parámetros de evaluación que cuantifican los ciclos operacionales son de obligatoriedad, dado que la mina tiene una antigüedad de más de 40 años, y cuyo potencial de reservas probadas manifiestan otros 40 años más de operación. En la actualidad, Southern Perú es líder nacional en la minería de cobre en el Perú.

Dentro de las operaciones de minado, la voladura de rocas representa la más relevante dentro del proceso extractivo de minerales, ya que representa la primera y más económica operación de conminación del mineral y desmonte, su objetivo principal es lograr un adecuado tamaño de roca, con las consideraciones granulométricas planificadas que requiere la mina, con un mínimo de daño en su entorno, ya sea por el tema de rocas voladoras (fly rock), tiros cortados, y daños al macizo rocoso. Resultados adversos, obligan a efectuar minados selectivos, incrementando los costos de operación y costos globales de minado.

El avance tecnológico en los sistemas de iniciación en voladura permite trasladarse desde el sistema convencional (mecha de seguridad y fulminantes), hasta el moderno y preciso sistema de iniciación electrónica, mediante el cual se puede controlar la energía liberada en un disparo, optimizando la fragmentación y disminuyendo el daño a las paredes. El sistema de iniciación con detonadores electrónicos fija con claridad los conceptos de precisión, flexibilidad, y principalmente de seguridad.

La presente tesis está compuesta de cinco capítulos, en el capítulo I se especifica el planteamiento del problema; en el capítulo II se detalla el análisis del sustento teórico en el que se apoya este trabajo de investigación. En el capítulo III, se plantea la metodología que se utilizó en el trabajo; en el capítulo IV se realiza el análisis de todos los resultados obtenidos; y finalmente, en el capítulo V se discutirán los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

La mina Toquepala, unidad de producción de Southern Perú, es un yacimiento de pórfidos de cobre, con más de 40 años de antigüedad de explotación, donde es importante la productividad del minado, que van desde la ingeniería hasta las operaciones unitarias tales como perforación, voladura, carguío y acarreo. Este conjunto de operaciones debe desarrollarse en forma sincronizada y ordenada, con la seguridad que amerita una operación de calidad.

La voladura de rocas representa una de las operaciones unitarias más relevantes dentro del proceso de extracción de minerales, y se encuentra íntimamente ligada a la operación de perforación, su objetivo principal es lograr un adecuado tamaño de la roca fragmentada y forma de la pila del material; por otro lado, las voladuras deben de generar un mínimo daño en su

entorno. El alto grado de la interrelación entre los resultados de la voladura y la productividad de las operaciones unitarias necesarias para extraer el mineral, hacen evidente tener un control de sus efectos y los consiguientes costos, los que se verán agudizados dependiendo de los ritmos de producción y leyes que requiere la mina.

1.1.2. Problemática de la investigación

Cuando no se tiene un adecuado diseño de perforación y voladura, los resultados se reflejan inmediatamente en las operaciones de carguío, transporte y chancado, estos se ven afectados debido a que bajan su productividad, incrementando los costos globales de minado. A continuación, una descripción con sus respectivas vistas, en las cuales se observará estos problemas:

Al obtener fragmentos con dimensiones mayores, fuera del estándar de requerimiento por concentradora mina, se tiene que efectuar voladura secundaria, lo cual refleja un incremento de costo en las operaciones de perforación y voladura.

La presencia de material grueso o bolonería sobredimensionada, obliga a efectuar un minado selectivo de material, es decir, la pala tiene que escoger y clasificar constantemente los materiales producto de la voladura, este efecto, contribuye a que decrezca la velocidad de excavación y carguío, incrementando los costos de carguío y transporte.



Figura 1. Acomodo de material para perforación secundaria
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

- El carguío de la pala al volquete no es el adecuado, la distribución de la carga sobre la tolva del volquete no guarda una geometría de equilibrio, lo que puede ocasionar a un accidente con el volquete y la pala.



Figura 2. Operación de carguío y transporte
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

1.2. Formulación del problema

El proceso de fragmentar la roca con explosivo está influenciado por un gran número de variables, algunas de las cuales son controlables y otras intrínsecas. La compleja interrelación existente entre estas variables hace más compleja la situación, haciendo los resultados de la voladura virtualmente imposibles mediante el uso de algoritmos analíticos simples.

1.3. Justificación e importancia

En el presente trabajo de investigación se pretende en alguna medida describir la técnica que implica el proceso de fragmentación y las variables identificadas para un mejoramiento continuo de los resultados obtenidos. Mediante estas técnicas ha sido posible entender, evaluar y finalmente optimizar el proceso, asimismo, a

significado adicionalmente incorporar tecnología en su evaluación, y desarrollar herramientas técnicas y metodológicas a objeto que permitan predecir el complejo comportamiento de las variables que inciden en el desarrollo de una voladura, y luego ofrecer las soluciones técnicas y económicas que el proceso y la operación en general requieren.

En términos simples, el proceso de voladura involucra la perforación de una serie de hoyos en una distribución dada dentro del macizo rocoso, la carga de estos hoyos con explosivo, y la subsecuente detonación en una secuencia específica. Visto en estos términos el proceso de voladura parece simple en concepto, el ingeniero a cargo de la voladura, quien tiene en definitiva la difícil misión de diseñar la voladura, debe considerar para ello un gran número de variables involucradas en cada uno de los diseños. Estas variables pueden ser agrupadas dentro de tres grandes categorías:

- **Tipo de roca**, en lo que se incluye la condición in situ, su grado de alteración, así como la extensión y orientación de las fracturas.
- **Propiedades de los explosivos**, en las cuales deben de considerarse no solo la energía total liberada por el explosivo, sino también su reacción cinética.

- **Distribución del explosivo**, que incluye variables tales como burden, espaciamiento y diámetro de los hoyos, la ubicación del explosivo en los hoyos, número y posición de los iniciadores, retardos y secuencia de iniciación.

La interacción entre los parámetros antes indicados es extremadamente compleja, e imposible de cuantificar por un algoritmo analítico simple. La óptima combinación de estas variables será función tanto del tipo de roca como del explosivo utilizado. Esto determina un número infinito de posibilidades, con un óptimo que cambia en algunos casos entre voladura y voladura.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Estudiar el análisis de fragmentación obtenido por voladura y ofrecer oportunidades de mejoras en el tema de fragmentación del macizo rocoso, el cual está íntimamente ligado a las operaciones unitarias de perforación y voladura, empleando detonadores electrónicos.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Reducir el porcentaje de fragmentación gruesa con el fin de agilizar las operaciones de carguío, acarreo y chancado de mineral en la mina Toquepala, de modo que la operación se muestre más productiva.
- Reducir costos globales de minado, estos implican los costos unitarios de perforación, voladura, carguío, transporte y molienda.
- Implementar un sistema de voladura que sirva como referencia, para obtener parámetros de diseño tanto en perforación como en la voladura en el sector de yeso anhidrita.
- Tener un control estricto en las vibraciones obtenidas producto de la voladura, con la aplicación de los detonadores electrónicos.

1.5. Hipótesis

- Para el éxito en los resultados de las voladuras, se debe conocer al detalle las características geomecánicas del macizo rocoso, los conceptos y teorías de la voladura de rocas, las consideraciones

técnicas de diseño, y procedimientos de seguridad de la operación de la voladura.

- El estudio y la implementación de voladuras con detonadores electrónicos en el sector de yeso anhidrita de la mina Toquepala ha implicado tener mejoras notables en el proceso de fragmentación, gracias a las secuencias versátiles que se puede aplicar en el diseño, el cual está controlado por la definición de los tiempos entre taladros y filas, los mismos que son el resultado del cálculo de la interacción de la velocidad de onda del macizo rocoso y los conceptos de burden efectivo.
- Para la obtención de buenos resultados en la operación de voladura, es muy importante que el diseño de perforación sea el adecuado, en términos de guardar los espaciamientos diseñados, profundidades requeridas, geometría adecuada de diseño, y finalmente, el número de taladros, a mayor número de taladros mejores resultados en cuanto fragmentación, debido a que se cuenta con una mejor distribución de los tiempos de retardo que permiten el aprovechamiento de las ondas de choque y el efecto de colisión de la roca.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Ubicación y acceso

La mina Toquepala se encuentra ubicado en el departamento de Tacna. Tiene las siguientes coordenadas geográficas y es accesible por las siguientes vías:

17°13' Latitud Sur.

70°36' Longitud Oeste.

Lima : 1035 km

Arequipa : 435 km

Tacna : 192 km

Moquegua : 130 km

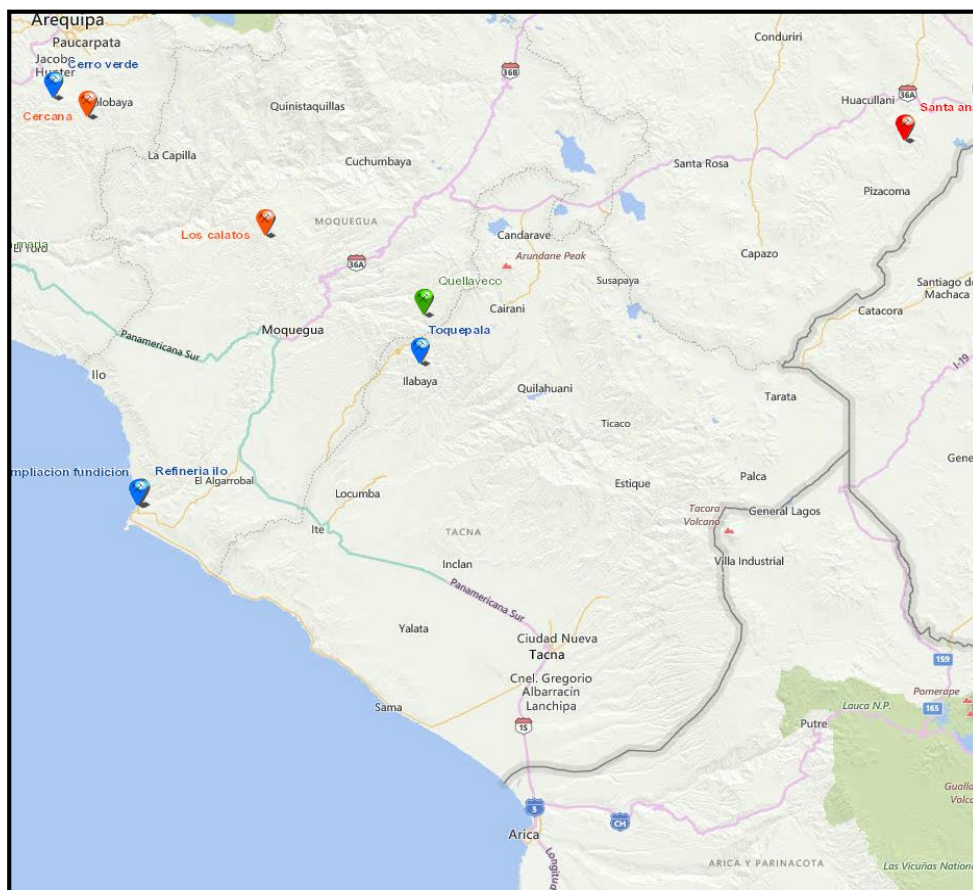


Figura 3. Ubicación de la mina Toquepala
Fuente: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

2.2. Geología

2.2.1. Geología general

El depósito está situado en un terreno que fue sometido a intensa actividad ígnea, incluyendo una gran variedad de fenómenos eruptivos, los que se registraron hace 70 millones de años (cretáceo-terciario); esta actividad produjo enormes

cantidades de material volcánico, el cual se acumuló en una serie de mantos de lava volcánica, hasta completar un espesor de 1 500 m constituyendo el basamento regional, el mismo que está compuesto por derrames alternados de riolitas, andesitas y aglomerados, inclinados ligeramente hacia el oeste y que constituyen el llamado “Grupo Toquepala”.

Posteriormente, la actividad ígnea fue principalmente intrusiva y produjo grandes masas de roca en fusión que intruyeron, rompiendo y fundiendo las lavas enfriadas del “Grupo Toquepala”. Estas rocas intrusivas constituyen apófisis del batolito andino que fueron emplazadas en diferentes etapas. Debido a que provinieron de un magma de composición química variable, resultaron diferentes tipos de rocas por diferenciación (Dioritas, Dacita Porfirítica, etc.).

La actividad tectónica regional está relacionada a la formación de la Cordillera de los Andes, estructuralmente representada en el área de Toquepala por la falla Micalaco y por el alineamiento Toquepala. La intersección de estas dos fallas está ubicada en el área de la mina.

Posteriormente, soluciones hidrotermales de alta temperatura, resultado de un estado de diferenciación magmática, fluyeron a través de las rocas existentes, destruyendo y alterando su composición química, haciéndolas más permeables. Estas soluciones favorecidas por un intemperismo pre-existente produjeron la alteración y mineralización primaria.

Los diferentes eventos intrusivos de Dacita Porfírica dieron origen a un sistema de estructura de brechas (Brecha Pipe mineralizada), y brechas de colapso, parcialmente mineralizada. Un evento ígneo tardío tuvo lugar inmediatamente al norte del yacimiento, caracterizado por actividad eruptiva explosiva e hidrotermal, constituido por una diatrema que fue rellenada por los fragmentos de rocas preexistentes y un magma de composición dacítica, por lo que se le denomina pórfido de dacita aglomerado. Cerrando el ciclo de actividad intrusiva ocurrieron diques de latita porfírica y de dacita que se emplazaron a lo largo del alineamiento Toquepala, y atravesaron todas las rocas existentes.

Esta actividad intrusiva - volcánica fue seguida por sucesivos estados de intensa erosión, asociados a variaciones del nivel de agua que contribuyeron en la lixiviación de la parte superior de la zona mineralizada (Leach Capping), dando como resultado una concentración de cobre en profundidad (zona de enriquecimiento secundario). Todos estos eventos son responsables de la superficie expuesta actual.

2.2.2. Geología regional

La mina Toquepala está situada en la región que pertenece a la faja sísmica de los Andes Sur Occidentales del Perú; que se caracteriza por haber soportado una intensa actividad eruptiva, cuyos remanentes son una serie de conos volcánicos, luego intrusivos posteriores del batolito andino, de composición ácida a intermedia que han afectado a las rocas encajonantes.

Posteriormente, una erosión provocó la formación de una superficie irregular la que fue rellenada por flujos volcánicos recientes. Las edades varían desde el cretáceo superior al reciente. Resumiendo, se puede indicar que las unidades litológicas presentes, incluyen rocas de orígenes volcánicos e intrusivos.

a. Rocas volcánicas

➤ **Grupo Toquepala:** Consiste en una gran secuencia de rocas volcánicas, donde predominan los derrames intercalados de riolitas y andesitas. Forman el basamento regional y tienen una potencia de varios millones de metros, se calcula que pertenece al cretáceo superior y terciario inferior. La diferencia entre los volcánicos es la interrelación de tufos y aglomerados que se presentan en alguna formación, así como diferentes colores y texturas. Pertenecen a este grupo las siguientes formaciones:

- ✓ Formación Toquepala
- ✓ Formación Paraleque
- ✓ Volcánico Quellaveco
- ✓ Formación Inogoya
- ✓ Volcánico Cuajone
- ✓ Formación Huaylillas: Compuesto por tufos volcánicos.

➤ **Rocas Intrusivas:** Compuesta por apófisis stocks del batolito andino que compone la cordillera Sur Occidental de los Andes. Dentro de ellos destacan la Diorita, Latita, Granodiorita, Dacita, Monzonita Cuarcifera, Andesita

intrusiva, aglomerado de Dacita, formaciones de brechas angulares, brechas de gujarros, y finalmente los diques de formación tubular de Latita Monzonita.

Es destacable que la Diorita y la Granodiorita son los cuerpos más extensos, estas forman parte del cuerpo mineralizado de la mina Toquepala, generalmente, es una roca de grano medio a fino, de colores que varían de gris a rosado verdoso, otra roca importante dentro de la región es el granito, que generalmente es de grano medio a grueso y de color rojizo a rosáceo.

b. Litología:

- Relacionado a una intensa actividad ígnea desde el cretáceo superior al terciario inferior.
- El basamento consiste en flujos alternados de riolitas y andesitas de posición sub horizontal, con una potencia acumulada de más de 1 500 m, los cuales constituyen el Grupo Toquepala.
- Intrusiones atravesaron el basamento, con apófisis y cuerpos de Granodiorita y Diorita pertenecientes al batolito de la costa.

c. Alteraciones:

Muestra las tres alteraciones más comunes:

- Alteración Propilítica (Epidota, Calcita, Pirita, Clorita).
- Alteración Arílica (Cuarzo –Arcillas).
- Alteración Fílica (Cuarzo, Sericita y Pirita).
- Alteración Fílica Potásica (Cuarzo-Sericita, Biotita, Feldespato Alcalino).
- La zona de alteración abarca un área más grande que el cuerpo mineralizado.
- Todo el basamento y las rocas intrusivas han sido alteradas, excepto los diques de última generación.
- Alteración silíceo ocurre principalmente en el cuarzo porfirítico. Quellaveco en el pórfido de dacita porfirítica.

2.3. Causas y consecuencias de la fragmentación gruesa

2.3.1. Restricciones en el proceso de voladura

Se refiere al conjunto de restricciones operativas que se extienden desde la etapa de diseño hasta la ejecución de la voladura, asimismo, en este punto, se considera todas las

variables no controlables del macizo rocoso, las cuales generan diversos problemas en la operación, tales como:

a. Disparar proyectos de voladura improvisados

En muchas oportunidades, los proyectos de voladura tienen que ser disparados sin haber cumplido el diseño en cuanto a número de taladros y geometría de diseño, este tipo de voladuras se presentan básicamente por el siguiente caso.

b. Presencia de agua

El nivel del agua subterránea en el sector de yeso anhidrita se encuentra directamente influenciada por las discontinuidades presentes en el macizo rocoso y por las propiedades hidráulicas del mismo. Flujos de agua constantes son observados en el fondo de mina, los cuales fluyen por las estructuras que, siguiendo diferentes direcciones, también se aprecian flujos intermitentes en forma de goteos que son controlados por fallamientos que atraviesan la mina.

Las rocas que se encuentran dentro de la zona de sulfatos cálcicos (Yeso Anhidrita) funcionan como barreras, el agua discurre a través de ellas solo por las estructuras tipo falla. La

energía necesaria para el movimiento del agua procede esencialmente de las diferencias de nivel topográfico y de la presión hidráulica.

En todos los casos, la presencia de agua es un problema para la perforación y voladura de rocas, debido a que lavan los taladros cargados, degradando la mezcla explosiva al margen de emplear un explosivo resistente al agua, del mismo modo, limita la formación del collar del taladro, con consecuencias de no alcanzar la longitud diseñada. También es importante mencionar que cuando se descarga y transporta el material húmedo a través de las fajas, tiende a pegarse en ellas interfiriendo en la molienda.



Figura 4. Sector con presencia de agua
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

Ejecutar perforaciones en zonas saturadas de agua, también representan condiciones inseguras para la operación de carguío de taladros. La geometría que adopta el taladro perforado presenta un falso piso cubierto agua, el cual representa un peligro activo y latente para la operación. Bajo estas condiciones, los sectores con presencia de agua requieren ser disparados a la brevedad posible, con la finalidad de deprimir o neutralizar el agua presente en el sector, en la siguiente vista se observa la presencia de este riesgo.



Figura 5. Taladro perforado en zona de agua
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

c. Disparos para inicio de nivel

El fondo de la mina Toquepala, donde está presente el yeso, tiene una geometría cerrada, en la cual, por lo menos los tres primeros disparos tienen que ejecutarse de manera confinada, sin presencia de cara libre, estas condiciones determinan la obtención de material sobredimensionado en diferentes sectores de la voladura debido a los siguientes aspectos.

- Confinamiento de la voladura.
- Presencia de agua, los proyectos de voladura se encuentran saturados.
- Empleo de un explosivo resistente al agua, pero con velocidad de detonación no adecuada para el tipo de macizo rocoso.
- Las voladuras confinadas y con presencia de agua, muy aparte de no brindar adecuadas fragmentaciones, generan fly rock que es una condición subestándar que puede traer accidentes a los equipos, instalaciones y personal.

d. Disparos sin cara libre

Muy aparte de las voladuras que se ejecutan para inicio de nivel, también se realizan voladuras con presencia de un colchón o volumen considerable de material disparado en la dirección de inicio de la voladura, este problema repercute en:

- La cara libre es indispensable para la formación y retorno de las ondas de tensión que generan la fragmentación. Si la cara libre es inadecuada la voladura será deficiente, y si no hay cara libre las ondas de compresión viajarán libremente sin reflejarse, difundiéndose a la distancia sólo como ondas sísmicas.
- Pérdida de la energía explosiva, los burdenes diseñados son resistentes a la acción del explosivo, en ese entender, la línea de menor resistencia se traslada hacia el sector del taco, incrementando los niveles de fly rock.
- Cuando no se tiene cara libre, los apilamientos de material, y los cortes por back break en los límites de la voladura, no son los adecuados, existen proyecciones de material por encima de los límites planificados, incrementando la operación de limpieza.

- Como no existe desfogue para el desplazamiento de material en la dirección de inicio, la voladura efectúa pateos exagerados en las paredes o taludes, incrementando los niveles de vibraciones y sobre-rotura.
- En resumen, la carencia de cara libre en la operación de voladura tiene repercusión directa en los resultados de fragmentación, debido principalmente, al mal aprovechamiento de la energía explosiva.

2.3.2. Consecuencias de una fragmentación gruesa

La voladura de rocas es la primera etapa de conminución del material fragmentado, es de vital importancia aprovechar al máximo el mayor porcentaje de la energía química del explosivo para producir un adecuado trabajo mecánico en la roca. Uno de los aspectos para medir la performance de las voladuras que se realizan en la mina, es el aspecto de la fragmentación, el cual debe de estar asociado a los resultados de seguridad, vibración y estabilidad. La fragmentación constituye una de las variables principales para el desarrollo de una buena productividad en las labores de carguío, acarreo y chancado de mineral, este aspecto, muy aparte de reflejar una buena velocidad en las

operaciones de minado, también tiene implicancia en el costo global de minado. Las consecuencias más notorias son:

a. Retraso en el ciclo de carguío y acarreo

La presencia de material grueso o botonería sobredimensionada obliga a efectuar un minado selectivo de material, es decir, la pala tiene que escoger y clasificar constantemente los materiales producto de la voladura. El carguío de la pala al volquete no es el adecuado en materia de productividad, por lo que la distribución de la carga sobre la tolva del volquete no guarda una geometría de equilibrio y apilamiento, lo cual puede conllevar a la producción de un accidente del volquete y la pala, asimismo, los ciclos de minado no son los adecuados.



Figura 6. Material grueso durante el carguío
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

b. Atoro en las tolvas de mineral

Cuando se transporta material grueso hacia las tolvas para descarga de trenes existe alta probabilidad que estas sean tapadas en su abertura por un material sobredimensionado, y para su desatoro se requiere de trabajos adicionales que implican seguridad y costo, ya que se interrumpe de manera inmediata todo el ciclo de minado, obligando a efectuar descargas en un stock pile, lo que posteriormente generará un costo doble de carguío y transporte.

c. Problemas en la tolva de chancado primario

Al igual que en las tolvas de mineral, en la descarga de mineral para chancado primario, también se han registrado problemas a consecuencia de bolones, cuya liberación de los mismos ha generado problemas similares, es decir, interrumpiendo el ciclo de minado.

d. Incremento de voladura secundaria

Aquellas rocas, que han sido detectadas y seleccionadas por el equipo de carguío, son reducidas a través de voladuras

secundarias, o con la acción de un rompe piedras. La voladura secundaria también interfiere en los ciclos de minado y repercute en ofrecer condiciones adversas de seguridad, lo que también representa un costo adicional.

e. Incremento global en el costo de minado

Todos los problemas mencionados a consecuencia de la presencia de fragmentación gruesa o sobredimensionada interfieren de forma activa en la continuidad y secuencia de los ciclos de minado, lo cual se refleja en la productividad de las operaciones unitarias. La baja productividad en los ciclos operacionales repercute en el negocio minero, debido a que los costos globales de mina se incrementan notablemente, asimismo, crecen de manera probabilística las condiciones subestándares, las cuales conllevan a la producción de accidentes que a la posterior pueden tener un costo más elevado que el que se obtiene a causa de una baja productividad.

f. Proyección de rocas (Fly rock)

Es la roca volante arrojada al aire con violencia como resultado de la acción de la voladura. La inesperada e incontrolada proyección de fragmentos a distancias más allá de las estimadas como límite normal de desplazamiento de los detritos de una voladura representa el más serio problema de seguridad, en razón a que el impulso de lanzamiento aumenta con el mayor diámetro del taladro empleado. Las principales causas del fly rock, son las siguientes:

- **Diseño:** La calidad de perforación es primordial, comprende un burden correcto, espaciamiento, sobre perforación, taco, alineamiento de taladros y diámetros acordes a la altura de banco.
- **Explosivos:** Un incremento de la carga específica resultará en una fragmentación promedio más reducida y en una mayor velocidad de impulsión.
- **Falta de cuidado:** El descuido en cualquier etapa del diseño, del replanteo del trazo de perforación, de la carga y taco de taladros, del sistema de encendido secuenciado, puede motivar una situación peligrosa.

- Agua: Las voladuras saturadas de agua tienden a generar fly rock, debido a que no logra precipitar adecuadamente el explosivo, asimismo también, se crean vacíos en el taco, decreciendo el grado de confinamiento.
- Tipo de Voladura: Como es de entender en minas a tajo abierto, existen dos tipos de voladura: primaria y secundaria, esta última es típica y habitual de proyección por tener mínimo confinamiento y protección natural.

2.3.3. Sectores de la voladura donde se produce fragmentación gruesa

a. En las caras libres

La cara limpia, por lo general, está pre fragmentada o pre-condicionada por el *back break* de la voladura anterior, lo cual genera que los gases producto de la detonación del explosivo, fuguen por esas aberturas, interrumpiéndose o amortiguando el viaje de las ondas de detonación a lo largo del macizo rocoso, fenómeno por el cual, solamente se produce empuje y cizalla de los bloques sueltos, más no trabajo de fragmentación.



Figura 7. Macizo rocoso pre - fragmentado
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

b. En la región del collar del taladro

La fragmentación gruesa en este sector se produce por exceso de sobre-perforación en el banco superior, en la foto de abajo se puede observar que existe una determinada longitud de material fragmentado antes de llegar a roca In situ, asimismo, la referencia, pertenece al sector del taco, donde el explosivo tiene menor confinamiento, decreciendo la velocidad de detonación.



Figura 8. Collar del taladro con material fragmentado
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

c. Al llegar al diseño de la línea límite de minado

Para mostrar este efecto, se hace mención de los diseños de las secciones de perforación a talud final en el sector de yeso anhidrita de la mina Toquepala, observar las longitudes de los parámetros de perforación, para posteriormente ejecutar el análisis correspondiente.

Debido al diseño de ángulo de talud de 65° , existen 7,0 m de distancia entre el taladro de amortiguación ubicado en el toe con respecto a la cresta, este hoyo tiene carga controlada, para proporcionar un efecto de corte, y disipación de la energía explosiva, recién el segundo taladro ejecuta el trabajo

de fragmentación hasta la línea de cresta. Los burdenes efectivos en esta zona son de 11,5 m y 12,0 m en los patrones de mallas de 6,5 m y 7,0 m respectivamente, esta distancia en cualquiera de los dos casos, es bastante amplia e incrementa el factor de rigidez del burden, considerando el tipo de terreno y características del explosivo.

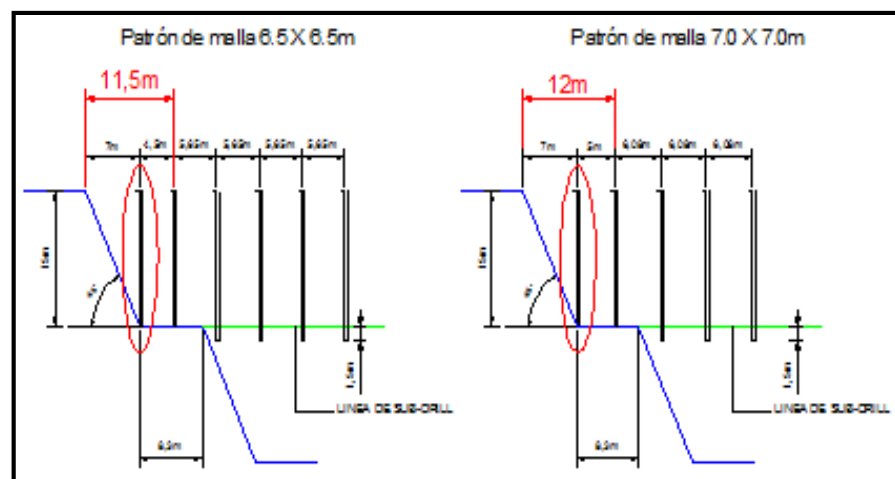


Figura 9. Secciones de perforación a talud final
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Por las condiciones y propiedades del macizo rocoso (masivo y competente), es difícil durante la excavación obtener un talud de minado de 65°, el macizo rocoso ofrece resistencia al corte, por el tamaño de bloques presente en la estructura rocosa.



Figura 10. Minado de pala a talud final
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

d. En los contornos de la voladura

Definitivamente, no solamente en el contorno del talud final, sino en todos los lados de la voladura, incluyendo la cara libre se va a producir fragmentación gruesa, por el motivo de que en dichos sectores los diseños de carga explosiva son controlados para evitar los sobre quiebres aledaños.

Para un mejor entendimiento, se toma como referencia el nivel 2860, sector yeso anhidrita de la mina Toquepala, en cuya figura se muestran los proyectos de voladura delimitados con un color diferente, y a continuación se trazan los límites o contornos de cada uno de ellos, los cuales teóricamente son zonas de fragmentación gruesa. Una forma de contrarrestar

esta problemática es ejecutando diseños de voladura más amplios, con mayor número de taladros, este aspecto se estará tratando con más detalle en los siguientes ítems.

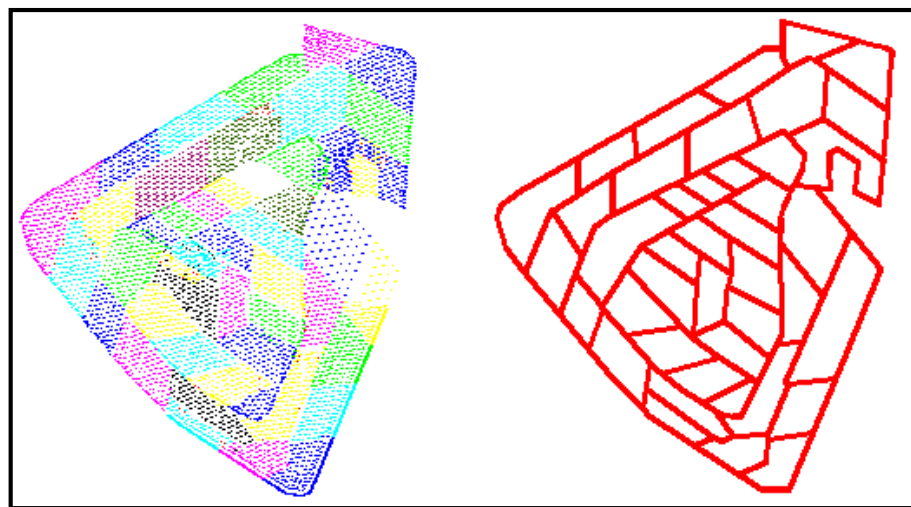


Figura 11. Nivel 2860 sector yeso anhidrita
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

2.3.4. Geometría de los proyectos de voladura

La geometría de los diseños de perforación y voladura son muy importantes para los resultados de granulométricos. Una adecuada geometría de diseño permite una mejor configuración de los tiempos de retardo, permitiendo el aprovechamiento máximo de las ondas de detonación en un intervalo de tiempo, con lo que también se genera un mejor efecto de los gases en expansión y una adecuada acción de la colisión de los

fragmentos de roca, estas ventajas se verán reflejadas en adecuados índices de fragmentación, apilamiento y corte por pateo. Para esto es importante considerar lo siguiente:

a. Número de taladros a disparar

Cuando se tienen taladros reducidos en un paquete de voladura existen mayor cantidad de back break entre los proyectos, lo que implica mayor cantidad de disparos, generando producción de material grueso, lo que implica tiempos muertos en la continuidad del minado.

b. Geometrías largas y delgadas

Los diseños de perforación y voladura con geometrías alargadas y con cara libre repercuten en desplazamientos exagerados y con sectores pronunciados de fragmentación gruesa, básicamente porque no existe una distribución adecuada de los tiempos en el circuito de la voladura, las geometrías alargadas no permiten una adecuada acción de la colisión de los fragmentos de roca. Ver y analizar el proyecto de voladura 2875053 (Fig. 12), el cual ha sido disparado en yeso anhidrita.

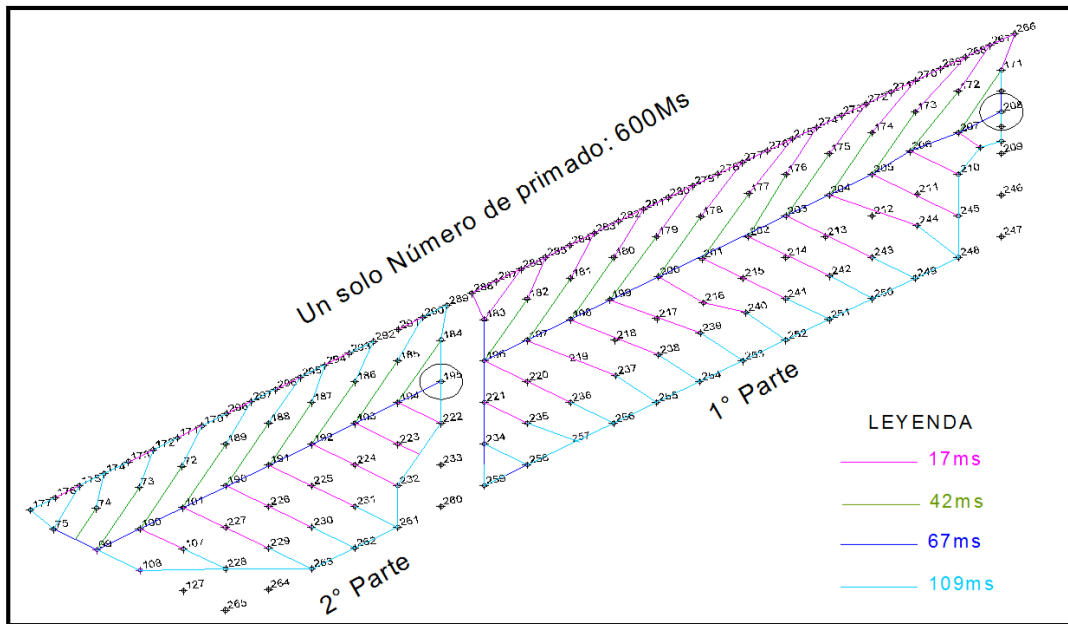


Figura 12. Diseño de voladura proyecto 2875 053
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

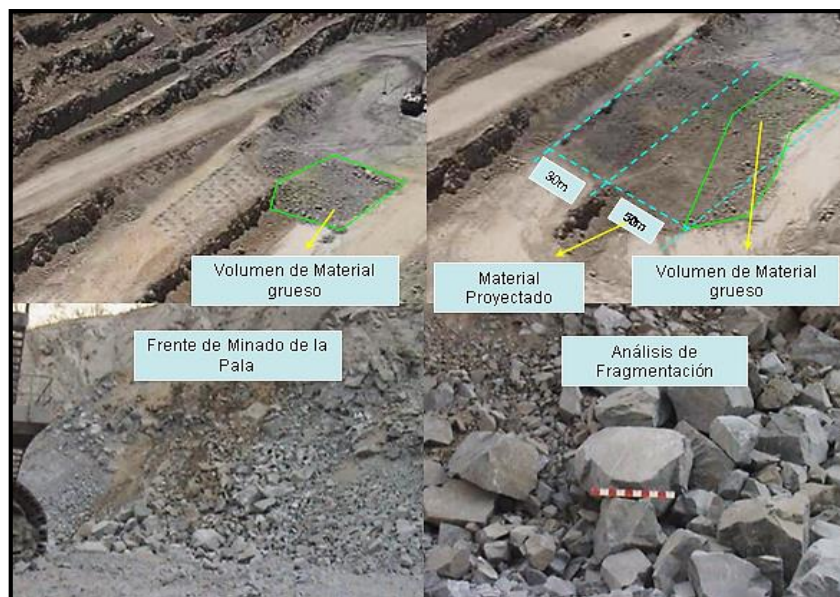


Figura 13. Análisis de voladura proyecto 2875 053
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

c. Geometrías con número reducido de taladros

Como se enunció, el número de taladros en las voladuras es una variable que determina los resultados de fragmentación, este efecto se puede comprobar en la foto análisis de la voladura del proyecto 2800008, los diseños de carga explosiva fueron similares al anterior disparo analizado. En las figuras que se muestran se aprecia, que el proyecto de voladura, muy aparte de tener un número reducido de taladros, presenta una geometría de diseño irregular, lo cual conlleva a la obtención de resultados no deseados, los cuales afectan la productividad de las operaciones posteriores a la voladura. Se analiza visualmente el siguiente proyecto de voladura desde la etapa de diseño hasta la obtención de los resultados.

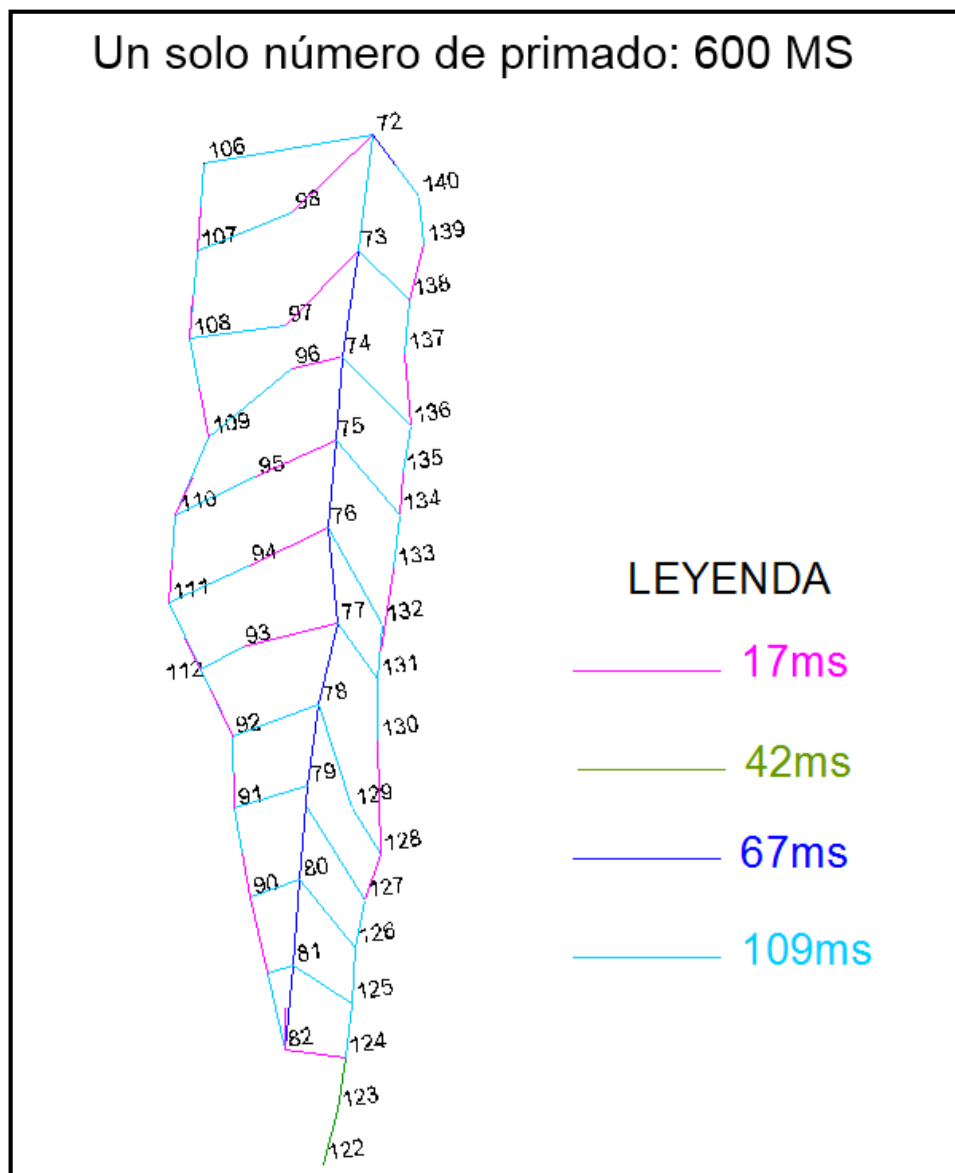


Figura 14. Diseño de voladura proyecto 2800 008
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.



Figura 15. Análisis de voladura proyecto 2800 008
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

d. Geometrías con configuraciones masivas de taladros

Los mejores resultados, en cuanto a fragmentación y apilamiento del material disparado, que se ha obtenido con la iniciación de detonadores pirotécnicos han sido, cuando se ha diseñado y efectuado dichas voladuras con un número adecuado de taladros (160 aproximadamente), estos, además de haber sido un gran número, han estado diseñados con una geometría adecuada, donde el ancho del sector de la

iniciación ha sido menor en longitud que el largo, ésta condición ha favorecido en un adecuado diseño de tiempos reflejado en una óptima mecánica de fragmentación. En la elaboración de estos diseños se requiere un adecuado control de las cargas explosivas en base a los tiempos o intervalos de retardo, con la finalidad de no detonar de manera conjunta o traslapada varios taladros a la vez, ya que esto tiene implicancias en los niveles de vibración y fly rock. A continuación, los resultados de una voladura con esas características.

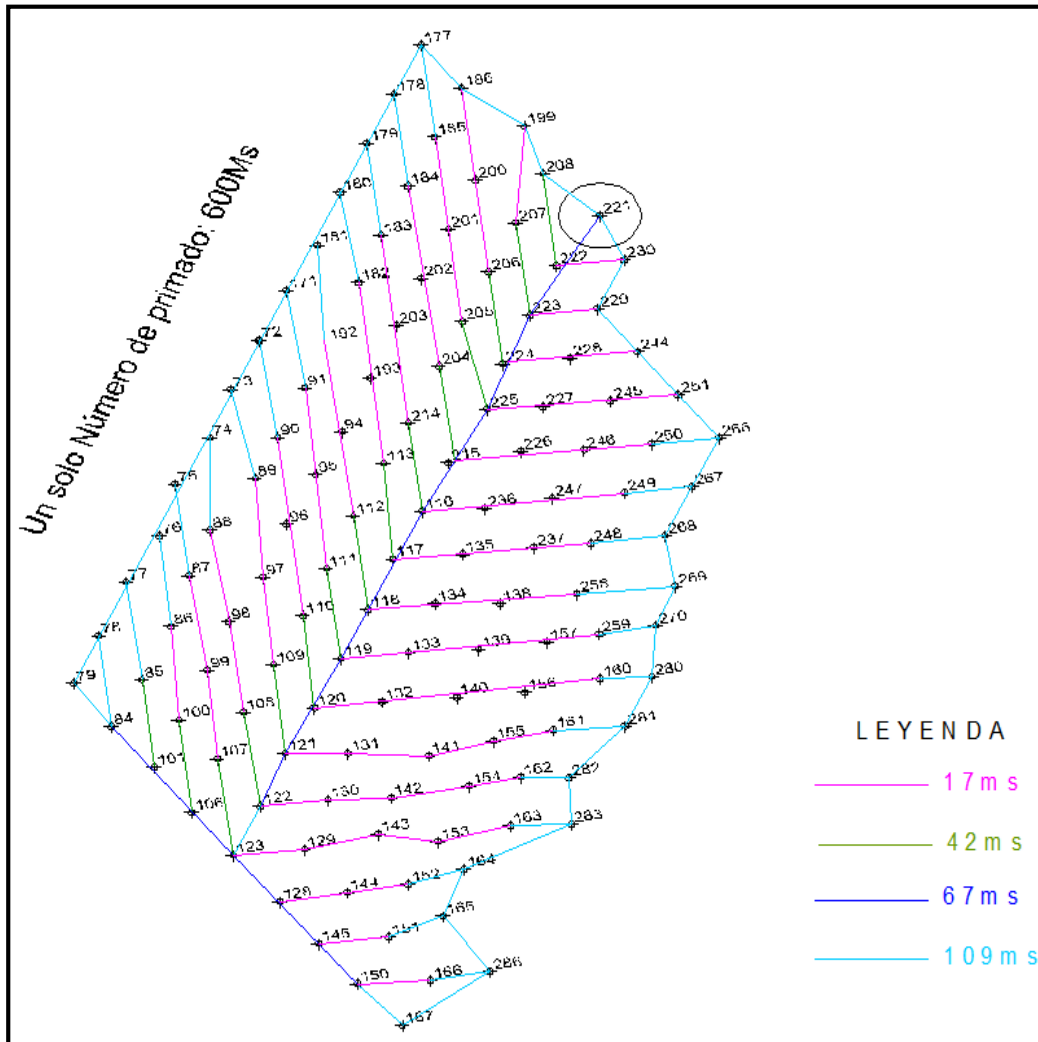


Figura 16. Diseño de voladura proyecto 2845 030
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.



Figura 17. Análisis de voladura proyecto 2845 030
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

En todos los casos, los diseños de carga explosiva han sido los mismos, pese a ello los resultados de fragmentación se muestran diferentes en todos los proyectos.

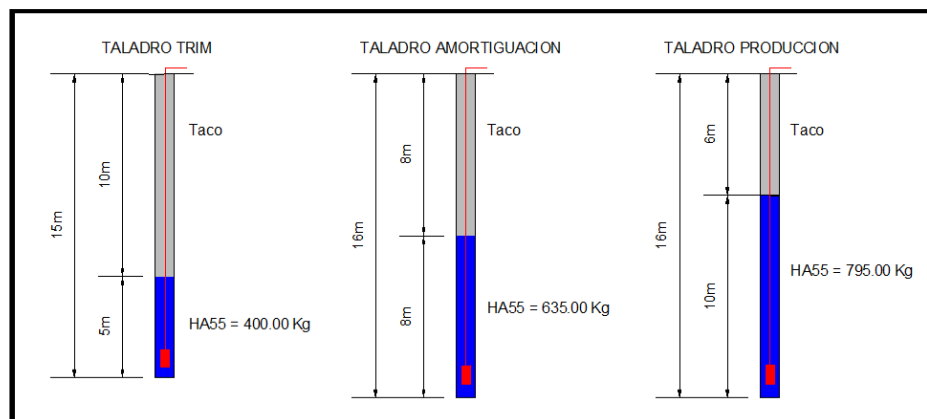


Figura 18. Diseño de cargas explosivas proyecto 2845 030
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

2.3.5. Limitaciones de los detonadores pirotécnicos

El diseño de la voladura es un proceso de alta complejidad; la elección de los tiempos de retardo tiene una gran influencia en los resultados de fragmentación, desplazamiento y control de daño, motivo por el cual, la secuencia de tiempos debe de ser cuidadosamente diseñada para obtener los resultados planeados. Los tiempos nominales de los retardos pirotécnicos no se reflejan en la práctica, estos tienen una dispersión con un determinado porcentaje más o menos que el tiempo de catálogo, cuando esta dispersión es alta, existe el montaje de los tiempos en la voladura, determinando los resultados de esta.

a. Concepto de dispersión de tiempos de retardo

➤ Precisión

Es cuán dispersos están respecto de la media los tiempos de retardo de una serie de detonadores del mismo tiempo y número. Estadísticamente, la precisión está dada por la desviación estándar.

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum X^2 - (\sum X)^2}{n}} \quad [1]$$

σ : Desviación estándar obtenida

X : Tiempo medio obtenido

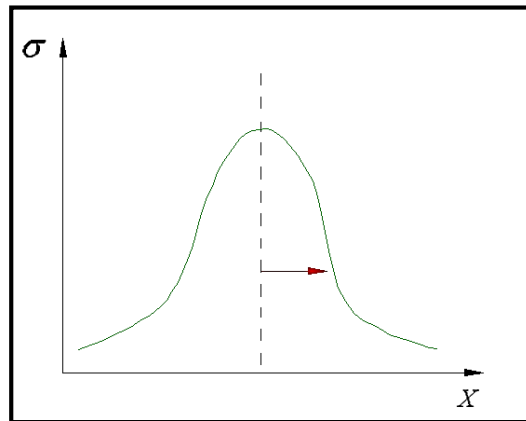


Figura 19. Campana de Gauss

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

➤ **Dispersión**

Es la desviación estándar presentada en términos porcentuales, y representa a la precisión, es también denominado coeficiente de dispersión

$$D(\%) = \frac{\sigma}{X} \times 100 \quad [2]$$

Donde:

$D(\%)$: Porcentaje de dispersión.

➤ **Exactitud**

Define la relación con la lejanía que tiene la media de una muestra respecto del tiempo nominal de retardo del detonador.

$$Cm(\%) = \frac{X - N}{N} \times 100 \quad [3]$$

Donde:

$Cm(\%)$: Coeficiente de las medias

N : Tiempo nominal

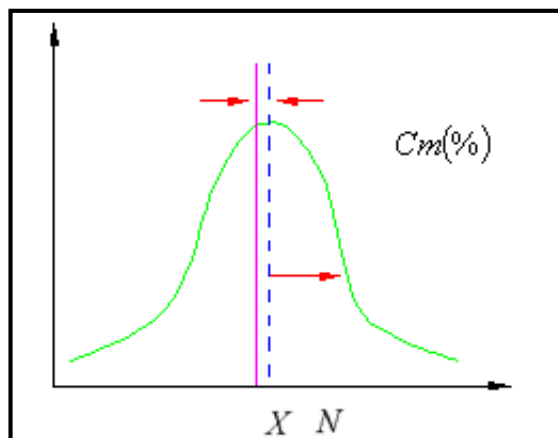


Figura 20. Campana de Gauss
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Para la medición de estas desviaciones de los tiempos nominales de retardo existen varios procedimientos y equipos, como el registrador de datos microtrap, o también por medio de una cámara de alta velocidad. Como ejemplo a manera de ilustración, véase la dispersión del Nonel de 600 Milisegundos.

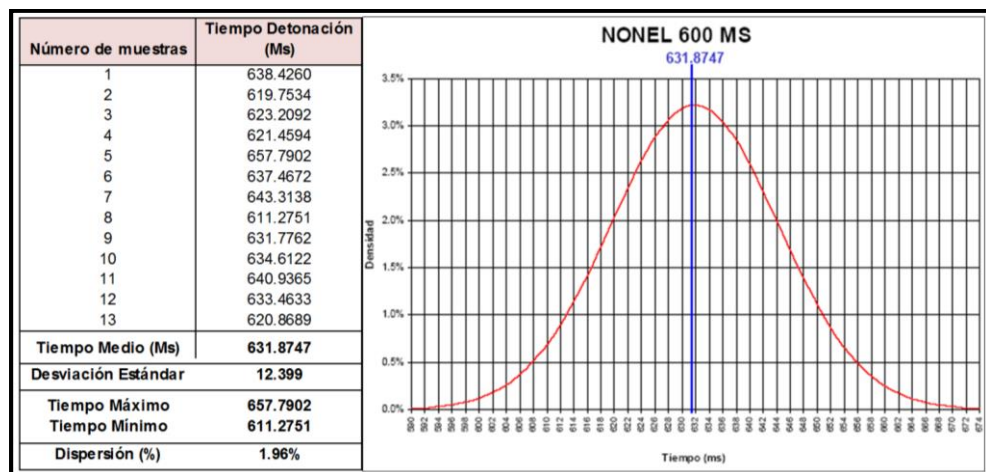


Figura 21. Porcentaje de dispersión del retardo de 600 MS
Fuente: Departamento de perforación y voladura, prueba de dispersión, mina Toquepala, 2012.

b. Restricción en el diseño de tiempos

Hoy en día, la voladura de rocas presenta diferentes variables de desarrollo como la exactitud en el diseño de tiempos, formulado a través de la interacción de las

velocidades de onda del macizo rocoso y la velocidad de agrietamiento, esta interacción de tiempos se encuentra en el orden de 2 a 6 milisegundos, tiempo que no es posible lograr con los detonadores pirotécnicos, debido a que el porcentaje de dispersión es mucho mayor a 20 milisegundos como por retardo. Bajo este contexto, es imposible elaborar una secuencia de detonación, por el concepto de interacción de ondas, motivo por el cual, existe la restricción en los diseños de voladuras, cuando estos son ejecutados con detonadores pirotécnicos.

c. Acoplamiento de cargas en un intervalo de tiempo

En la mina Toquepala, antes del empleo de los detonadores electrónicos en el sector de yeso anhidrita, los tiempos en los diseños de voladura han estado determinados por los diferentes números de retardos y hoyo y superficie que se tienen en stock, los cuales al igual que el retardo de 600 milisegundos, también requieren constantemente sus análisis de desviación de tiempos. Este porcentaje de dispersión de los tiempos permite la desviación de las secuencias de voladura, debido a que los taladros ya no salen con el tiempo

diseñado, se traslapan o detonan antes o después de su tiempo nominal.

En las voladuras con detonadores pirotécnicos, para reducir la proporción o el porcentaje de dispersión, es necesario tomar las siguientes consideraciones:

- Se tienen que usar en los proyectos de voladura, la menor cantidad de números nominales de retardos tanto de hoyo como de superficie.
- Hay la probabilidad de que exista una inversión de secuencia si se utilizan tiempos cortos con diferentes números de retardos, por lo cual, es mejor emplear un solo número retardando en hoyo, y retardar en superficie.
- En las simulaciones de voladura con detonadores pirotécnicos, trabajar con los tiempos de dispersión, nunca regirse al tiempo nominal de catálogo
- Estudios y análisis continuos de la dispersión de los tiempos de retardo, con sus respectivas aplicaciones en los diseños de voladura.

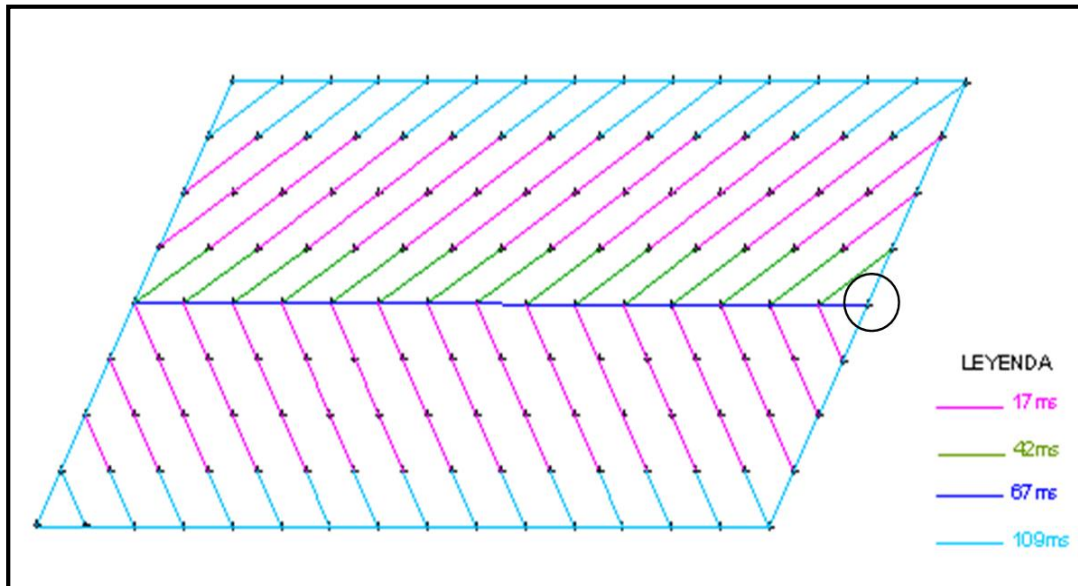


Figura 22. Diseño de voladura en “v”
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Para un mejor entendimiento del concepto enmarcado, el diseño de voladura de la figura 22; es simulado en el software 2D Bench, incluyendo la data de los porcentajes de dispersión de los detonadores de interior como de superficie, los resultados de dicha simulación refleja que existen hasta cinco taladros que pueden detonar en un intervalo de tiempo, lo cual es perjudicial para nuestra secuencia de detonación. (Ver figura 23).

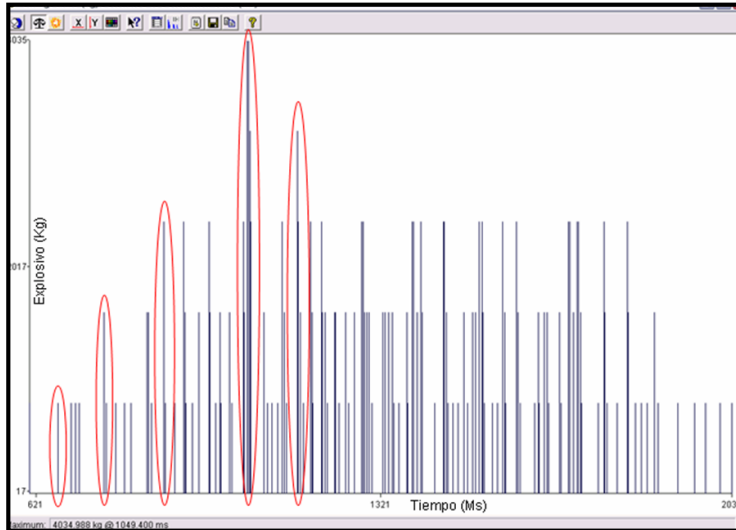


Figura 23. Montaje de carga explosiva
Fuente: Software 2D Bench.

Asimismo, el software provee información de la ubicación de los taladros afectados en el intervalo de tiempo para ejecutar alguna posible corrección.

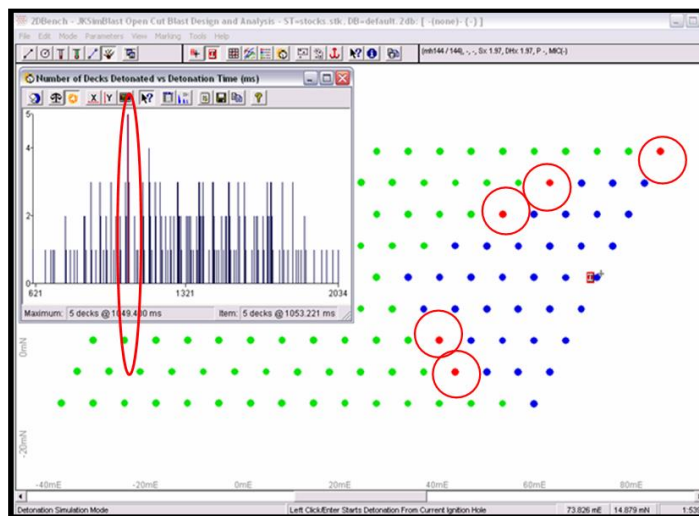


Figura 24. Detonaciones por intervalo de tiempo
Fuente: Software 2D Bench

d. Incremento de los niveles de vibración

La detonación secuencial implica la salida de taladro a taladro en un intervalo de tiempo, con la finalidad de controlar los siguientes aspectos:

- La energía del explosivo durante la detonación.
- El confinamiento de la energía del explosivo.
- Mantener la generación de energía del explosivo al máximo.

Cuando estos requisitos son cumplidos, implica que los intervalos de detonación han sido los correctos, por lo tanto, el montaje o acoplamiento de cargas han sido controlados, y los niveles de vibración se mantendrán por debajo de las velocidades críticas, aspectos adversos a este enunciado, traen como consecuencia incrementos en los niveles de vibración con tendencias a impactar o romper el equilibrio de los macizos rocosos.

e. Seguridad en las voladuras

La voladura de rocas es un proceso complejo, donde es importante poner atención a todos los detalles que la

operación involucra, cuando las reglas o procedimiento son incumplidos, como toda operación dentro de la minería, tendrá serias implicancias en la productividad y seguridad, este último parámetro de medición es más importante que el primero, ya que está amarrado o directamente relacionado a la integridad de las personas, equipos e instalaciones dentro de la infraestructura de una mina, en tal sentido, es prioridad orientar todas las actividades, tomando como referencia principal el tema de la seguridad.

Como ya se mencionó en reiteradas oportunidades, las desviaciones del diseño planificado en una voladura pueden conllevar a la creación de diferentes condiciones subestándares, tales como:

- Presencia de fly rock, las rocas voladoras fuera de los límites de la voladura pueden ocasionar daños irreversibles.
- Con los incrementos de vibraciones, se debilitan las paredes de los macizos rocosos, llevando a la activación de estructuras geológicas.

- Un traslape de tiempos ocasiona la detonación anticipada o retardada de una carga explosiva, la cual puede tener un impacto directo en las cargas vecinas, neutralizando la línea descendente, y produciendo un tiro cortado, el cual representa una condición potencial de seguridad.
- Los tiros cortados, a consecuencia de acciones operacionales, no son detectados antes de la voladura; con el sistema de iniciación electrónica se reduce la producción de tiros cortados, debido a que todos los detonadores son testeados antes de iniciar la voladura.

2.3.6. Conceptos básicos para la determinación del diseño de tiempos

a. Interacción de ondas de detonación de taladro

Para los logros satisfactorios, en cuanto a fragmentación, es necesario crear superficies libres alrededor de cada taladro en la que los esfuerzos de compresión son reflejados para generar los esfuerzos de tracción. Estas superficies son generadas por la detonación secuencial exacta de una sucesión de taladros adyacentes en una fila empezando por uno más próximo a una superficie libre inicial, de tal manera

que cada taladro genera una superficie libre para el siguiente taladro. Los periodos de taladros deben ser suficientes para asegurar el tiempo necesario para la creación de estas superficies y el movimiento del material.

En los primeros instantes de la detonación ocurre una trituración de la roca por efecto de la presión en la forma de la onda de choque que se expande en forma cilíndrica alcanzando valores que superan ampliamente la resistencia dinámica a la compresión de la roca. Luego ocurre una reflexión en la onda de choque cuando esta alcanza una superficie libre generando en el proceso esfuerzos de tracción y de cizallamiento al corte. Esto sucederá cuando las grietas radiales no se hayan propagado más que una distancia equivalente a un tercio de la distancia del taladro a la superficie libre.

Primero, es necesario explicar ciertos aspectos referentes a la naturaleza de onda P, onda S, y la formación de grietas en el macizo rocoso. Cuando se realiza una voladura ocurren muchos fenómenos de manera casi instantánea, aquí se ven

sólo aquellos aspectos que nos ayudan a comprender cómo funciona el diagrama de Langrage.

Las ondas P son aquellas que comprimen la roca y dan lugar al movimiento de las partículas en la dirección de propagación de las ondas. Estas ondas son las más rápidas y producen cambios de volumen, pero no de forma en el material a través del cual se propaga.

Las ondas S son aquellas que generan movimiento en la dirección perpendicular al del movimiento de las partículas, es decir, perpendicular al movimiento de la partícula de la onda P. ¿Cómo interactúan las ondas? Dada la detonación de un taladro (01), este genera ondas P, ondas S y fractura, que interactúa a su vez con las ondas P, ondas S; producto de la detonación de un taladro adyacente en la misma fila (02), produciéndose varias regiones limitadas por las diversas ondas, siendo de particular interés la región donde ocurre la máxima tracción, es allí donde se produce la mayor fractura de rocas, ya que estas soportan muy bien la compresión pero no la tracción. Esta región está ubicada en el rombo limitado por las ondas P, específicamente en el centroide del rombo

producido por las ondas P. La fragmentación uniforme ocurrirá cuando la mayor área entre los taladros esté contenida dentro de esta región.

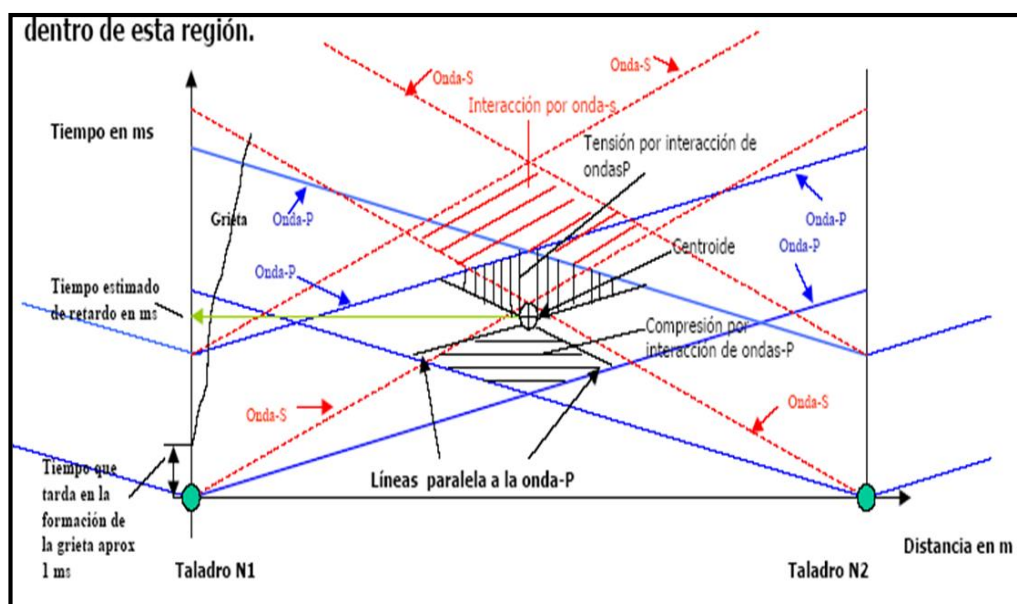


Figura 25. Interacción de ondas. Teoría de Lagrange
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

b. Velocidad de propagación de la roca

Es la velocidad con la que se propaga la onda de tensión o de choque a través del macizo rocoso, es muy importante porque afecta a la distribución de tensiones en el interior del sólido rocoso, y también porque es una medida de la elasticidad de la roca. Cuando el macizo rocoso es masivo se tiene valores altos de velocidad de onda, y cuando es

fracturado e irregular decrecen los valores de velocidad de propagación, debido a que la presencia de fracturas actúa como filtros que amortiguan y atenúan la transmisión y continuidad de las ondas.

La velocidad de propagación es un parámetro muy importante, que no solamente sirve para seleccionar el explosivo adecuado, a través de relaciones de impedancia, sino también interviene directamente en el cálculo del tiempo de taladro a taladro, determinado a partir de la interacción con la velocidad de grieta de una detonación.

c. Modelo de Lagrange

El diagrama de Lagrange es una representación gráfica de las velocidades de ondas sísmicas, como la onda P, onda S y la velocidad de formación de grieta. Esta representación se hace sobre un plano cartesiano en donde el eje de las abscisas es la distancia expresada en metros, y el eje de las ordenadas muestra el tiempo expresado en milisegundos.

El diagrama de Lagrange es una herramienta que sirve para determinar el tiempo de retardo que debe de existir entre

las detonaciones contiguas para obtener el máximo provecho de la energía del explosivo aplicado al macizo rocoso; esto supone que se puede definir cualquier tiempo de retardo que se requiere como resultados de la aplicación del diagrama.

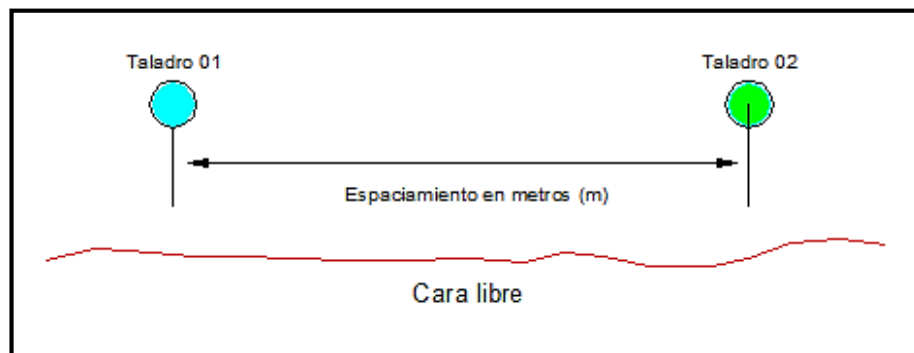


Figura 26. Esquema de voladura, teoría de Lagrange
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

➤ **Determinación de tiempos entre taladros**

Para determinar el tiempo óptimo entre taladros es importante conocer las velocidades de onda P, S y de fractura, los cuales deben interactuar con los parámetros de módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y la densidad de la roca. El tiempo entre taladros se determina mediante la interrelación de las siguientes ecuaciones matemáticas.

$$V_{OndaP} = \sqrt{\frac{E \times (1 - \nu)}{\rho \times (1 - 2\nu) \times (1 + \nu)}} \quad [4]$$

$$V_{OndaS} = \sqrt{\frac{E}{2\rho \times (1 + \nu)}} \quad [5]$$

$$V_{Fractura} = \frac{V_{OndaP}}{6} \quad [6]$$

Donde:

V_{OndaP} : Velocidad de onda P

V_{OndaS} : Velocidad de onda S

$V_{Fractura}$: Velocidad de fractura

E : Módulo de elasticidad

ρ : Densidad de la roca

ν : Coeficiente de Poisson

De no disponer de las características elásticas de los materiales, se tiene que disponer de por lo menos de la velocidad de onda P como dato fundamental para poder

estimar la velocidad de onda S, y la velocidad de formación de grieta.

$$V_{OndaS} = 0,55 \times V_{OndaP} \quad [7]$$

Cuando la roca tenga un coeficiente de Poisson de 0,25.

La grieta se origina en un tiempo infinitesimal (delta T) posterior a la detonación que es normalmente alrededor de 1 milisegundo así que en la gráfica el origen de la grieta no es en el origen de coordenadas, sino que es 1 milisegundo desplazado en el eje del tiempo. La distancia que recorre la grieta es la mitad del espaciamiento entre taladros, por lo tanto, queda definida de la siguiente manera:

$$T_{Fractura} = \left[\frac{(S/2)}{V_{Fractura}} \right] \times 1000 \quad [8]$$

Se considera que las distancias que recorren las ondas P y S, es la mitad del espaciamiento, así el tiempo de recorrido de la onda P y S serán:

$$T_{OndaP} = \left[\frac{(S/2)}{V_{OndaP}} \right] \times 1000 \quad [9]$$

$$T_{OndaS} = \left[\frac{(S/2)}{V_{OndaS}} \right] \times 1000 \quad [10]$$

Adicional a todo lo expuesto, existe un factor de detonación alfa cuyo valor varía entre cero y uno, que determina el punto de colisión de las ondas. En el siguiente diagrama, se ve que las ondas colisionan a la mitad del espaciamiento, es decir, se está usando un coeficiente de alfa de 0,5. Entonces, con valores de alfa mayores que 0,5; significa que la colisión de ondas ocurre hacia la derecha; con valores menores de 0,5 la colisión de ondas ocurre a la izquierda.

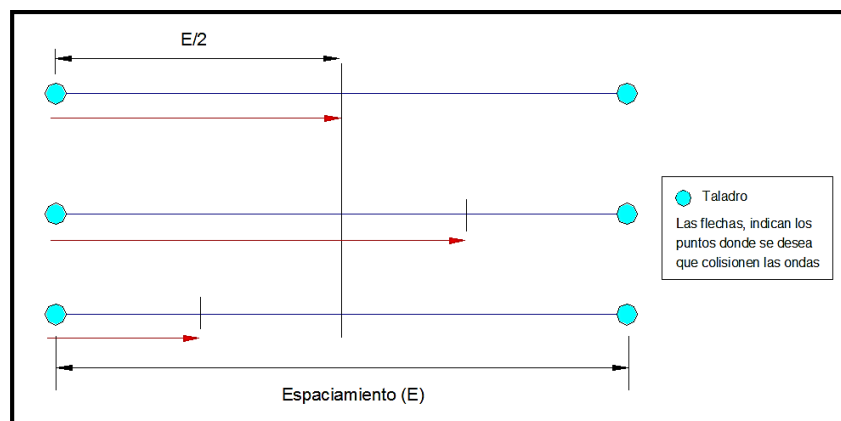


Figura 27. Mecánica de colisión de ondas, teoría de Lagrange
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

El tiempo de retardo está dado por la siguiente ecuación.

$$T_{\text{Retardo}} = \left[\frac{S}{V_{\text{Fractura}}} \right] \times \left[(1 - \alpha) \times \left[1 + \left[\frac{V_{\text{Fractura}}}{V_{\text{OndaP}}} \right] \right] \right] \times 1000 \quad [11]$$

Asumiendo que las ondas colisionan a la mitad del espaciamento, el valor de alfa es igual a 0,5; por lo que la ecuación anterior queda simplificada a:

$$T_{\text{Retardo}} = 2500 \times \left[\frac{S}{V_{\text{OndaP}}} \right] \quad [12]$$

➤ **Determinación de tiempos entre filas:**

Los tiempos entre filas se determinan a través de un rango experimental, de 15 milisegundos por metro de burden efectivo como mínimo, el tiempo de la línea troncal o eje de la voladura (tiempo entre filas) es el que provee alivio a los taladros en secuencia, no es el que efectúa la fragmentación propiamente dicha de la roca.

$$T_{\text{Filas}} = 15Ms \times B \quad [13]$$

2.3.7. Cómo predecir los resultados de fragmentación

a. Software Wip Frag

La medición de la fragmentación es una herramienta que se suma a la extensa familia de aplicaciones para granulometría, el método de óptica digital (foto análisis) es de uso práctico. La introducción de foto análisis como una herramienta práctica y viable ha tenido que esperar las recientes y dramáticas mejoras en velocidad, performance y costo de video cámaras y microcomputadoras, también, el desarrollo del software que puedan reconocer los límites de los fragmentos en una pila de material volado y poder diferenciar un fragmento de otro.

El método Wip Frag comienza con una imagen de material quebrado y convertido en una malla de fragmentos. Luego mide estos fragmentos, muestra y plotea en un gráfico estadístico el análisis de la fragmentación. El software permite comparar la malla resultante con la imagen original para poder corregir deficiencias editando manualmente.



Figura 28. Roca volada para análisis de Wip frag
Fuente: Software Wip Frag

Una vez introducidas las fotos en el software, este clasifica cada uno de los fragmentos, para posteriormente, generar la curva granulométrica. (Ver figura 29 y figura 30).

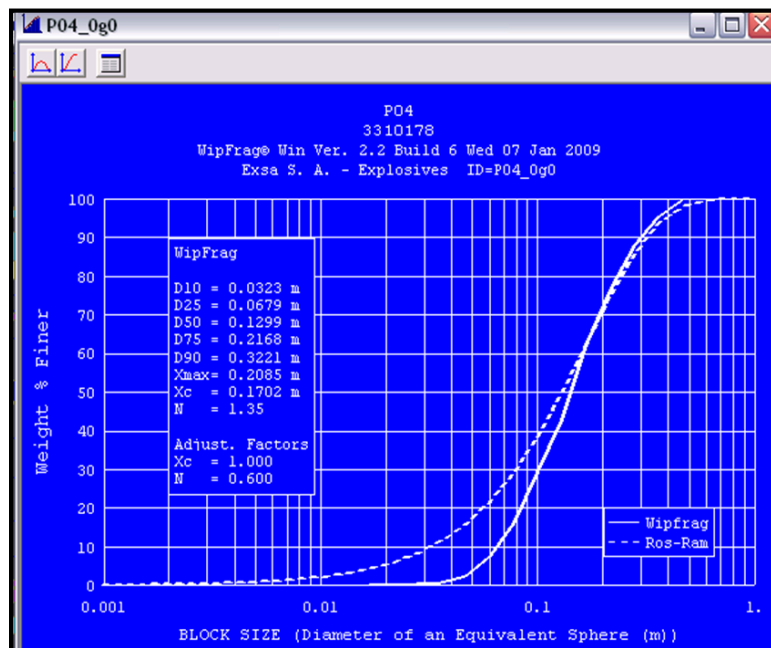


Figura 29. Curva de fragmentación
Fuente: Software Wip Frag

Otra de las ventajas del software es que genera los porcentajes de tamaños de rocas que pasan a través de una malla o tamiz, asimismo, proporciona información del porcentaje de tamaños mayores y menores, como también el tamaño medio. (Ver figura 30).

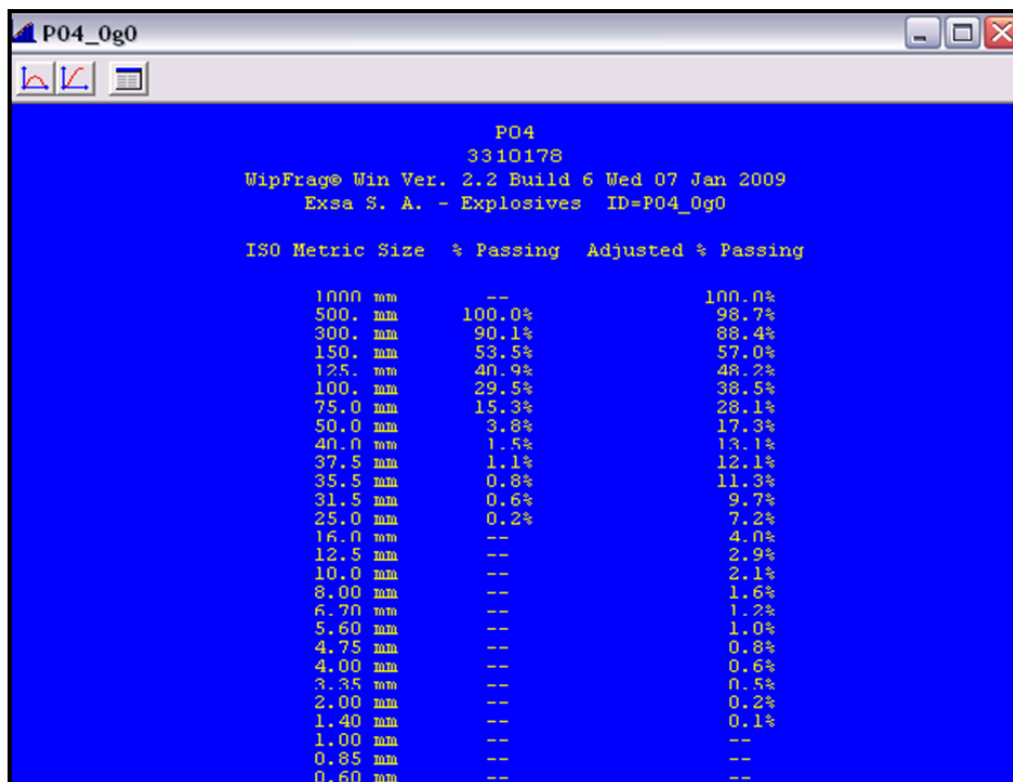


Figura 30. Porcentaje de tamaños medios de roca
Fuente: Software Wip Frag.

Para el análisis se emplea una cámara de mano, o video cámara liviana. Las grabaciones de video dan una gran cantidad de imágenes, elimina retrasos, y permite combinar imágenes de diferentes acercamientos para mejorar los resultados y la resolución. La estación de trabajo *Wip Frag*, también acepta el ingreso de imágenes impresas, slides de 35 mm, memorias de cámaras digitales, o imágenes en vivo de material quebrado, una sola central de trabajo puede brindar servicio a varios operadores, no solo en la rutina de procesamiento de datos, sino también para entrenamiento, calibración e investigación. Existe también el monitoreo en línea, donde se utiliza video cámaras fijas enfocadas en tolvas, fajas. etc. Las imágenes son automáticamente capturadas en intervalos o accionadas por sensores, por ejemplo, cuando un volquete pasa por debajo de la cámara, estas imágenes son transmitidas a una estación de trabajo en la oficina de la mina, y los resultados son mostrados como cuadros o gráficas con límites aceptables para el tamaño de fragmentos incluyendo finos y rocas sobredimensionadas.

2.3.8. Cómo evaluar los resultados de las voladuras

Además de la clasificación granulométrica del material *in situ* y en plantas de tratamiento, no existe ningún método que haga posible evaluar cuantitativamente la fragmentación en condiciones fiables. La distribución granulométrica constituye en la herramienta básica dentro del proceso de optimización de las voladuras, ya que es el único método de comparación de la fragmentación obtenida cuando se procede a realizar un estudio de sensibilidad de los parámetros de diseño.

Dado el elevado costo y tiempo necesario para obtener la curva granulométrica completa, en las operaciones mineras se utilizan los siguientes métodos aproximados.

a. Fragmentación y esponjamiento de la pila

- Análisis cualitativo visual. Este es el sistema más ampliamente utilizado y en la mayoría de los casos el único que se aplica. La pila del material y el aspecto general de la voladura es observada inmediatamente después de efectuarse el disparo, realizándose por el ingeniero responsable una valoración y evaluación subjetiva, sin

embargo, solo puede apreciarse cambios en la fragmentación cuando las diferencias son muy acusadas, incluso con una gran experiencia del personal responsable. La aplicación de esta técnica tiene poco rigor, no permite establecer una distribución de tamaños precisos y con frecuencia no queda constancia escrita de los resultados. En general, solo sirve para que los especialistas tengan una primera toma de contacto con los resultados de la voladura con vistas a la realización de un estudio completo.

- Método fotográfico. Esta técnica ha sido aplicada de diferentes formas, y expuestas por diferentes autores: Noren y Porter (1974), Reid (1976), lo primeros utilizaban fotografías de la pila sobre las que elegían aleatoriamente unas zonas equivalentes al 15 % de la superficie total, superponiendo a continuación una malla para la evaluación de tamaños y recuentos de los fragmentos. Los resultados de cinco voladuras realizadas en condiciones similares mostraron una desviación del más o menos 9,6 % alrededor del tamaño medio de fragmento.
- Método fotogramétrico. Aportan una precisión mayor que los de fotografía convencional. Pero dado el costo de

inversión en equipos y accesorios es relativamente alto, su empleo es solo un complemento de las aplicaciones principales que son: el control topográfico de la explotación en los tajos de excavación. La ventaja de la fotogrametría es que permite el estudio tridimensional de la pila de escombros, pudiendo calcularse el tamaño de carga de cada fragmento y el volumen y esponjamiento de la pila.

- Fotografía ultrarrápida. El empleo de esta técnica ha sido expuesto por Blair (1960), Cheng (1975), Winzer (1979), Chiapetta (1983), y Bauer (1982). Solamente en los últimos años ha sido considerada como una técnica de evaluación de la fragmentación. El principal problema que plantea es que los gases producidos y el polvo enrarecen el ambiente y dificultan la visión de la formación de grietas y desplazamiento de la pila.
- Procesamiento digital de imágenes. Los recientes avances en información han permitido la aplicación del análisis de imágenes a la evaluación de la fragmentación del escombros de las voladuras. Los métodos modernos de análisis de imágenes utilizan un software y hardware sofisticado para cuantificar con imágenes en dos

dimensiones aspectos geométricos, tales como el área, número, perímetros, forma, tamaño y orientación. Son varias dificultades que aún hoy no están totalmente resueltas, como, por ejemplo, una definición de contornos precisos, la corrección de los errores debidos al solape entre fragmentos, etc. Actualmente, los procedimientos desarrollados comprenden las siguientes etapas:

- ✓ Captación de la imagen
 - ✓ Cambio de escala
 - ✓ Intensificación de la imagen
 - ✓ Segmentación de la imagen
 - ✓ Manipulación de la imagen binaria
 - ✓ Medida
- Estudio de la producción del equipo de carga. Esta técnica de evaluación de la fragmentación se basa en que los rendimientos de las unidades de carga son función inversa de la granulometría del material y función directa del esponjamiento del mismo. La presencia de bloques grandes en la pila, reducido esponjamiento y repiés, serán reflejados inmediatamente en la producción. Si la técnica

se aplica correctamente se puede realizar una evaluación muy precisa, hay que tener los tiempos muertos no imputables a las condiciones de carga como paradas de equipos por falta de volquetes, averías mecánicas, desplazamientos y limpieza del tajo.

- Producción e interrupciones de la chancadora. La producción de cualquier trituradora depende básicamente de la granulometría del material de entrada, por lo que puede obtenerse indiscretamente un índice de la fragmentación a partir de los rendimientos del equipo y del consumo de energía por tonelada tratada. Debe llevarse un control de las interrupciones en las trituradoras debidas a la presencia de bloques de gran tamaño, así como el desgaste de los revestimientos de acero.

b. Geometría de la pila, altura y desplazamiento

La configuración de la pila está gobernada por:

- Las variables geométricas de diseño, como son: altura de banco, inclinación de taladros, burden espaciamento y taco.
- Factores de consumo de explosivo.

- Secuencias de encendido y tiempos de retardo.

La geometría óptima depende de cada caso del sistema de carga del material empleado. Las geometrías de apilamiento según la forma se definen de la siguiente manera:

- Representa la situación ideal para el carguío con palas de ruedas, pero si el equipo de carguío empleado son las palas de cables, el rendimiento será bajo y se precisarán muchas horas de tractor para la limpieza del corte y el acomodo del material.
- Requiere unas labores de limpieza mínimas, y la productividad es alta, pero puede existir problemas de seguridad para los operadores por la caída de roca desde gran altura.
- Refleja las condiciones óptimas para la utilización de palas de cable.
- Este procedimiento de control puede realizarse por medio del equipo de topografía, completándose con fotografías transversales.

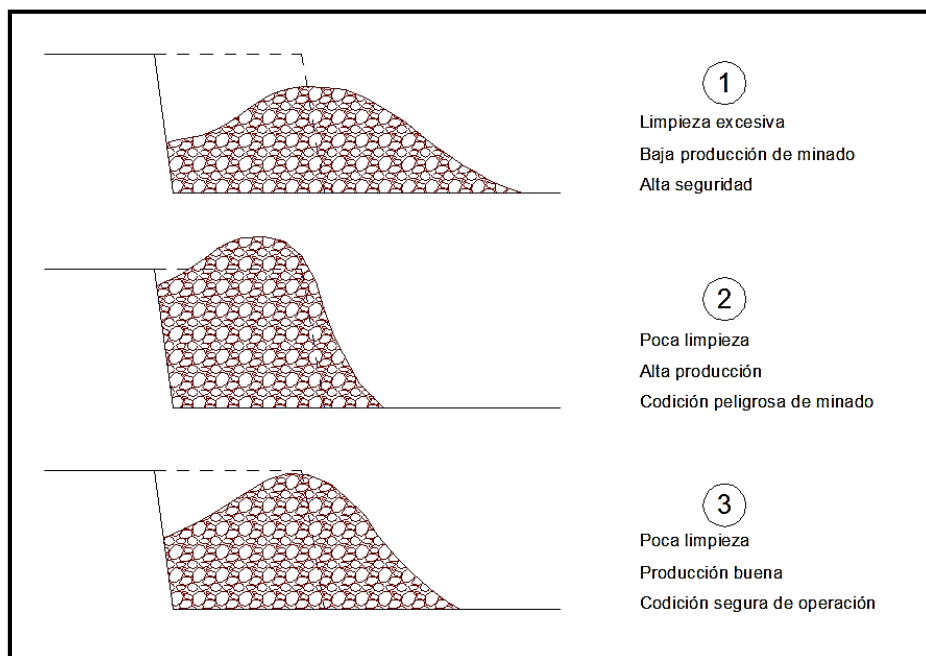


Figura 31. Geometrías de apilamiento de material
Fuente: Manual de perforación y voladura de rocas, 2003.

c. Estado físico del macizo residual

Una vez cargada la pila de material en el banco es posible observar la existencia o no de sobre excavación y la magnitud de los daños en el macizo residual. La valorización de los daños producidos por las voladuras en el macizo remanente puede realizarse mediante cualquiera de los métodos de caracterización geomecánica de macizos rocosos, pero para los fines que se persiguen el sistema propuesto por Sabih (1980), es por su sencillez y pragmatismo uno de los más aplicados.

Tabla 1
Niveles de daños producidos por voladuras

| Nivel de daños | Condiciones Observadas en el Talud | | |
|--------------------|--|--|---|
| | Juntas y bloques | Ángulos de talud y condiciones del frente | Condiciones de excavación en el frente |
| 1 Ligeros | Juntas cerradas, material de relleno no movilizado | > 75°, Se observan las cañas de los taladros de contorno | Excavación no practicable. Señales visibles de la pala en el frente de formaciones blandas. |
| 2 Moderados | Pequeñas juntas rellenas son abiertas, bloques aislados y juntas ligeramente desplazados | > 65°, El frente es suave, se ven algunas secciones de los taladros. Pequeñas grietas. | Señales de penetración de los dientes, excavación difícil. |
| 3 Fuertes | Algunas juntas son abiertas y desplazadas | > 65°, Pequeños descostramientos desde el frente. Se aprecian grietas radiales | Excavación factible con esfuerzo < 1,5 m |
| 4 Severos | Frente fracturado, juntas abiertas. Algunos bloques movilizados | > 55°, Frente irregular, algunos descostramientos y grietas de sobreexcavación | Excavación factible > 3 m |
| 5 Extremos | Bloques movilizados y agrietados. La voladura produce material fino | 37° > 55°, Frente muy irregular fuertes descostramientos desde el frente. Gran sobreexcavación | Excavación bastante fácil > 3 m |

Fuente: Perforación y Voladura de Rocas, Mucho R., 2012.

d. Perfiles de excavación

Actualmente, existen en el mercado sistemas de levantamiento topográfico de los frentes de excavación basados en la tecnología de los rayos láser, que permiten obtener perfiles de los mismos en diferentes planos verticales.

Las numerosas medidas que se realizan se almacenan en una libreta electrónica para su procesamiento posterior en ordenador. Utilizando el software adecuado, puede determinarse de forma rápida y sencilla la posición óptima de los taladros, las dimensiones del burden y las cantidades de explosivo necesarias, así como el rendimiento de las voladuras precedentes.

e. Análisis del piso del banco

En el piso del banco, una vez evacuado el material de la voladura, se pueden presentar los siguientes casos:

- Rapiés delante de los taladros. Este aspecto se corrige mediante la disminución del burden, un aumento de la carga de fondo, incremento de la sobre - perforación, y finalmente el incremento de tiempos entre filas.
- Rapiés entre taladros. Se debe a un espaciamiento excesivo, por lo que se debe de reducir el mismo.
- Piso alto. Cuando es de forma sistemática, puede ser debida a la existencia de un plano de debilidad, o a la insuficiencia de la sobre-perforación y carga de fondo.

- Piso bajo. Cuando la plataforma del piso tiene una cota inferior a la proyectada, se deberá disminuir la carga de fondo y la sobre-perforación, y vigilar la forma de operación del equipo de carguío.

f. Presencia de bolones en la pila de material

Los bloques de tamaño superior al planificado constituyen un problema para la operación, por lo que obliga al minado a ejecutar minados selectivos, con los cuales decrece la productividad del equipo de carguío, generalmente se presentan en las siguientes zonas del material volado.

- En la parte alta o de coronación.
- En el piso, asociado generalmente con problemas de repiés o toes.
- En el interior de la voladura.
- En el frente de minado.

Las causas de la presencia de fragmentación gruesa están asociadas a problemas de control en los parámetros de perforación y voladura, y características estructurales y geomecánicas.

g. Vibraciones y onda aérea

Si el tiempo de retardo y la secuencia de encendido de una voladura no es la adecuada se producirá, entre otros, los siguientes resultados:

- Mala fragmentación y esponjamiento insuficiente en la pila de escombro.
- Proyecciones incontrolables de fragmentos de roca.
- Niveles de vibración elevados.

Mediante el análisis de las vibraciones registradas con un sismógrafo y posterior modificación de las variables indicadas, puede conseguirse un mayor aprovechamiento de la energía desarrollada por el explosivo, traduciéndose todo ello en una mejora de la granulometría del material y unas perturbaciones de menor intensidad y frecuencia de vibración más elevada, que son potencialmente menos peligrosas. En cuanto a la onda aérea, son diversos los mecanismos que actúan como fuentes de esta, pero uno de los más importantes es el escape prematuro de los gases a la atmósfera tras proyectarse el retacado. Por ello, los estudios con cámara de fotografía ultrarrápida pueden ayudar a definir

la longitud óptima de la columna de retacado y el tipo de material idóneo para su ejecución, a fin de conseguir un mayor confinamiento del explosivo sin afectar negativamente a la fragmentación de la zona donde se localiza dicho material inerte.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Metodología de la investigación

Para los logros satisfactorios de los objetivos propuestos, el presente trabajo de tesis se desarrolló de acuerdo con las normas de los métodos técnico – científicos y de investigación, por ser los más adecuados. Los métodos de investigación utilizados en el presente estudio fueron: la observación, método explicativo analítico y experimental.

➤ Observación

Durante el periodo de observación se lleva un registro de las diferentes voladuras realizadas con los detonadores pirotécnicos y electrónicos tales como propiedades geomecánicas del macizo rocoso, diseño de secuencia de disparo, resultados de fragmentación y monitoreo de vibraciones.

➤ **Explicativo analítico**

Durante esta fase se realizan simulaciones de voladuras tanto en el JK SIMBLAST como en el SHOT PLUSS.

➤ **Experimental**

Aplicamos los resultados óptimos para ambos casos en proyectos pre-designados que tenga coincidencia respecto a las variables geomecánicas.

3.2. Definición de Variables

3.2.1. Variables dependientes

- Conceptos de mecánica de fragmentación.
- Consideraciones técnicas de diseño.
- Diseño de perforación y voladura.
- Implementación de los detonadores electrónicos.
- Evaluación de resultados.

3.2.2. Variables independientes

- Caracterización geomecánica del macizo rocoso.
- Conceptualización de las propiedades de la roca.
- Densidad de fracturas del macizo rocoso.

3.2.3. Indicadores

- Comparación de los resultados (voladuras pirotécnicas y electrónicas).
- Reducción del costo global de minado.
- Evaluación de los resultados.

3.3. Diseño de voladura con detonadores pirotécnicos

Para efectos de comparar los resultados de las voladuras con detonadores pirotécnicos y electrónicos, motivo del presente trabajo de investigación, se seleccionaron los espacios muestrales de los niveles 2800 y 2785, el primero, en su totalidad fue ejecutado con detonadores pirotécnicos, y el segundo con detonadores electrónicos, es importante mencionar que en ambos niveles se tuvo similitud en las geometrías de los diseños de perforación, en cuanto a números de taladros, malla de perforación.

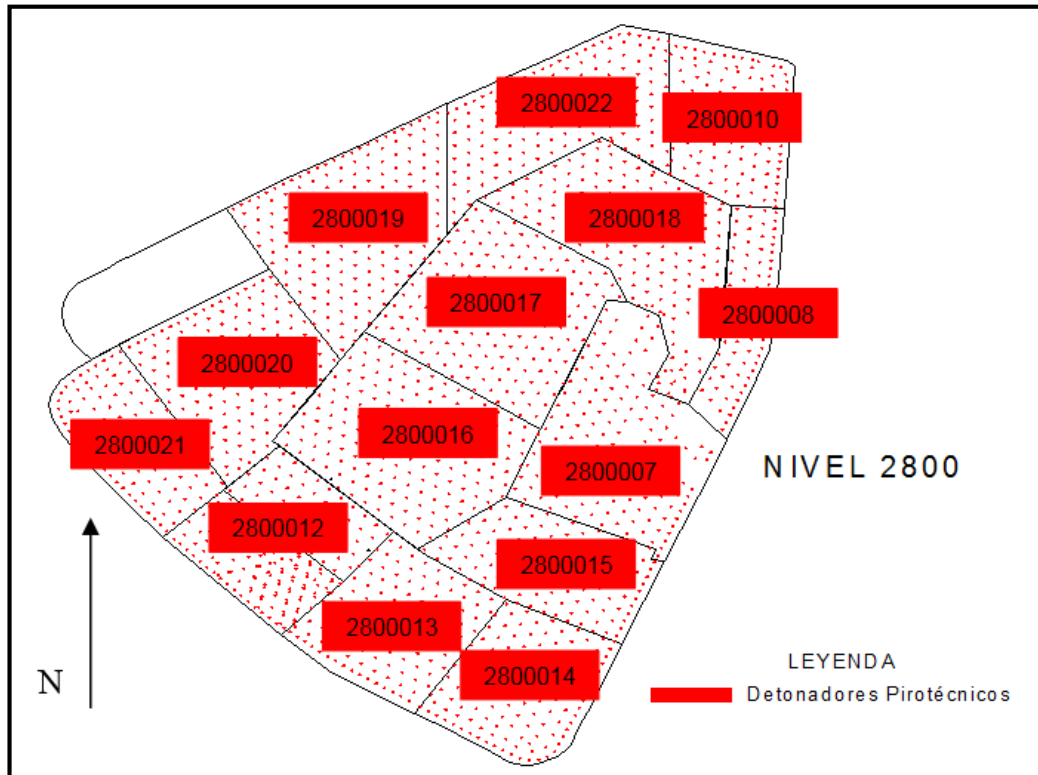


Figura 32. Proyectos del nivel 2800 con detonadores pirotécnicos
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

3.3.1. Diseño de perforación

Los parámetros de perforación fueron diseñados con los siguientes valores:

- Diámetro de perforación: 11,0 Pulg.
- Malla de perforación: Patrón triangular equilátero de 6,5 m.
- Altura de banco: 15 m.
- Sobre perforación: de 1,5 m. a 2,0 m.

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.

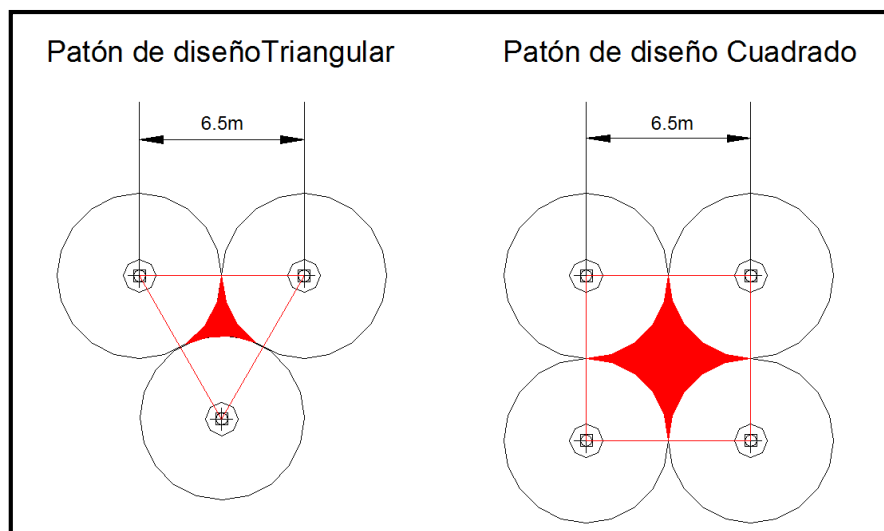


Figura 33. Patrones de diseño de perforación
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

3.3.2. Diseño de columnas explosivas

Las cargas explosivas fueron diseñadas en función a las características estructurales y geomecánicas del macizo rocoso. Del mismo modo, se ha tomado en consideración los parámetros de perforación y características del explosivo. Por la naturaleza del macizo rocoso ya descrito anteriormente, los diseños de cargas explosivas estuvieron en función de Heavy Anfo 55 y 64, este último por la presencia de agua. Se elaboró

el siguiente cuadro resumen, que muestra las características estructurales del macizo rocoso en estudio.

Tabla 2
Propiedades del macizo rocoso (Yeso Anhidrita)

| Características de la roca | | | Valores |
|---------------------------------|-------------|------|---------------|
| Densidad | ρ | g/cc | 2,732 |
| Resistencia a la compresión | R_c | MPa | 187,33 |
| Resistencia a la tensión | R_t | MPa | 11,37 |
| Módulo de elasticidad | E | GPa | 54,67 |
| Módulo de poisson | σ | GPa | 0,23 |
| Velocidad Sónica | V_p | m/s | 4 851 a 5 000 |
| Índice de masa rocosa | RMR | | 92,83 |
| Índice de resistencia geológica | GSI | | 87,83 |
| Tamaño de bloques | | | |
| Número defracturas | Masivo | | 2 a 5 en 4 m |
| Frecuencia de fracturamiento | 0,8 a 2,0 m | | |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

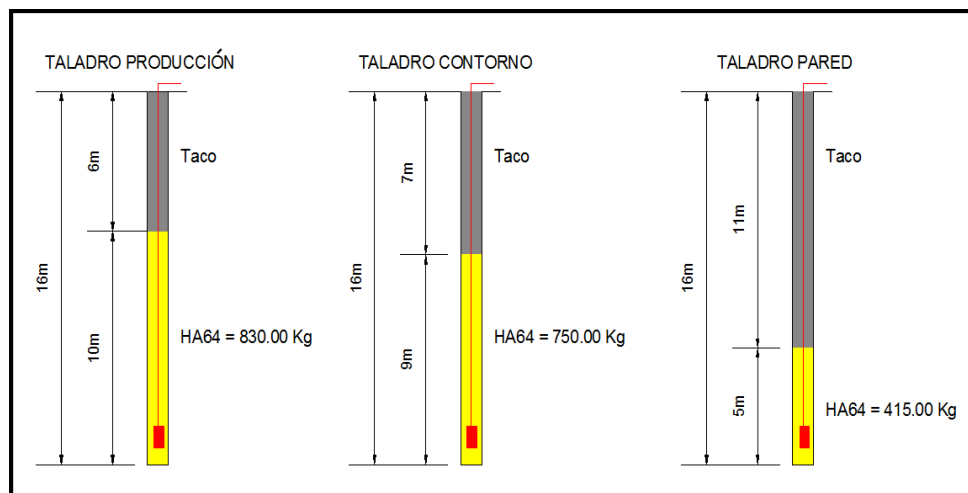


Figura 34. Diseño de cargas explosivas para taladros con agua
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

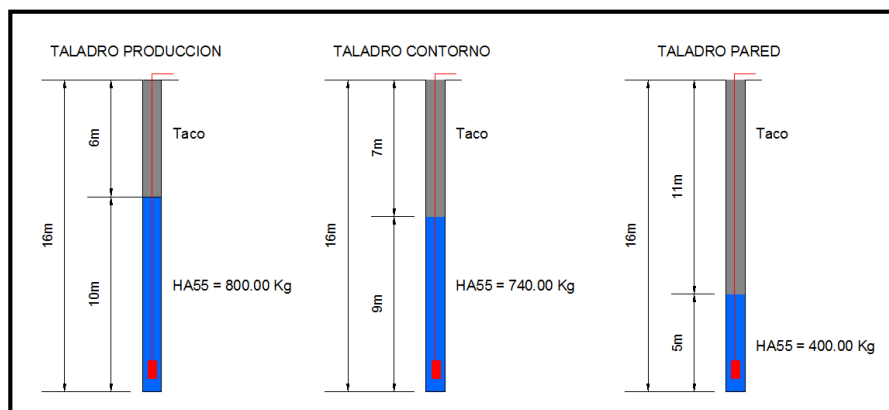


Figura 35. Diseño de cargas explosivas para taladros secos
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

3.3.3. Secuencia de detonación

Las secuencias de detonación que se emplean en la mina Toquepala tienen un diseño en “V” (cuña), o echelon. La configuración de los diseños de voladura determina las secuencias de las mismas. Los mejores resultados en cuanto a fragmentación se han obtenido con la secuencia en “V”, debido a que existe una mejor configuración de los tiempos de retardo, permitiendo un mejor acoplamiento y ordenamiento de los mismos, debido a que existe un eje que permite la distribución de ondas de compresión y tracción generadas por la detonación por ambos sentidos, aspecto que también se refleja mediante una adecuada mecánica de colisión de los fragmentos en movimiento.

3.3.4. Configuración de tiempos de retardo

No se debe olvidar que los tiempos de retardo, y el secuenciamiento de la voladura son los que en definitiva determinan el grado de apilamiento y, acomodo de material, la dirección de desplazamiento, el perfil del material, y el control de vibraciones. Para un mejor entendimiento de una secuencia de voladura se simula la detonación en el software 2D Bench, con la cual, se podrá observar de acuerdo con el diseño, la secuencia de salida de los taladros que conforman la voladura, con sus respectivos tiempos en orden de milisegundos.

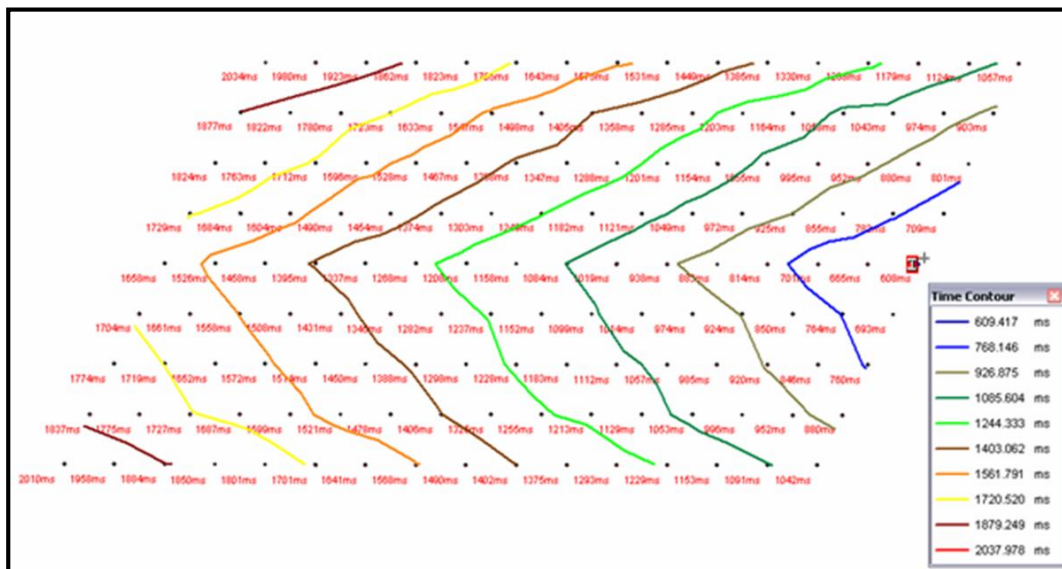


Figura 36. Configuración de retardos y secuencia de disparo
Fuente: Software 2D Bench

3.4. Diseño de voladuras con detonadores electrónicos

En el nivel 2785 es donde se han efectuado las primeras pruebas de voladura con detonadores electrónicos, las cuales son motivo de análisis para el presente trabajo de investigación. En la figura 37 se diferencian de acuerdo con la leyenda los proyectos de voladura.

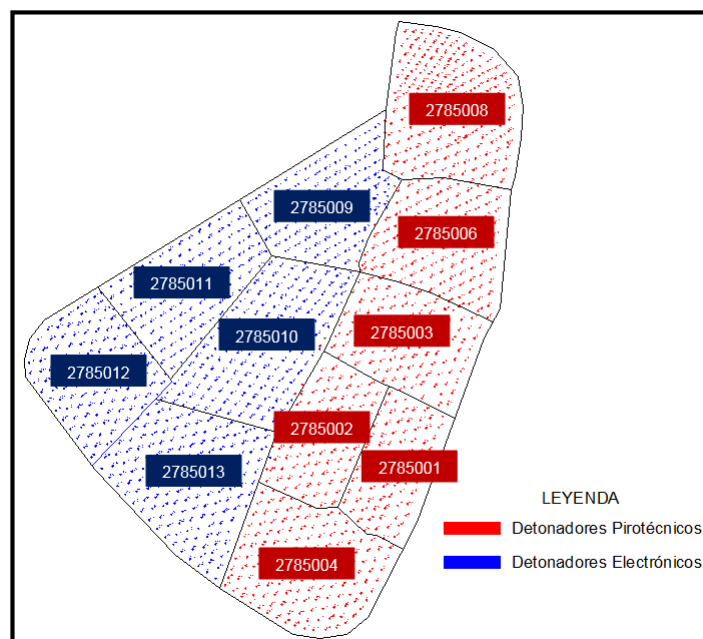


Figura 37. Proyectos de voladura nivel 2785
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

3.4.1. Diseño de perforación

Para efectos de pruebas de voladura con detonadores electrónicos, no se ha alterado en absoluto los parámetros de perforación, todos ellos se han mantenido con los mismos

dimensionamientos del sector de yeso anhidrita. Los parámetros de perforación son los siguientes:

- Diámetro de perforación: 11 pulg.
- Malla de perforación: Patrón triangular equilátero de 6,5 m.
- Altura de banco: 15 m.
- Sobre perforación: de 1,5 m.

3.4.2. Patrones de voladura

El departamento de perforación y voladura de la mina Toquepala usa el patrón de diseño de configuración de triángulo equilátero de dimensiones de 6,50 m, es transformado en la secuencia de voladura. (Ver figura 38).

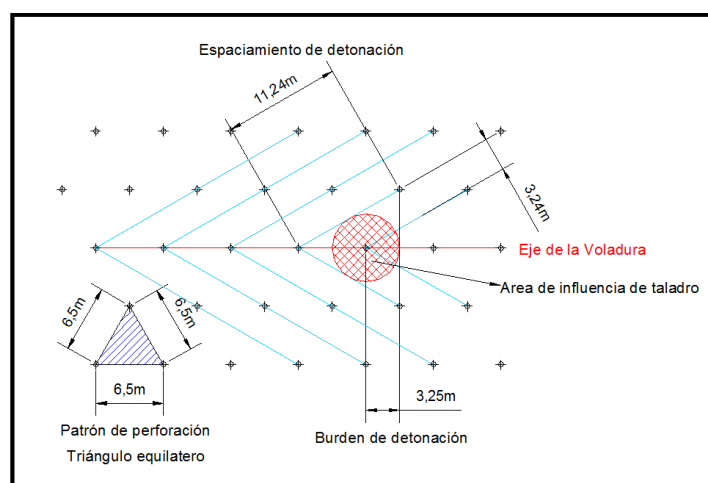


Figura 38. Diseño de patrones de voladura
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

La idea del diseño de arriba es trabajar con diagonales largas de ángulos de 60° , con los cuales se reducirá el burden de diseño de 5,6 m a 3,25 m, y se ampliará el espaciamiento de diseño de 6,5 m a 11,24 m, estas dos condiciones reflejarán una menor distancia límite de trayectoria de las ondas de detonación de explosivo, con lo cual la roca tendrá mayor predisposición a ser fragmentada. Como punto adicional, manifestamos que las configuraciones de diseños de voladura en “V” o cuña son los que mejores resultados proporcionan a la voladura en todos los puntos de evaluación.

3.4.3. Diseño de columnas explosivas

En las primeras voladuras con detonadores electrónicos, los diseños de cargas explosivas fueron las mismas que se emplearon en el Nivel 2800 (Detonadores Pirotécnicos). Estas cargas fueron modificadas en medida a los resultados de fragmentación que se obtuvieron, los diseños de cargas explosivas para las primeras voladuras con detonadores electrónicos fueron:

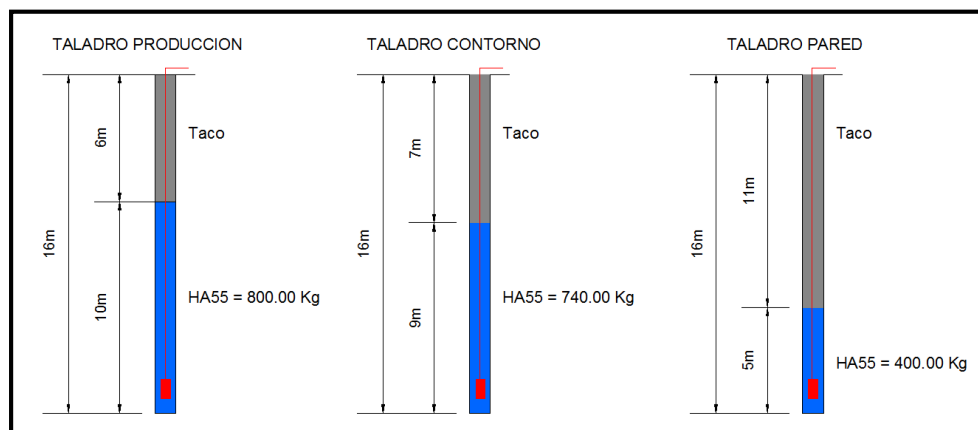


Figura 39. Diseño de carga explosiva para taladros secos
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

3.4.4. Secuencia de voladura

Sabiendo que la secuencia de detonación en “V” es la que ha brindado mejores resultados en cuanto a fragmentación, se ha optado por esta secuencia en las voladuras con detonadores electrónicos.

Para un mejor entendimiento se mostrará el ejemplo del proyecto 2785 011. Tanto las secuencias de voladura como la configuración de tiempos fueron simulados en el Software Shot Plus i.



Figura 40. Proyecto de voladura 2785 011
Fuente: Southern Perú, mina Toquepala, 2012.

La conexión de los detonadores electrónicos se efectuó a través del siguiente esquema de diseño, también se muestra las líneas de isotiempos. (Ver figura 41).

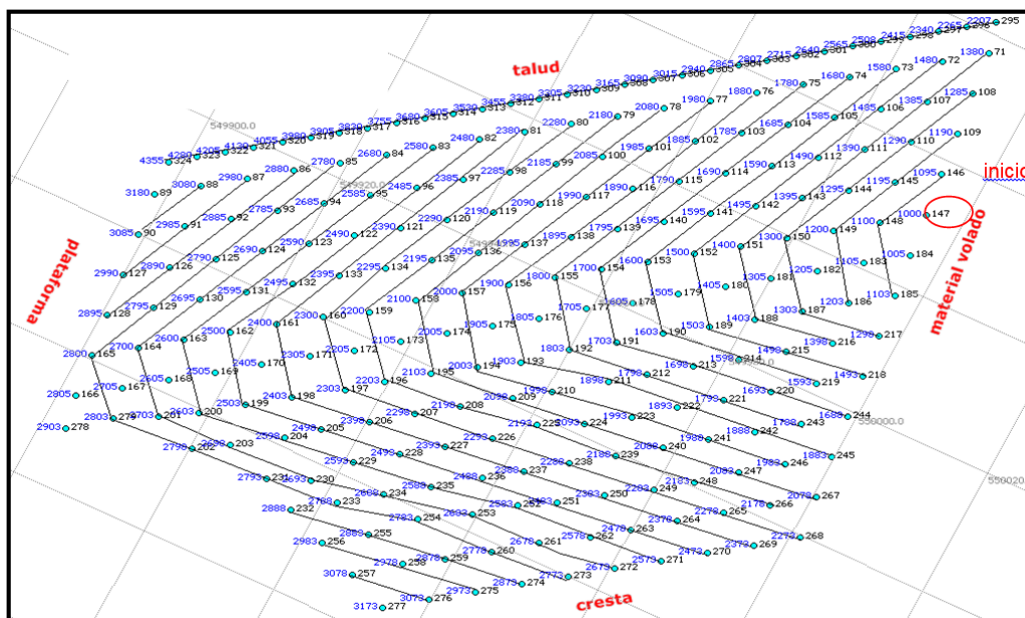


Figura 41. Secuencia de disparo proyecto 2785 011
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, Shot Plus i, mina Toquepala, 2012.

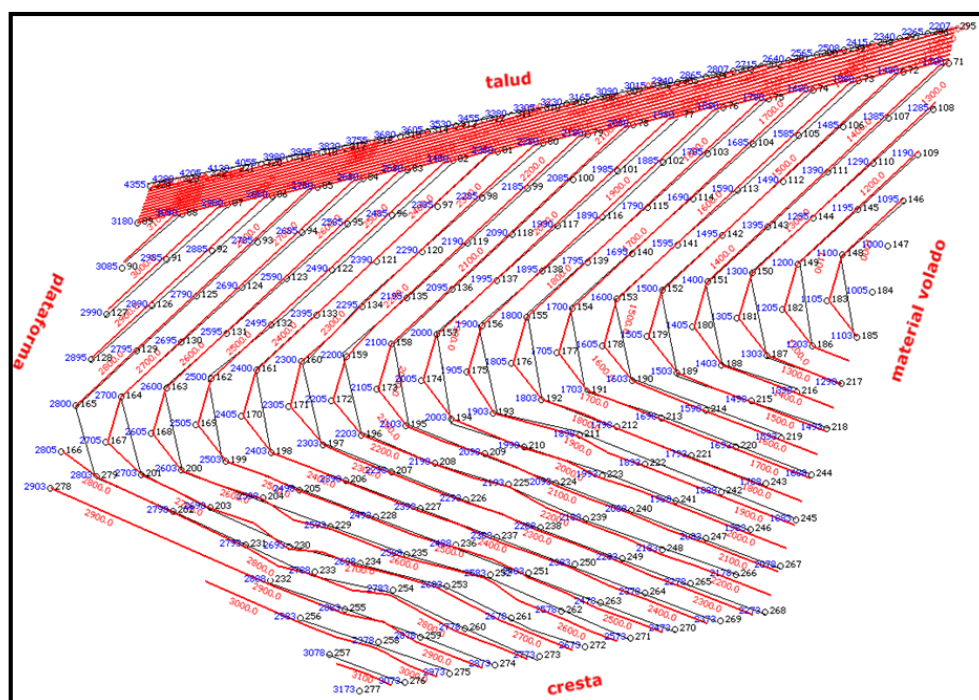


Figura 42. Líneas de isotiempo del proyecto 2785 011
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, Shot Plus i, mina Toquepala, 2012.

3.4.5. Diseño de tiempos

Tomando como referencia las ecuaciones matemáticas de Lagrange, en las cuales se puede determinar los tiempos entre taladros y los tiempos entre filas, y relacionando estos resultados con la velocidad de onda P, es que se puede sintetizar los parámetros de diseño, mediante la elaboración de una hoja de cálculo.

Tabla 3
Parámetros de voladura para Yeso Anhidrita

| Tipo de Roca | Velocidad Onda P (Vp) m/s | Espaciamiento Detonación m | Tiempo Taladros Ms | Burden Detonación m | Tiempo Filas Ms |
|--------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Brecha con Yeso Anhidrita | 4 851,00 | 11,24 | 5,0 | 3,25 | 100 |
| Brecha turmalina con Yeso Anhidrita | 4 863,00 | 11,24 | 5,0 | 3,25 | 100 |
| Diorita con Yeso Anhidrita | 4 911,00 | 11,24 | 5,0 | 3,25 | 100 |
| Diorita con brecha y Yeso YAnhidrita | 4 830,00 | 11,24 | 5,0 | 3,25 | 100 |
| Dacita con Yeso Anhidrita | 4 868,00 | 11,24 | 5,0 | 3,25 | 100 |
| Pebble brecha con Yeso Anhidrita | 4 901,00 | 11,24 | 5,0 | 3,25 | 100 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

La configuración de tiempos son los que determinan el grado de apilamiento y, acomodo de material, la dirección de desplazamiento, el perfil del material, y el control de vibraciones. Para un mejor entendimiento se mostrará los tiempos del proyecto de voladura 2785 011 (ver figura 43, figura 44 y figura 45).

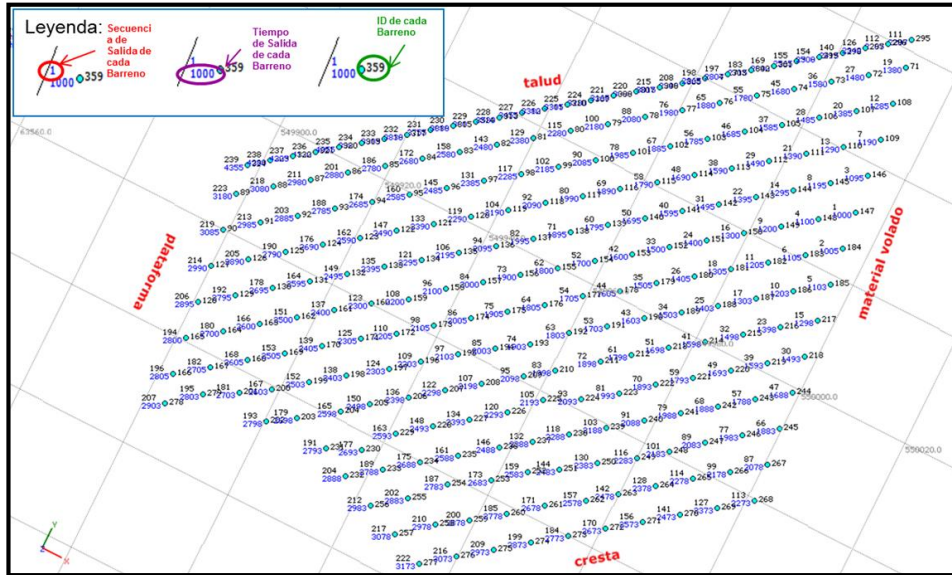


Figura 43. Configuración de tiempos proyecto de voladura 2785 011
Fuente: Departamento de perforación y voladura, *Shot Plus i*, mina Toquepala, 2012.

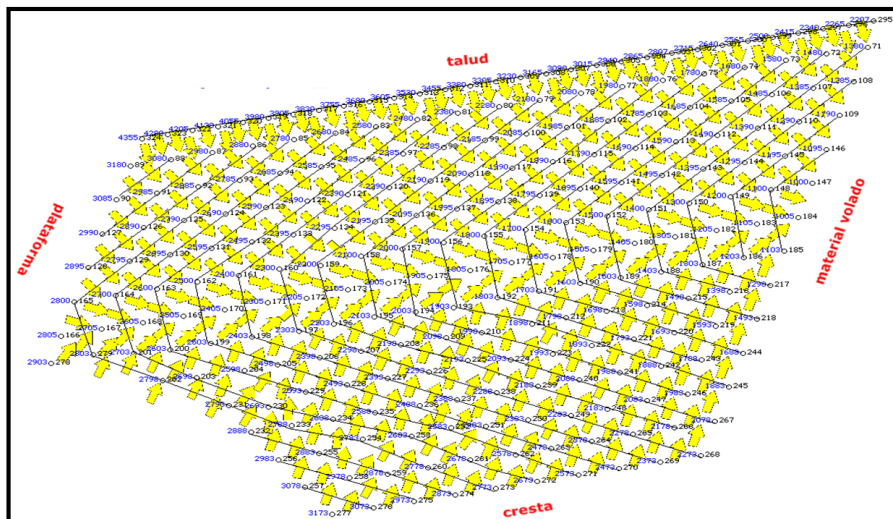


Figura 44. Apilamiento de material
Fuente: Departamento de perforación y voladura, *Shot Plus i*, mina Toquepala, 2012.



Figura 45. Imagen post voladura proyecto 2785 011
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

3.4.6. Traslape de tiempos

En las voladuras con el sistema de detonadores electrónicos no existe traslape, ni montaje de cargas explosivas, debido a que el porcentaje de dispersión de los tiempos de retardo es cero, por lo tanto, cada carga explosiva, detona en un intervalo de tiempo propio al diseño establecido, estas ventajas, repercuten en los resultados de las voladuras.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados con detonadores pirotécnicos

El nivel 2800 del fondo de mina, en su totalidad, fue disparado con detonadores pirotécnicos, cuyos resultados en cuanto a fragmentación, velocidad de excavación de carguío de palas y costos de voladuras han sido tomados como línea base para la comparación de los resultados obtenidos con la voladura de detonadores electrónicos en el nivel 2785, asimismo, en la comparación de resultados, se ha recopilado la información en cuanto a:

- Estadísticas del sistema Dispatch,
- Información geotécnica y geológica,
- Datos de ingeniería y registros de perforación y disparos

4.1.1. Estadística de fragmentación

En los análisis de fragmentación se tomó como referencia el parámetro D90, que es el mayor indicador confiable del software Wip Frag.

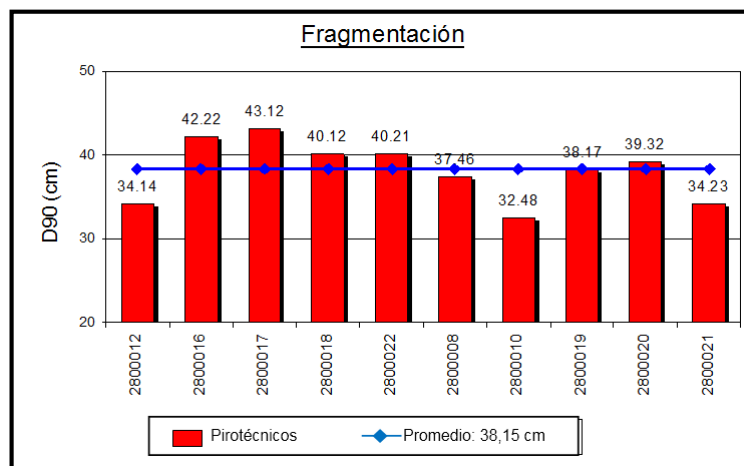


Figura 46. Resultados de fragmentación - Nivel 2800
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.1.2. Porcentaje de fragmentación gruesa

Los resultados de bolonería están basados en los análisis granulométricos.

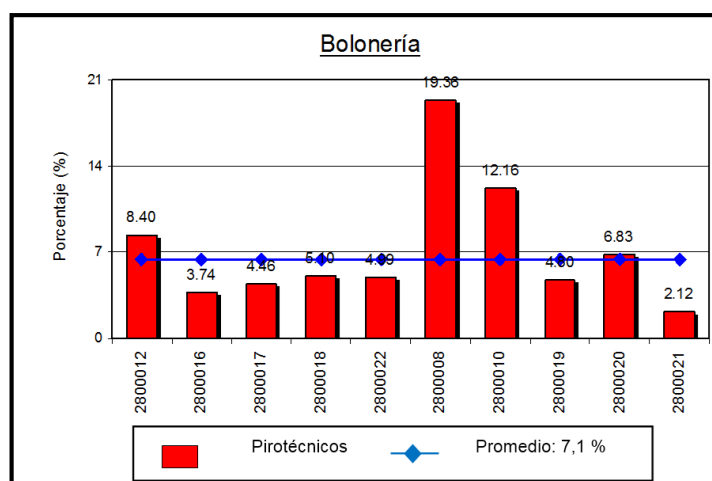


Figura 47. Resultados de bolonería - Nivel 2800
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.1.3. Ciclo de minado

Se realizó un resumen detallado de los ciclos de minado, empleando las estadísticas del sistema Dispatch.

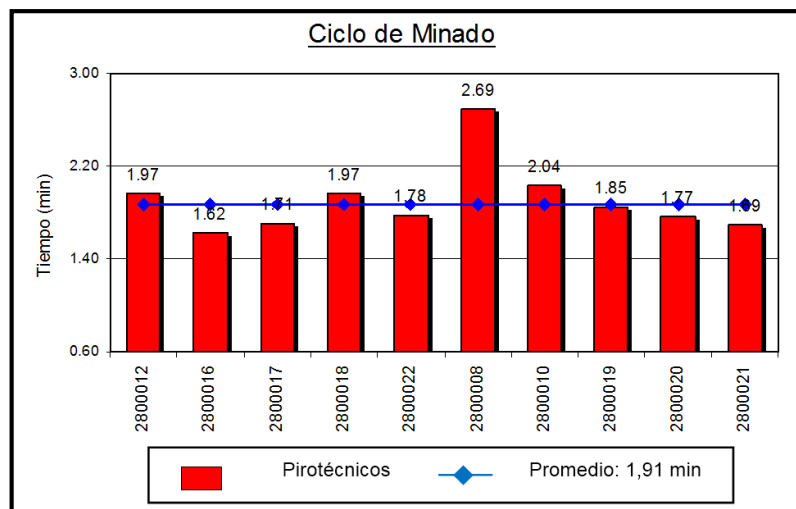


Figura 48. Ciclo de minado - Nivel 2800.

Fuente: Departamento de Perforación y Voladura, Mina Toquepala, 2012.

4.1.4. Velocidad de minado

Se realizó un resumen detallado de las velocidades de excavación empleando las estadísticas del Sistema Dispatch.

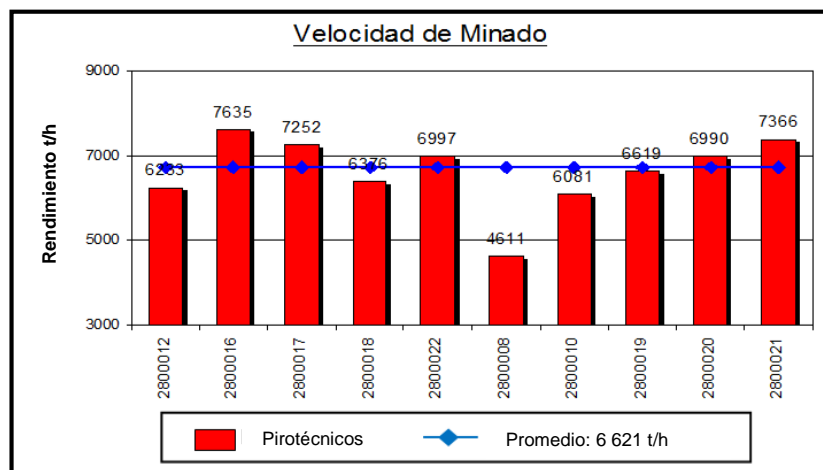


Figura 49. Velocidad de minado - Nivel 2800
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.1.5. Factor de carga explosiva

Se estructuró la siguiente gráfica por proyectos de voladura en el Nivel 2800.

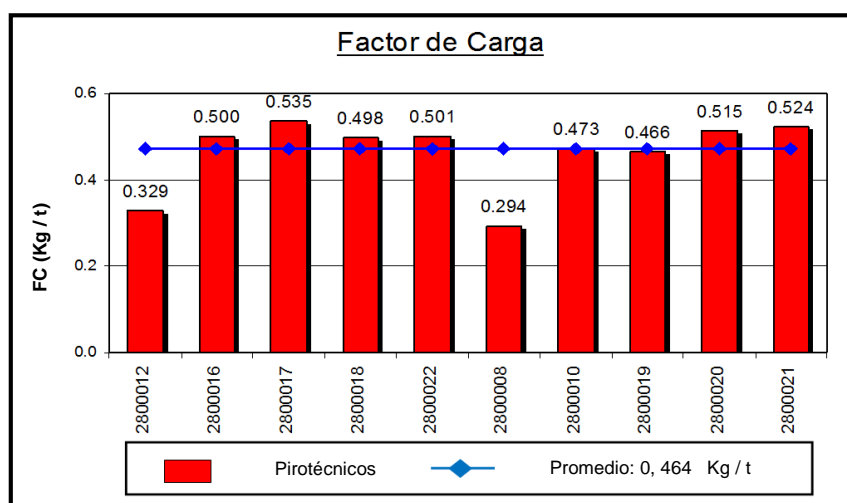


Figura 50. Factor de carga - Nivel 2800
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.1.6. Nivel de vibraciones de la voladura

Se realizó un resumen detallado de las velocidades pico partículas empleando las estadísticas obtenidas.

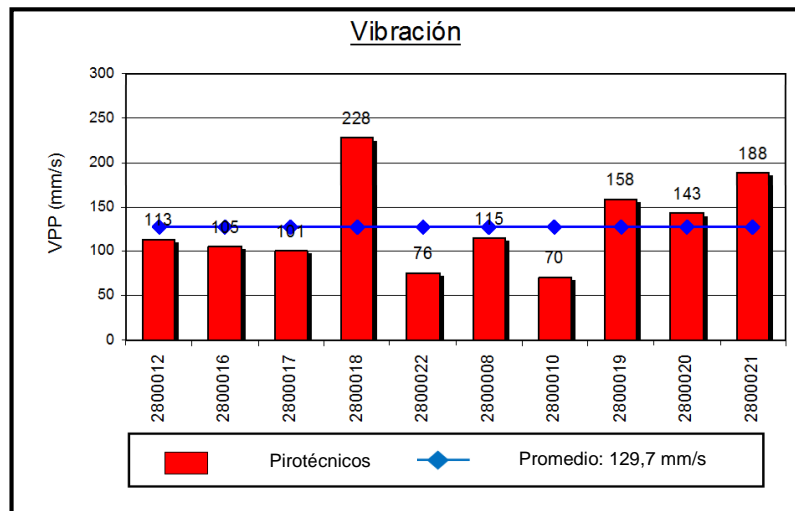


Figura 51. Niveles de vibraciones - Nivel 2800

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2. Resultados con detonadores electrónicos

La evaluación y análisis de los resultados de las voladuras con detonadores electrónicos se efectuó bajo los mismos conceptos de evaluación que se realizó con los detonadores pirotécnicos. El espacio muestral de prueba y evaluación de resultados son los proyectos de voladura del nivel 2785; el análisis de resultados se basa en los siguientes aspectos:

- Estadísticas del Sistema Dispatch,
- Información geotécnica y geológica,
- Datos de ingeniería y registros de perforación y disparos.

4.2.1. Estadística de fragmentación

Al igual que el anterior, se tomó como referencia el parámetro D90, que es el mayor indicador confiable del software Wip Frag.

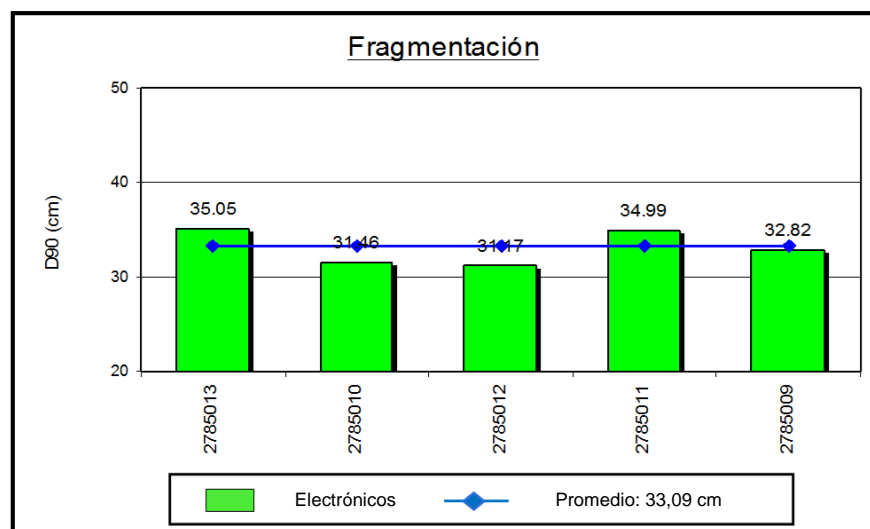


Figura 52. Resultados de fragmentación - Nivel 2785
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2.2. Porcentaje de fragmentación gruesa

Se ha efectuado una gráfica resumen de las voladuras electrónicas por proyecto de voladura:

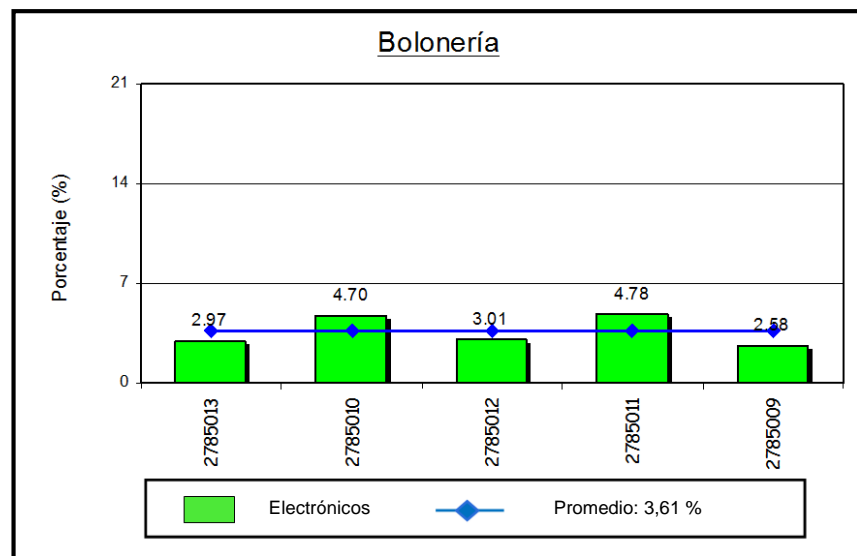


Figura 53. Resultados de bolonería - Nivel 2785

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2.3. Ciclo de minado

Se ha realizado un resumen detallado empleando las estadísticas del sistema Dispatch, estos resultados están dados por proyecto de voladura.

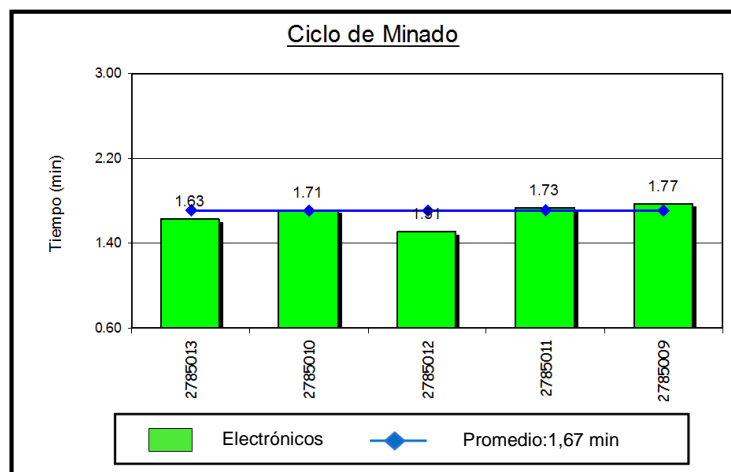


Figura 54. Ciclo de minado - Nivel 2785
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2.4. Velocidad de minado

Se ha realizado un resumen detallado de las velocidades de excavación empleando las estadísticas del sistema Dispatch.

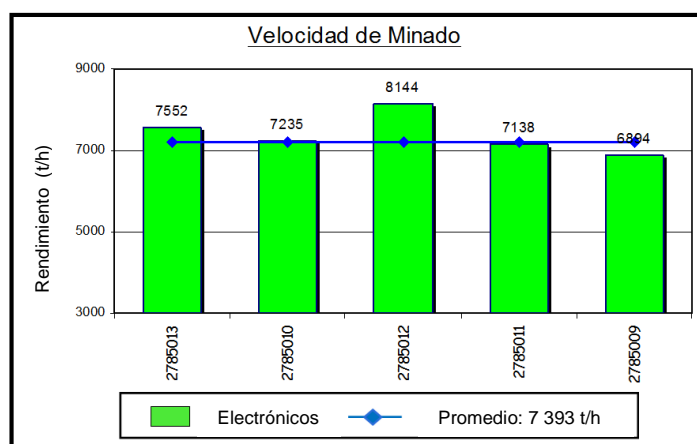


Figura 55. Velocidad de minado - Nivel 2785
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2.5. Factor de carga explosiva

Los resultados de factor de carga de los detonadores electrónicos fueron los siguientes:

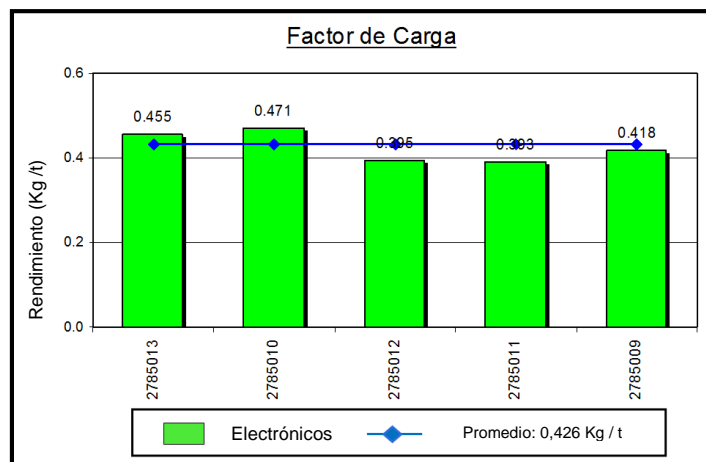


Figura 56. Factor de carga - Nivel 2785
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2.6. Niveles de vibraciones de la voladura

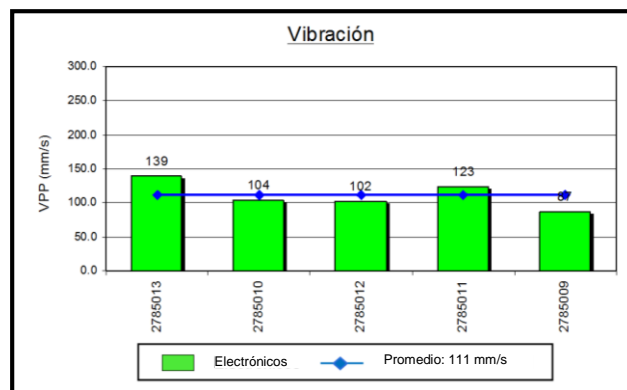


Figura 57. Niveles de vibraciones Nv 2785
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.2.7. Evaluación visual de las voladuras

Las fotos que se presentan en la figura 58, obtenidas de los resultados de las voladuras con detonadores electrónicos, nos brindan una evaluación visual de los resultados.

El análisis cualitativo visual es el sistema más utilizado y en la mayoría de los casos el único que se aplica. La pila del material es el reflejo de los resultados de la voladura, y es observada inmediatamente después de efectuarse el disparo, este método de evaluación tiene un seguimiento continuo de acuerdo con el avance del minado, y también es respaldado mediante los análisis de fragmentación del Wip frag.

Véase la figura 58 donde se muestra los resultados de las voladuras, allí se aprecia los resultados saltantes de fragmentación.

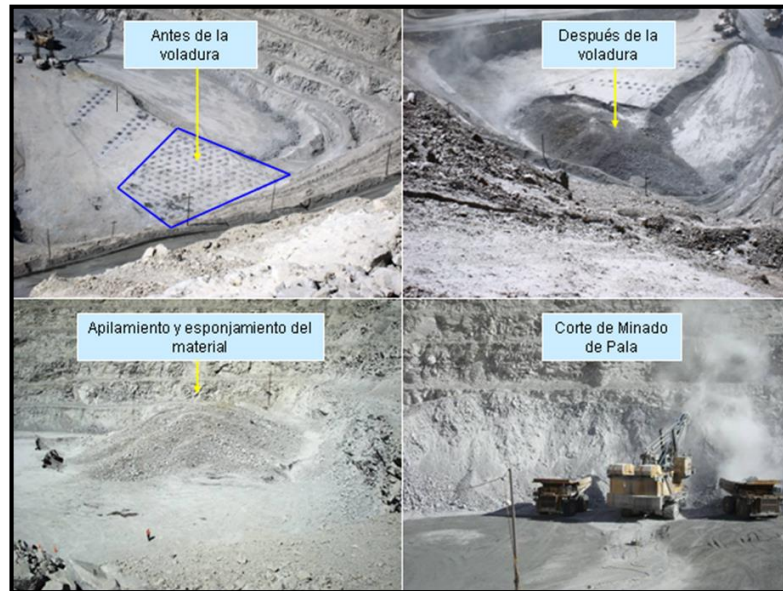


Figura 58. Proyecto de voladura 2785 013
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3. Comparación de resultados entre detonadores pirotécnicos y electrónicos

4.3.1. Niveles de minado 2800 y 2875

Dadas las necesidades de la mina Toquepala de lograr mayor eficiencia en sus operaciones unitarias para generar un menor costo global en sus procesos, y de esta manera ser más competitivos en el mercado minero, se vio la necesidad de evaluar y utilizar los detonadores electrónicos en sus operaciones de minado, orientado a voladuras de control y fragmentación en producción, ambos ítems enmarcados en el dominio estructural de yeso anhidrita.

Como ya se mencionó y apreció de forma detallada, se efectuó un levantamiento minucioso de las datas de los resultados obtenidos con los detonadores pirotécnicos y electrónicos con la finalidad de determinar los estándares en cada parte del proceso, lo cual nos ha servido para efectos de comparación en los diferentes parámetros trazados y definidos como: fragmentación, porcentaje de botonería, vibraciones, rendimientos pala y volquete y otros.

4.3.2. Diseño de columnas explosivas

El explosivo empleado en las columnas explosivas en las pruebas con detonadores electrónicos fue el mismo que se empleó en los detonadores pirotécnicos, con la diferencia que se redujo el factor de carga, de 0,46 kg/t a 0,426 kg/t, es decir de 800 kg en los taladros de producción se bajó a 740 kg; el objetivo fue llegar a un factor de carga de 0,39 kg/t.

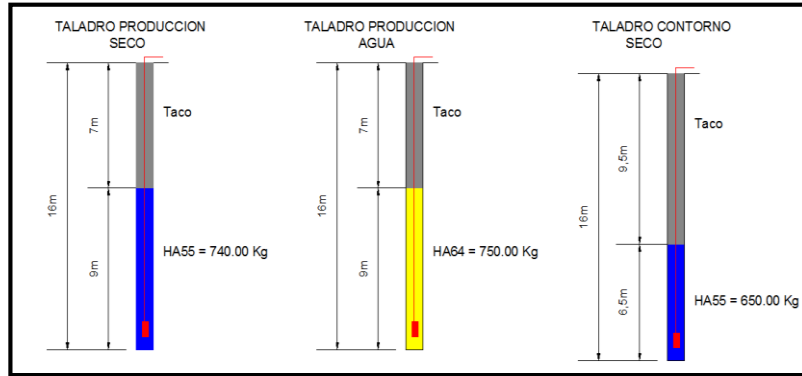


Figura 59. Diseño de carga explosiva
Fuente: Departamento de Perforación y Voladura, Mina Toquepala, 2012.

4.3.3. Estadísticas de fragmentación

Se basan en los resultados obtenidos anteriormente.

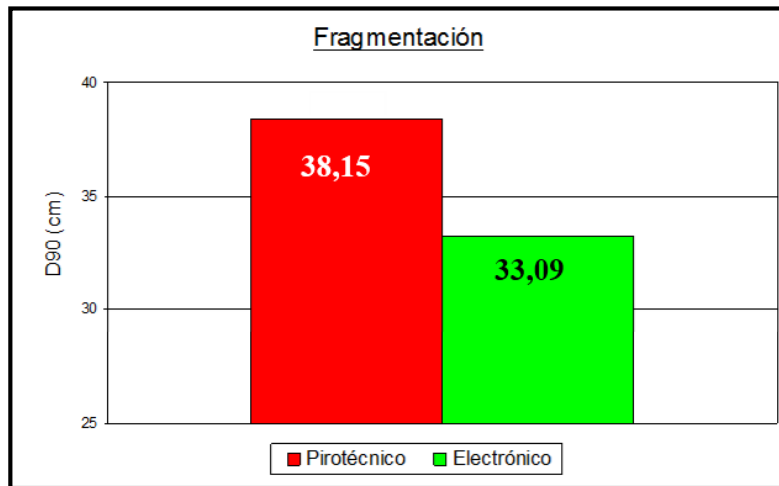


Figura 60. Fragmentación (Pirotécnico vs Electrónico)
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3.4. Porcentaje de fragmentación gruesa

Se fundamentan en los siguientes resultados.

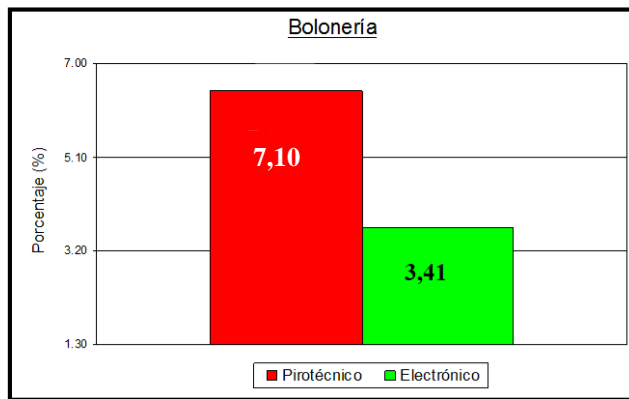


Figura 61. Bolonería (pirotécnico vs electrónico)
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3.5. Ciclo de minado

Los resultados en cuanto a ciclo de minado fueron:

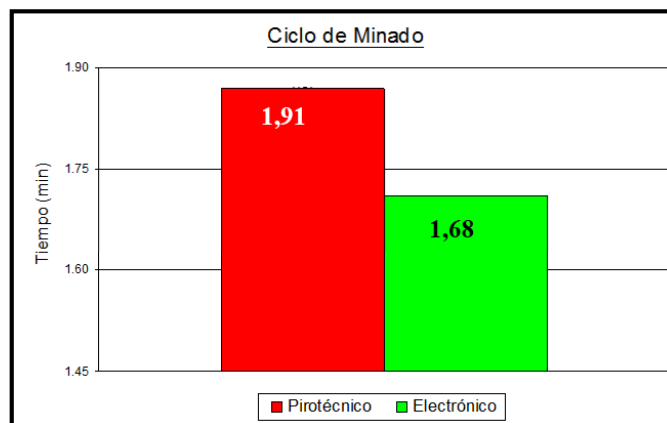


Figura 62. Ciclo de minado (pirotécnico vs electrónico)
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3.6. Velocidad de minado

Los resultados en cuanto a velocidad de minado fueron:

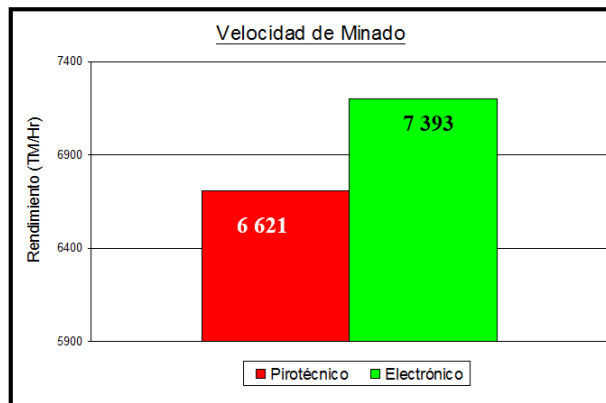


Figura 63. Velocidad de minado (pirotécnico vs electrónico)
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3.7. Factor de carga explosiva

La comparación de los resultados de factor de carga, con ambos detonadores, fue el siguiente:

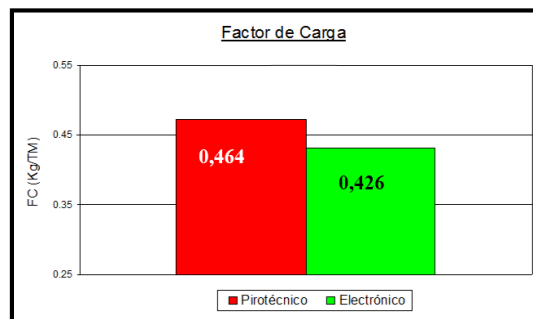


Figura 64. Factor de carga (pirotécnico vs electrónico)
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3.8. Nivel de vibraciones de la voladura

Los resultados promedios de vibración con ambos detonadores se muestran en la siguiente gráfica:

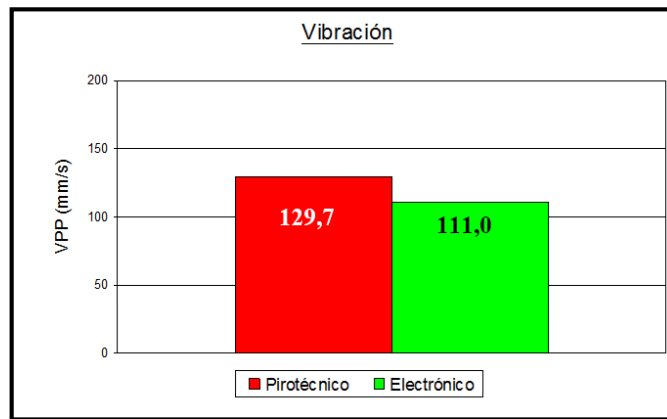


Figura 65. Vibraciones (pirotécnico vs electrónico)
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.3.9. Interpretación y análisis de resultados

De acuerdo con las gráficas mostradas, se efectúa el siguiente análisis de todos los parámetros evaluados:

a. Porcentaje de fragmentación gruesa

En las voladuras con detonadores pirotécnicos se obtuvo 7,10 %, frente a 3,41 % que se obtuvo en las voladuras con

detonadores electrónicos, es decir, decreció el porcentaje de material grueso.

b. Ciclo de minado

Las operaciones de carguío pala-volquete en las voladuras con detonadores pirotécnicos fueron de 1,91 minutos, en las voladuras con detonadores electrónicos fueron de 1,68 minutos, también decrece el tiempo de carguío, es decir, la operación fue más productiva.

c. Velocidad de minado

La velocidad efectiva de movimiento de material en las voladuras con detonadores pirotécnicos fue de 6 621 t/h, mientras que la velocidad de minado con los detonadores electrónicos fue de 7 393 t/h, es decir, se puede minar 772 t/h de más, asimismo, en un día se puede incrementar la producción en 17 756 t, y al año la producción se incrementa en más de 6 millones de Toneladas Métricas en una sola Pala.

d. Factor de carga explosiva

Con los detonadores pirotécnicos, se tuvo un factor de carga de 0,464 kg/t, mientras que, en las voladuras con detonadores electrónicos, se ha obtenido un factor de carga de 0,426, la tendencia fue llegar a un factor de carga de 0,39 kg/t sin alterar los resultados de la fragmentación, por el contrario, estos mejorarlos; como análisis en este ítem, se consumió menos explosivo por tonelada rota.

e. Vibraciones

El promedio de las vibraciones obtenidas con los detonadores pirotécnicos fue de 129,7 mm/s, en las voladuras con detonadores electrónicos, este índice se bajó a 111 mm/s, lo cual implica menos daño al entorno del macizo rocoso.

4.4. Evaluación económica de las voladuras con detonadores electrónicos

4.4.1. Costos Unitarios de los insumos de voladura

La evaluación económica de los resultados comparativos de ambos detonadores fue mediante la comparación de los costos unitarios obtenidos, relacionados con la productividad

de las operaciones que conforman el ciclo de minado, para ello se empieza mostrando el siguiente cuadro donde se puede apreciar los precios unitarios de los insumos de voladura.

Tabla 4
Precios unitarios de los insumos de voladura

| Descripción del ítem | Unidad | Costo |
|---|---------------|--------------|
| Explosivo | | |
| Heavy ANFO 55 (HA55) | USD/m | 48,37 |
| Heavy ANFO 64 (HA64) | USD/m | 49,02 |
| Accesorios de voladura (Sistema Electrónico) | | |
| Detonador Electrónico | USD/Unid | 31,18 |
| Cable de conexión (10000m = 50 rollos) | USD/m | 0,22 |
| Cable de disparo (1000m = 2 carretes) | USD/m | 0,22 |
| Accesorios de voladura (Sistema Pirotécnico) | | |
| Detonador pirotécnico (Nonel - Retardo de fondo) | USD/Unid | 2,50 |
| Retardo de superficie | USD/Unid | 2,10 |
| Booster 1 lb | USD/Unid | 3,50 |
| Cordon detonante 5G - 1400 m | USD/Caja | 136,00 |
| Mecha de seguridad | USD/m | 0,11 |
| Fulminante número 06 | USD/Unid | 0,21 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.4.2. Resumen de los resultados de voladura

Con la finalidad de cuantificar los resultados de las voladuras, tanto con detonadores pirotécnicos como electrónicos, se ha estructurado los dos siguientes cuadros, donde se puede apreciar los resultados y comparaciones de ambos detonadores, en términos de factor de carga, vibración, fragmentación, bolonería, ciclo de minado y rendimiento de la pala.

Tabla 5
Resumen de resultados con detonadores pirotécnicos

| Proyecto Voladura (Nro) | Factor Carga (Kg/t) | Número de Taladros (Unid) | Vibración VPP (mm/s) | Fragmentación D90 (cm) | Porcentaje Bolonería (%) | Ciclo Minado (min) | Minado Efectiva (t/h) |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------------|
| 2800012 | 0,33 | 148,00 | 113,00 | 34,14 | 8,40 | 1,97 | 6 233 |
| 2800016 | 0,50 | 165,00 | 105,00 | 42,22 | 3,74 | 1,62 | 7 635 |
| 2800017 | 0,53 | 166,00 | 101,00 | 43,12 | 4,46 | 1,71 | 7 252 |
| 2800018 | 0,50 | 136,00 | 228,00 | 40,12 | 5,10 | 1,97 | 6 376 |
| 2800022 | 0,50 | 139,00 | 76,00 | 40,21 | 4,99 | 1,78 | 6 997 |
| 2800008 | 0,29 | 46,00 | 115,00 | 37,46 | 19,36 | 2,69 | 4 611 |
| 2800010 | 0,47 | 113,00 | 70,00 | 32,48 | 12,16 | 2,04 | 6 081 |
| 2800019 | 0,47 | 155,00 | 158,00 | 38,17 | 4,80 | 1,85 | 6 619 |
| 2800020 | 0,52 | 145,00 | 143,00 | 39,32 | 6,83 | 1,77 | 6 990 |
| 2800021 | 0,52 | 111,00 | 188,00 | 34,23 | 2,12 | 1,69 | 7 366 |
| Promedios Ponderados | 0,46 | 132,40 | 129,70 | 38,15 | 7,10 | 1,91 | 6 621 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Tabla 6
Resumen de resultados con detonadores electrónicos

| Proyecto voladura (Nro) | Factor carga (kg/t) | Número de taladros (Unid) | Vibración VPP (mm/s) | Fragmentación D90 (cm) | Porcentaje bolonería (%) | Ciclo minado (min) |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------|--------------------|
| 2785013 | 0,46 | 156,00 | 139,00 | 35,05 | 2,97 | 1,67 |
| 2785010 | 0,47 | 146,00 | 104,00 | 31,46 | 4,70 | 1,71 |
| 2785012 | 0,39 | 118,00 | 102,00 | 31,17 | 3,01 | 1,51 |
| 2785011 | 0,39 | 117,00 | 123,00 | 34,99 | 3,78 | 1,73 |
| 2785009 | 0,42 | 108,00 | 87,00 | 32,82 | 2,58 | 1,77 |
| Promedios ponderados | 0,43 | 129,00 | 111,00 | 33,09 | 3,41 | 1,68 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.4.3. Consumo de los insumos de voladura

Partiendo de la base de los cuadros anteriores, la siguiente etapa viene a ser el detalle de los consumos diseñados y registrados en los resultados de los proyectos de voladura,

tanto en las efectuadas con detonadores pirotécnicos y electrónicos, estos datos servirán para más adelante determinar los costos generales por proyecto de voladura. Véase las siguientes dos tablas.

Tabla 7
Consumo de insumos con detonadores pirotécnicos

| Proyecto voladura (Nro) | Petróleo (kg) | Emulsión matriz (kg) | Nitrato amonio (kg) | Detonador pirotécnico (Unid) | Retardo superficie (Unid) | Boosters 1 libra (Unid) | Cordón detonante (m) | Mecha seguridad (m) | Fulminante Nro 06 (Unid) |
|----------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 2800012 | 1 766,14 | 33 230,40 | 27 669,46 | 296,00 | 148,00 | 148,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800016 | 3 940,13 | 76 546,10 | 61 728,77 | 330,00 | 165,00 | 165,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800017 | 3 689,54 | 79 133,70 | 57 802,76 | 332,00 | 166,00 | 166,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800018 | 2 753,84 | 65 416,70 | 43 143,46 | 272,00 | 136,00 | 136,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800022 | 2 663,69 | 63 104,10 | 41 731,21 | 278,00 | 139,00 | 139,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800008 | 647,18 | 15 384,70 | 10 139,12 | 92,00 | 46,00 | 46,00 | 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800010 | 1 954,10 | 43 046,70 | 30 614,20 | 226,00 | 113,00 | 113,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800019 | 3 497,18 | 61 126,60 | 54 789,22 | 310,00 | 155,00 | 155,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800020 | 3 101,68 | 52 579,30 | 48 593,02 | 290,00 | 145,00 | 145,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| 2800021 | 2 032,59 | 38 924,50 | 31 843,91 | 222,00 | 111,00 | 111,00 | 1 400,00 | 3,00 | 2,00 |
| Totales | 26 046,07 | 528 492,80 | 408 055,13 | 2 648,00 | 1 324,00 | 1 324,00 | 13 000,00 | 30,00 | 20,00 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Tabla 8
Consumo de insumos con detonadores electrónicos

| Proyecto voladura (Nro) | Petróleo (Kg) | Emulsión matriz (Kg) | Nitrato amonio (Kg) | Detonador electrónico (Unid) | Detonador pirotécnico (Unid) | Cable eléctrico (m) | Boosters 1 libra (Unid) |
|----------------------------|------------------|-------------------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------------------|
| 2785013 | 3 418,57 | 70 060,80 | 53 557,63 | 156,00 | 156,00 | 2 465,00 | 156,00 |
| 2785010 | 3 353,55 | 69 170,50 | 52 538,95 | 146,00 | 146,00 | 2 030,00 | 146,00 |
| 2785012 | 2 219,77 | 47 666,80 | 34 776,43 | 118,00 | 118,00 | 1 450,00 | 118,00 |
| 2785011 | 2 141,74 | 45 846,30 | 33 553,96 | 117,00 | 117,00 | 675,00 | 117,00 |
| 2785009 | 2 110,75 | 44 792,80 | 33 068,45 | 108,00 | 108,00 | 1 450,00 | 108,00 |
| Totales | 13 244,39 | 277 537,20 | 207 495,41 | 645,00 | 645,00 | 8 070,00 | 645,00 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.4.4. Análisis de costos de las voladuras

Teniendo presente los cuadros anteriores, donde se mencionan los precios unitarios de los insumos de voladura, los resultados de rendimientos de minado, y los consumos registrados por proyecto de voladura en ambos sistemas de iniciación, se determina los costos totales, para luego relacionarlos con el tonelaje disparado, y así obtener el costo unitario por tonelada, expresado en USD/t por proyecto de voladura, ya sea este el caso del pirotécnico y electrónico.

Tabla 9
Costos por voladura con detonadores pirotécnicos

| Proyecto voladura (Nro) | Total explosivo (USD) | Detonador pirotécnico (USD) | Retardo superficie (USD) | Boosters 1 libra (USD) | Cordon detonante (USD) | Mecha seguridad (USD) | Fulminante Nro 06 (USD) | Costo total voladura (USD) | Tonelaje disparado (t) | Costo unitario (USD/t) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 2800012 | 38 012,69 | 740,00 | 310,80 | 518,00 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 39 718,24 | 190 681,00 | 0,21 |
| 2800016 | 86 308,45 | 825,00 | 346,50 | 577,50 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 88 194,20 | 284 414,00 | 0,31 |
| 2800017 | 85 471,70 | 830,00 | 348,60 | 581,00 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 87 368,05 | 263 113,00 | 0,33 |
| 2800018 | 67 758,97 | 680,00 | 285,60 | 476,00 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 69 337,32 | 223 841,00 | 0,31 |
| 2800022 | 65 434,08 | 695,00 | 291,90 | 486,50 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 67 044,23 | 214 886,00 | 0,31 |
| 2800008 | 15 930,96 | 230,00 | 96,60 | 161,00 | 38,86 | 0,33 | 0,42 | 16 458,17 | 89 154,00 | 0,26 |
| 2800010 | 45 976,76 | 565,00 | 237,30 | 395,50 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 47 311,31 | 160 097,00 | 0,30 |
| 2800019 | 72 353,60 | 775,00 | 325,50 | 542,50 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 74 133,35 | 256 212,00 | 0,29 |
| 2800020 | 63 151,15 | 725,00 | 340,50 | 507,50 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 64 824,90 | 202 525,00 | 0,32 |
| 2800021 | 44 172,35 | 555,00 | 233,10 | 388,50 | 136,00 | 0,33 | 0,42 | 45 485,70 | 139 036,00 | 0,33 |
| Totales | 584 570,70 | 6 620,00 | 2 816,40 | 4 634,00 | 1 262,86 | 3,36 | 4,20 | 599 911,47 | 2 023 959,00 | 0,30 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Tabla 10
Costos por voladura con detonadores electrónicos

| Proyecto voladura (Nro) | Total explosivo (USD) | Detonador electrónico (USD) | Detonador pirotécnico (USD) | Cable eléctrico (USD) | Boosters 1 libra (USD) | Costo total voladura (USD) | Tonelaje disparado (t) | Costo unitario (USD/t) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 2785013 | 77 159,53 | 4 864,08 | 390,00 | 542,30 | 546,00 | 83 501,91 | 279 277,00 | 0,30 |
| 2785010 | 75 967,92 | 4 552,28 | 365,00 | 446,60 | 511,00 | 81 842,20 | 265 695,00 | 0,31 |
| 2785012 | 51 458,62 | 3 679,24 | 295,00 | 319,00 | 413,00 | 56 164,56 | 214 696,00 | 0,26 |
| 2785011 | 49 559,31 | 3 648,06 | 292,50 | 148,50 | 409,50 | 54 057,87 | 207 866,00 | 0,26 |
| 2785009 | 48 625,98 | 3 367,44 | 270,00 | 319,00 | 378,00 | 52 960,42 | 191 154,00 | 0,28 |
| Totales | 302771,36 | 20 111,10 | 1612,50 | 1775,40 | 2257,50 | 328 526,96 | 1 158 688,00 | 0,28 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Como conclusión, en cuanto a costos unitarios en ambos sistemas de iniciación de voladuras, se puede manifestar que, en las voladuras con detonadores pirotécnicos, se tiene un costo de 0,30 USD/t, mientras que, en las voladuras con detonadores electrónicos, el costo unitario es de 0,28 USD/t, aparentemente la diferencia es mínima, pero tendrá enorme relevancia cuando estos costos se relacionan con los tonelajes a minar.

4.4.5. Costo ahorrado en voladura con detonadores electrónicos

En las cinco voladuras efectuadas con detonadores electrónicos se ha tenido un ahorro de más de 19 000 USD debido al siguiente análisis cuantificable.

Tabla 11
Resumen de costos y tonelajes

| Descripción del Item | Unidad | Valor |
|---|--------|--------------|
| Costo unitario de detonadores pirotécnicos | USD/TM | 0,30 |
| Tonelaje disparado con detonadores electrónicos | t | 1 158 688,00 |
| Costo total voladura con detonadores electrónicos | USD | 328 498,96 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

El ahorro obtenido, solamente en la operación de voladura, se determina a través de la siguiente relación.

$$Ahorro = \frac{0,30 \text{ USD}}{t} \times 1\ 158\ 688,00 \text{ t} = 347\ 606,40 \text{ USD} - 328\ 498,96 \text{ USD}$$

$$Ahorro = 19\ 107,44 \text{ USD}$$

4.4.6. Proyección de ahorro en voladura durante el año 2013

Manteniéndose los precios unitarios de los insumos de voladura, existe un ahorro sustancial expresado en dólares, para tal efecto, es importante conocer el tonelaje de yeso Anhidrita que se minará en el año 2013. Para determinar esta proyección, nos basamos en la siguiente data.

Tabla 12
Resumen de costos y tonelaje anual

| Descripción del Item | Unidad | Valor |
|--|--------|---------------|
| Costo unitario de detonadores pirotécnicos | USD/t | 0,30 |
| Costo unitario de detonadores electrónicos | USD/t | 0,28 |
| Tonelaje de Yeso Anhidrita a disparar en el año 2013 | t | 51 708 699,08 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

CDP : Costos detonadores pirotécnicos

CDE : Costos detonadores electrónicos

$$CDP = \frac{0,30 \text{ USD}}{t} \times 51\,708\,699,08 \text{ t} = 15\,537\,305,71 \text{ USD}$$

$$CDE = \frac{0,28 \text{ USD}}{t} \times 51\,708\,699,08 \text{ t} = 14\,536\,235,93 \text{ USD}$$

La proyección de ahorro para el año 2013 es el resultado de la diferencia de ambos detonadores.

$$Ahorro(2013) = 15\,537\,305,71 \text{ USD} - 14\,536\,235,93 \text{ USD} = 1\,001\,068,78 \text{ USD}$$

4.4.7. Rendimientos y costos del equipo de carguío

El costo horario de una Pala P&H4100A es de 324,23 USD/t, en base a este parámetro de costo unitario es que se

efectúa y se estructura el siguiente cuadro y análisis cuantificable.

Tabla 13
Rendimientos y costos de palas P&H4100A

| Sistema de iniciación devoladura | Tonelaje disparado (t) | Velocidad minado efectiva (t/h) | Velocidad minado real (t/h) | Costo horario (USD/h) | Costo tonelada (USD/t) | Costo total (USD) |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| Pirotécnico | 2 023 959,00 | 6 621,00 | 4158,90 | 324,23 | 0,05 | 101 197,95 |
| Electrónico | 1 158 688,00 | 7 393,00 | 7202,00 | 324,23 | 0,04 | 46 347,52 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

4.4.8. Costo ahorrado en carguío con detonadores electrónicos

En las cinco voladuras efectuadas con detonadores electrónicos se ha tenido un ahorro de más de 11 000 USD debido al siguiente análisis.

Tabla 14
Resumen de costos y tonelajes

| Descripción del Item | Unidad | Valor |
|---|--------|--------------|
| Costo unitario de carguío con detonadores pirotécnicos | USD/t | 0,05 |
| Tonelaje disparado con detonadores electrónicos | t | 1 158 688,00 |
| Costo total de carguío en voladura con detonadores electrónicos | USD | 46 347,52 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

$$\text{Ahorro} = \frac{0,05 \text{ USD}}{t} \times 57\,934,40 \text{ t} = 57\,934,40 \text{ USD} - 46\,347,52 \text{ USD} = 11\,586,88 \text{ USD}$$

4.4.9. Proyección de ahorro en carguío durante el año 2013

Conociendo ya el tonelaje de yeso Anhidrita que se minará durante el año 2013 y relacionando éste con los costos de minado de ambos detonadores (electrónico y pirotécnico), se efectuó el siguiente cuadro, con sus respectivas relaciones de cálculo.

Tabla 15
Resumen de costos y tonelajes

| Descripción del Item | Unidad | Valor |
|--|--------|---------------|
| Costo unitario de carguío con detonadores pirotécnicos | USD/t | 0,05 |
| Costo unitario de carguío con detonadores electrónicos | USD/t | 0,04 |
| Tonelaje de Yeso Anhidrita a disparar en el año 2013 | t | 51 708 699,08 |

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

$$CDP = \frac{0,05 \text{ USD}}{t} \times 51\,708\,699,08 \text{ t} = 2\,585\,434,95 \text{ USD}$$

$$CDE = \frac{0,04 \text{ USD}}{t} \times 51\,708\,699,08 \text{ t} = 2\,068\,347,96 \text{ USD}$$

La proyección de ahorro para el año 2013 es el resultado de la diferencia de ambos detonadores.

$$\text{Ahorro}(2013) = 2\,585\,434,95 \text{ USD} - 2\,068\,347,96 \text{ USD} = 517\,086,99 \text{ USD}$$

4.4.10. Proyección total de ahorro

Durante las primeras voladuras se tuvieron los siguientes ahorros:

- Voladura: 19 107,44 USD
- Carguío: 11 586,88 USD.

Por lo tanto:

$$\text{Ahorro(Prueba)} = 19\ 107,44\ \text{USD} + 11\ 586,88\ \text{USD} = 30\ 694,32\ \text{USD}$$

Con los resultados obtenidos, tanto en fragmentación como rendimiento de los equipos de carguío, más la proyección de minado para el año 2013, se asume el siguiente ahorro:

- Voladura: 1 001 068,78 USD
- Carguío: 517 086,99 USD.

$$\text{Ahorro(2013)} = 1\ 001\ 068,78\ \text{USD} + 517\ 086,99\ \text{USD} = 1\ 518\ 155,77\ \text{USD}$$

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados mina Toquepala vs. mina Cerro de Pasco

5.1.1. Comparación de resultados de fragmentación

Durante el análisis de calidad de fragmentación obtenida en la mina Toquepala se obtuvo un D90 de 38,15 cm para el caso de los detonadores pirotécnicos; con el uso de detonadores electrónicos se obtuvo un D90 de 33,09 cm.

Para el caso de la unidad minera Cerro de Pasco la calidad de fragmentación obtenida fue de 64,74 cm con el uso de detonadores pirotécnicos contra los 27,00 cm de D90 con el uso de detonadores electrónicos.

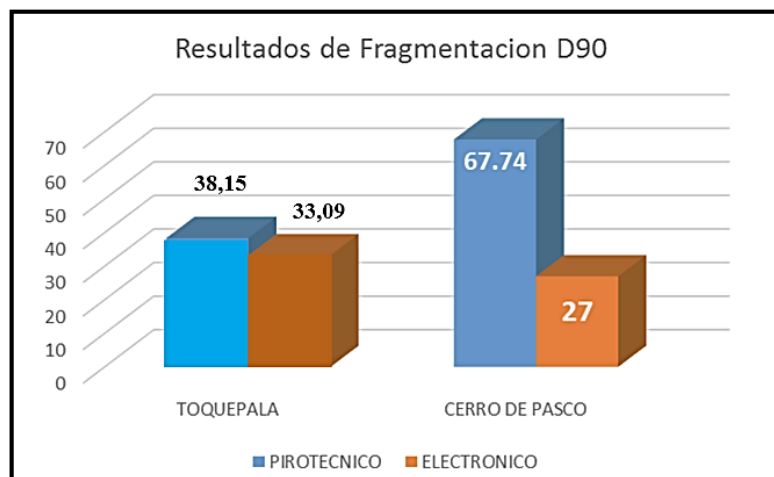


Figura 66. Resultados de fragmentación
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

5.1.2. Comparación de resultado de costos

Como bien se sabe la reducción de costos en el empleo de nuevas estrategias de voladura es fundamental para el análisis de resultados, es por ello que se realizará la comparación de resultados finales de costos totales reducidos en las minas Toquepala y Cerro de Pasco, utilizando los detonadores electrónicos.

Para poder observar con detalle el resultado obtenido en el caso de los costos unitarios de ambos detonadores, se tomará como ejemplo un proyecto para cada detonador.

a. Detonadores pirotécnicos: Proyecto 2800 010

Datos:

- DL= Densidad lineal= 79,551 kg/ml
- Tonelaje obtenido = 160 097 t (dato de ingeniería)
- Costo HA55 =48,37 USD/ml
- Costo detonador pirotécnico = 2,5 USD/und
- Costo de retardo de superficie = 2,1 USD/und
- Costo de Booster = 3,5 USD/und
- Costo del cordón detonante = 136 USD/caja
(1 caja=1 400 m)
- Mecha de seguridad = 0,11 USD/m
- Fulminantes = 0,21 USD/und

Para el cálculo de costo total de explosivo se debe tener un estricto control del registro de consumo de agentes de explosivos, por lo que para el proyecto 2800 010 se obtuvo los siguientes registros de consumo:

- DIESEL = 1 954,1 kg
- NA = 30 614,20 kg
- EMULSIÓN = 43 046,70 kg

Por lo tanto:

$$\text{Total de explosivo} = 1\,954,10 + 43\,046,70 + 30\,614,20$$

$$\text{Total de explosivo} = 75\,615 \text{ kg}$$

Entonces, el costo total de explosivo es:

$$\text{CT explosivo} = \frac{75\,615 \text{ Kg} \times 48,37 \text{ USD} \times \text{ml}}{\text{ml} \times 79,551 \text{ Kg}}$$

Entonces:

$$\text{CT explosivo} = 45\,976,76 \text{ USD}$$

Para determinar el costo de todos los accesorios, al igual que los agentes explosivos se debe tener un estricto control de los registros de consumo de accesorios, una vez que se tenga estos datos se podrá determinar el siguiente costo:

Consumo de accesorios:

- Detonador Pirotécnico = DP = 226 und
- Retardo de superficie = RS = 113 und
- Booster = B = 113 und
- Cordón detonante = CD = 1 400 m

- Mecha de seguridad = MSG = 3 m
- Fulminantes = F = 2 und

Por lo tanto, si se reemplaza estos datos con los costos unitarios de los accesorios, se obtendrá los siguientes resultados

- **Costo DP** = 226 und x 2,5 USD /und = 565 USD
- **Costo RS** = 113 und x 2,1 USD /und = 237 USD
- **Costo B** = 113 und x 3.5 USD /und = 395,5 USD
- **Costo CD** = 1 400 m x 136 USD /caja = 136 USD
- **Costo MSG** = 3 m x 0,11 USD /m = 0,33 USD
- **Costo F** = 2 und x 0,21 USD /und = 0,42 USD

Para obtener el costo total de voladura se suma el costo total de explosivo más el costo obtenido por cada accesorio.

Teniendo como resultado:

- CTV = costo total de voladura
- CTE = costo de explosivos
- CDP= costo de detonadores pirotécnicos
- CRS= costo de retardos de superficie
- CB = costo de booster

- CCD = costo de cordón detonante
- CMSG= costo de mecha de seguridad
- CF = costo de fulminantes

Por lo tanto:

$$\mathbf{CTV = CTE + CDP+CRS+CB+CCD+CMSG+CF}$$

$$\mathbf{CTV = 45\,946,76\ USD + 565\ USD + 237,3\ USD + 395,5\ USD + 136\ USD + 0,33\ USD + 0,42\ USD}$$

$$\mathbf{CTV = 47\,311,31\ USD}$$

Finalmente, para obtener el costo unitario total para los detonadores pirotécnicos será:

- CUP = Costo unitario pirotécnico
- TN = Tonelaje obtenido = 160 097 t
- CUP = CTV / TN

Entonces:

$$\mathbf{CUP = 47\,311,31\ USD / 160\,097\ t}$$

$$\mathbf{CUP = 0,30\ USD / t}$$

b. Detonadores Electrónicos: Proyecto 2785 009

Datos:

- DL= Densidad lineal= 79,551 kg/ml
- Tonelaje obtenido = 191 154 t (dato de ingeniería)
- Costo HA55 =48,37 USD/ml
- Costo detonador electrónico = 31,18 USD/und
- Costo detonador pirotécnico = 2,5 USD/und
- Costo de Booster = 3,5 USD/und
- Costo del cable conexión = 0,22 USD/m
- Mecha de seguridad = 0,11 USD/m

Para el cálculo de costo total de explosivo se debe tener un estricto control del registro de consumo de agentes de explosivos, por lo que para el proyecto 2785 009 se obtuvo los siguientes registros de consumo:

- DIESEL = 2 110,75 kg
- EMULSION = 44 792, 80 kg
- NA = 33 068, 45 kg

Por lo tanto:

$$\text{Total de explosivo} = 2\,110,75 + 44\,792,80 + 33\,068,45$$

$$\text{Total de explosivo} = 79\,972 \text{ kg}$$

Entonces, el costo total de explosivo es:

$$\text{CT explosivo} = \frac{79\,972 \text{ Kg} \times 48,37 \text{ USD} \times \text{ml}}{\text{ml} \times 79,551 \text{ Kg}}$$

Entonces:

CT explosivo

$$\text{CT explosivo} = 48\,625,98 \text{ USD}$$

Para determinar el costo de todos los accesorios, al igual que los agentes explosivos se debe tener un estricto control de los registros de consumo de accesorios, una vez que se tenga estos datos se podrá determinar el siguiente costo:

Consumo de accesorios:

- Detonador electrónico = DE = 108 und
- Detonador pirotécnico = DP = 108 und
- Booster = B = 108 und
- Cable conexión = C = 1 450 m

Por lo tanto, si se reemplaza estos datos con los costos unitarios de los accesorios, se obtendrá los siguientes resultados:

- Costo DE = 108 und x 31,18 USD /und = 3 367,44 USD
- Costo DP = 108 und x 2,5 USD /und = 270 USD
- Costo B = 108 und x 3,5 USD /und = 378 USD
- Costo C = 1450 m x 0,22 USD /m = 319 USD

Para obtener el costo total de voladura, se suma el costo total de explosivo más el costo obtenido por cada accesorio.

Se tendrá como resultado:

- CTV = costo total de voladura
- CTE = costo de explosivos
- CDE= costo de detonadores electrónico
- CDP= costo de detonadores pirotécnicos
- CB = costo de booster
- CC = costo de cable conexión

Por lo tanto:

$$CTV = CTE + CDE + CDP + CB + CC$$

$$\begin{aligned} \text{CTV} &= 48\,625,98 \text{ USD} + 3\,367,44 \text{ USD} + 270 \text{ USD} + 378 \\ &\text{USD} + 319 \text{ USD} \\ \text{CTV} &= 52\,625,98 \text{ USD} \end{aligned}$$

Finalmente, para obtener el costo unitario total para los detonadores electrónicos será:

- CUP = Costo unitario electrónico
- TN = Tonelaje obtenido = 191 154 t

$$\mathbf{CUP = CTV / TN}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \text{CUP} &= 52\,625,98 \text{ USD} / 191\,154 \text{ t} \\ \text{CUP} &= 0,28 \text{ USD} / \text{t} \end{aligned}$$

Después de analizar los proyectos que se encuentran en las tablas 4,6 y 4,7 en donde se observan los resultados obtenidos de diferentes proyectos, se determina que:

Mina Toquepala

El costo con el uso de detonadores pirotécnicos es de 0,30 USD/t, con el uso de detonadores electrónicos se obtuvo un costo total de 0,28 USD/t.

Cerro de Pasco

El costo con el uso de detonadores pirotécnicos es de 0,259 USD/t, con el uso de detonadores electrónicos se obtuvo un costo total de 0,222 USD/t.

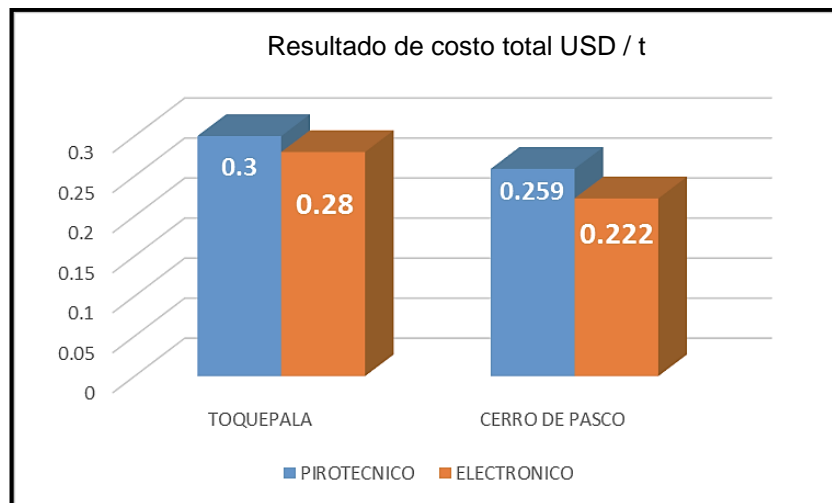


Figura 67. Resultado de costo total
Fuente: Departamento de perforación y voladura. Mina Toquepala, 2012.

5.1.3. Resultados de fragmentación Toquepala - Cerro Verde

Para el caso de la unidad minera Cerro Verde la calidad de fragmentación obtenida fue de 12,6 pulg con el uso de detonadores pirotécnicos contra las 7,9 pulg de D80 con el uso de detonadores electrónicos.

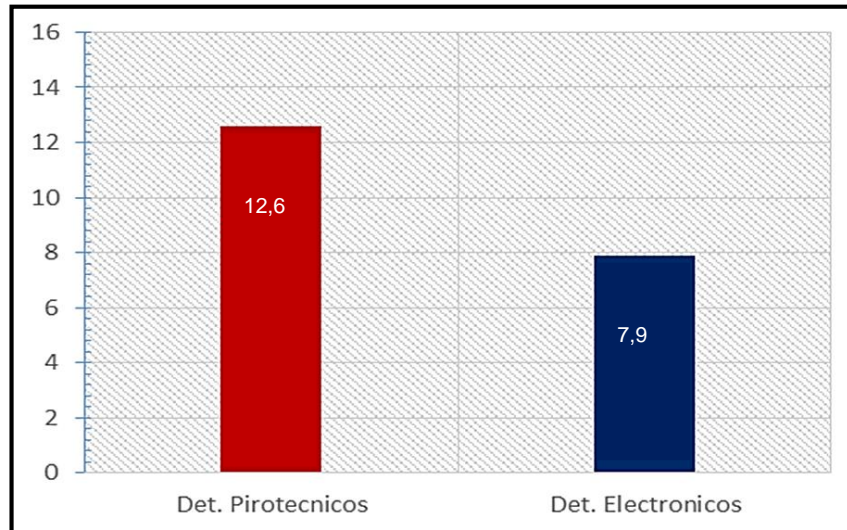


Figura 68. Resultado de fragmentación
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

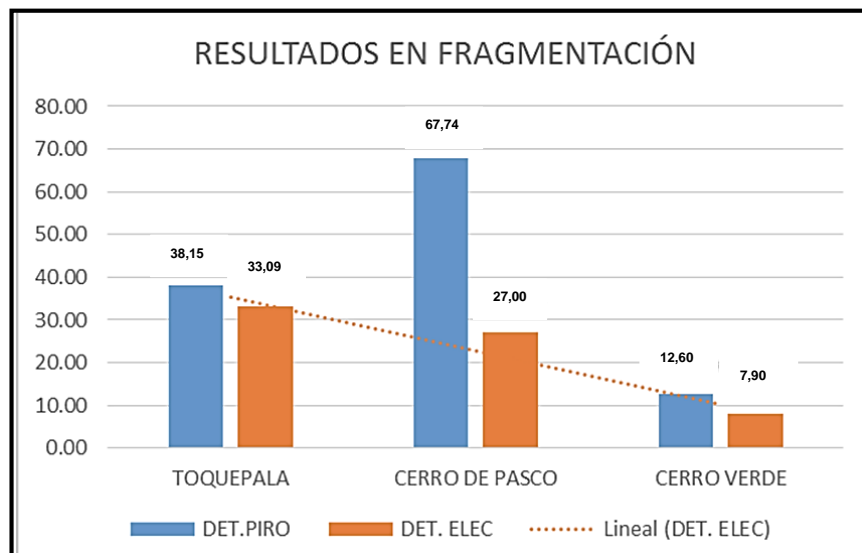


Figura 69. Comparación de resultado de fragmentación
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

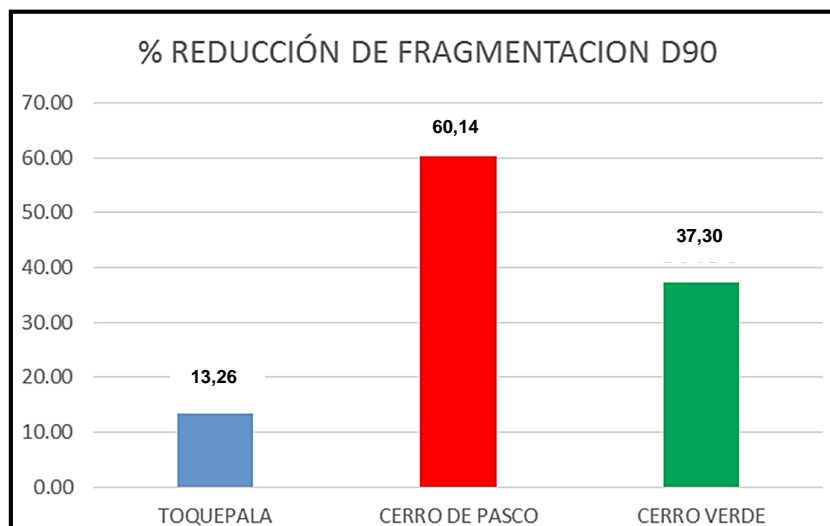


Figura 70. Porcentaje de reducción de fragmentación
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

5.1.4. Resultados en seguridad

Uno de los aspectos de mayor importancia en la minería actual son los temas de seguridad, por lo que en un área tan sensible como la voladura se deben tomar el menor de los riesgos durante su labor.

Es por ello que durante el análisis se observa que los detonadores electrónicos ofrecen aspectos que minimizan notablemente el error durante el trabajo, por lo tanto:

➤ Con el pirotécnico:

- ✓ Los detonadores fallados o cortes en la manguera de choque del excel, lo cual pueden o no ser detectados.
- ✓ Durante el amarre, la posibilidad de que se tenga un tiro quedado aumenta.
- ✓ El porcentaje de dispersión es de $\pm 5\%$

➤ Con el electrónico:

- ✓ Se pueden detectar la presencia de un detonador fallado o algún tipo de fuga durante el logueo.
- ✓ Al finalizar el amarre del proyecto se tiene el 100 % de certeza de que todos los detonares fueron amarrados.
- ✓ El porcentaje de dispersión es de $\pm 0,1\%$.

5.1.5. Resultados en versatilidad

Una de las frases que más se escucha en el mundo de la minería es “El tiempo es Oro”, por lo que sí se puede ahorrar tiempo en un área de tanto riesgo como la voladura sin dejar de lado los estándares de seguridad mínimos, se debe aprovecharlos.

Durante el uso de ambos tipos de detonares se observó:

➤ Con el pirotécnico:

- ✓ Se presentan demoras durante el amarre de los retardos de superficie.
- ✓ Se tiene que utilizar un tiempo para la revisión final de los proyectos al finalizar todo el amarre.
- ✓ Antes de iniciar el tendido de la línea de iniciación se tiene que esperar que todo esté liberado.

➤ Con el electrónico:

- ✓ La conexión es mucho más rápida y sencilla entre los cables de conexión y el detonador electrónico.
- ✓ No es necesario realizar una última revisión del amarre ya que el blaster contabiliza los detonadores logueados y se comparan con los que se han consumido.
- ✓ No es necesario esperar que la zona afecta a la voladura sea liberada; se tiene que dejar el cable tendido hasta el punto donde será ubicado el blaster, lugar en donde se puede testear si hay cualquier tipo de fuga antes de que ocurra cualquier tipo de imprevisto.

5.1.6. Resultados en monitoreo de vibraciones

Si bien es cierto, las voladuras producen ondas sísmicas que al final nos dan la fragmentación que se busca, se debe evitar que se produzcan las cargas operantes, para no dar como resultado cualquier tipo de daño a las paredes del talud.

Es por ello que durante los proyectos analizados se observó:

➤ Con el pirotécnico:

- ✓ Los vvp registrados en mucho de los casos superan el vvp crítico.
- ✓ De igual manera se observa caída de material en las paredes del talud.

➤ Con el electrónico:

- ✓ Los vvp registrados se observan por debajo de los vvp críticos.
- ✓ La presencia de caída de material en las paredes de los taludes disminuye notablemente.

CONCLUSIONES

1. El porcentaje de fragmentación gruesa se redujo de un $D_{90} = 38,15$ cm a $D_{90} = 33,09$ cm, lo que da una reducción del 13,26 % de fragmentación gruesa, lo cual mejora el ciclo de minado de la pala P&H4100A.
2. Se redujo el costo global de minado para el año 2013 en 1 518 155,77 USD, el mismo que puede incrementarse teniendo en cuenta los parámetros de voladura con un incremento en las dimensiones de la malla de perforación y reducción del factor de carga explosiva.
3. Se implementó el sistema de voladura teniendo en cuenta los tiempos entre filas y taladros, y el factor de carga con los detonadores electrónicos se redujo en un 0,038 kg/t,
4. Con la utilización de los detonadores electrónicos, se redujo el efecto de las vibraciones tal como indica en la tabla 4,2 y 4,3.

RECOMENDACIONES

1. Tener un procedimiento de las labores de perforación y voladura, el mismo que deben estar bajo un proceso de mejoramiento continuo, donde cada acción controla la eficacia de la próxima. Estos procedimientos deben estar respaldados por registros de control, para luego ser documentados, seguidos y auditados, de modo que todos los resultados que se obtengan sirvan como referencias para la generación de diseños posteriores de voladuras.
2. Realizar voladuras masivas, controlando el nivel de vibraciones permitirá también ahorrar en el proceso de minado, y la disminución del porcentaje de bolonería. El beneficio sería aún mayor si es que se puede hacer ampliaciones conservadoras de malla, puesto que habría además ahorros en perforación, siempre y cuando no se vea afectada la fragmentación ni el nivel de pisos.
3. Con los resultados obtenidos, se ha planteado a la jefatura de perforación y voladura de la mina Toquepala, la necesidad de ejecutar pruebas con detonadores electrónicos en las zonas medias y suaves de la mina, en cuyo proceso, la justificación del costo

unitario del detonador electrónico puede ser compensado a través de una ampliación de 5% a 10 % de la malla de perforación, para esto es necesario ejecutar un estudio técnico y concienzudo de viabilidad.

4. Para lograr una buena fragmentación se recomienda en la primera etapa del proceso de conminación de la roca, mejorar el proceso global mediante la facilidad de carguío, mejoramiento en el flujo de chancado y en el cumplimiento de producción planeado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artículo impreso:

Berger, E. (1998). Tronadura controlada y evaluación del daño en minas de cielo abierto. Antofagasta: Publicaciones Instituto de Ingenieros de Minas de Chile.

Coates D. F. (1970). Fundamentos de mecánica de rocas. Canadá: Publicaciones del Ministerio de Energía, Minas y Recursos Naturales de Canadá.

Davey B. (2012). Taller de optimización de perforación y voladura. Toquepala, Perú.

Herrera, M. (2011). Informe final: Voladuras efectuadas con detonadores electrónicos en el sector de yeso anhidrita de la mina Toquepala, Southern Perú. Toquepala, Perú.

Salas, G. (2004). Innovación en voladura con Detonadores Electrónicos, Sociedad minera Cerro Verde. Arequipa: Publicaciones de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A.

Libros:

Blume, H. (1970). Mecánica de rocas en ingeniería práctica. Madrid: Editorial Blume.

Cameron M. (1998). Tecnología de Voladura de Roca. Lima: Publicaciones Universidad Nacional de Ingeniería.

Enaex S.A (2010). Manual de tronadura. Puno: Publicaciones ENAEX.

Katsabanis, T. Silva, G. (2011). Tecnología de Explosivos y Técnicas de Voladura. Facultad de Ingeniería de Minas, Puno: Publicaciones UNA.

Lopez, C. (2003). Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Mucho R. (2012). Perforación y Voladura de Rocas – Especialistas en Perforación y Voladura PEVOEX. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Mucho R. (2012). Avances en la Tecnología de Voladura de Rocas – Especialistas en Perforación y Voladura PEVOEX. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Páginas web:

Scherpenisse, C. (2006). Monitoreo y Modelamiento de Vibraciones para el control y evaluación del daño por Voladuras. Lima, Perú. Recuperado de <https://es.scribd.com/>.

Tesis:

Ortiz, G. (2009). Optimización de voladura con el uso de detonadores electrónicos en la mina cerro de Pasco (Tesis de pregrado) Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Tacna.

ANEXOS

ANEXO A

Simulación de voladura mediante JK Blasting

Para la simulación del diseño de voladura se realiza el software JK. Blasting, el cual permite diseñar la secuencia de salida del proyecto de voladura. Para un ejemplo práctico del diseño se utilizará los siguientes parámetros.

- Diámetro del taladro : 11 pulg
- Burden : 5,6 m
- Espaciamiento : 6,5 x 6,5 m
- Sobre-perforación : 1,50 m
- Taco : 8 m
- Columna de ANFO : 8 m
- Longitud de Taladro : 16,0 m
- Malla : Triangular
- Altura de Banco : 15 m
- Posición de Taladro : Vertical
- Material : Producción
- Roca : Dura

a. Importación de taladros

Antes de empezar el diseño se debe importar al software, en los archivos de importación deben estar la extensión “Bhs, Csv o Dxf”, en este caso se usará una data en “*Bhs”, obtenida del sistema Mina “Minesight”. Para empezar la importación debemos ir al Menú File/ Import/General Hole Import.

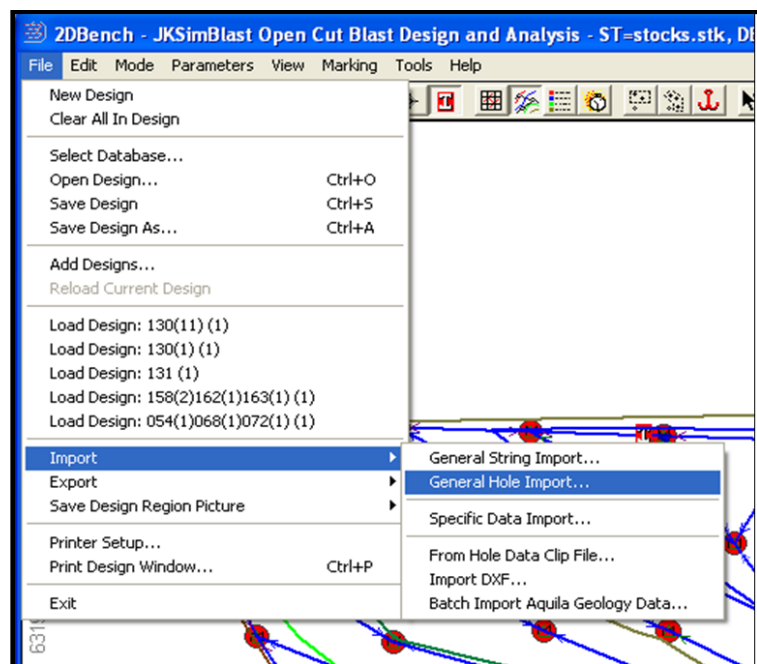


Figura 1. Importación de puntos.

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Se abrirá la ventana de selección de archivo, se seleccionará la data a utilizar, en este caso el archivo 3055 157.BHS el cual corresponde al

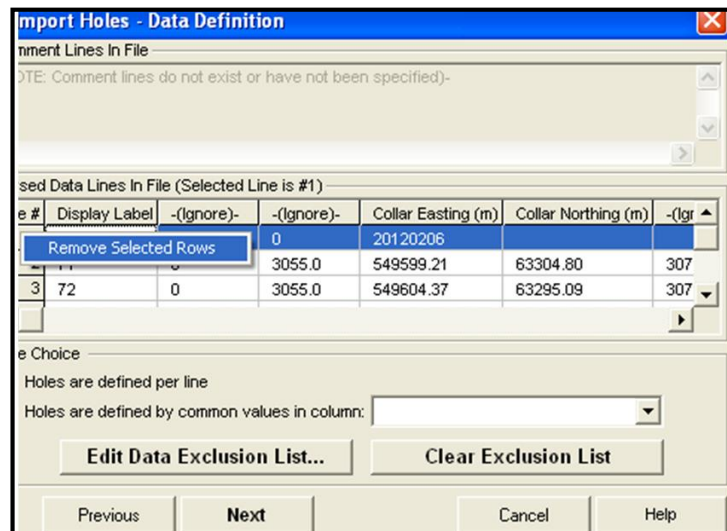


Figura 3. Definición de la data
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Finalmente, se da los parámetros para el diseño; Diámetro de taladro (Diameter), Longitud de Taladro (Total Length), Burden y Espaciamento (Spacing). Para terminar la importación se hace clic en el botón Finish.

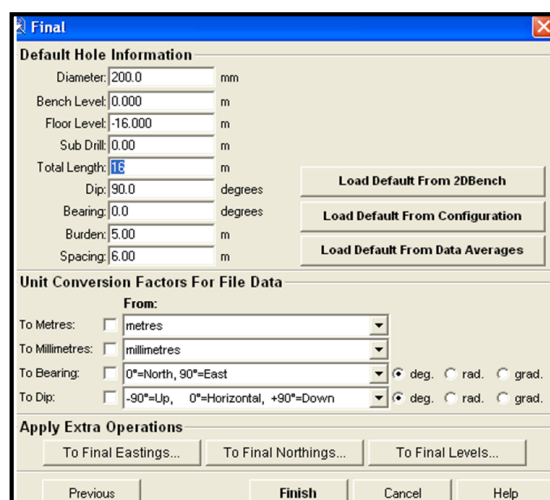


Figura 4. Establecimiento de parámetros de taladros
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Una vez importados los puntos se tendrá la siguiente vista, con los taladros ya importados en el área de diseño.

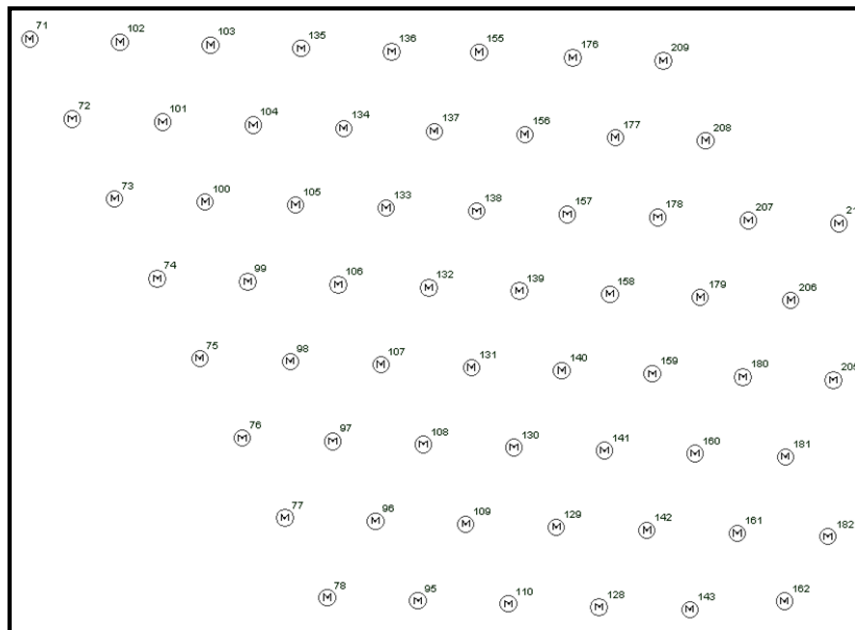


Figura 5. Taladros Importados
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

b. Asignación de cargas

Para asignar las cargas a los taladros se puede ir a la barra de Diseño y hacer clic al icono “DECKS” le hacemos clic y posteriormente hacemos clic en el botón *Parameters for current mode*, el cual abrirá un cuadro con las opciones y parámetros a utilizar en la asignación de la carga explosiva.

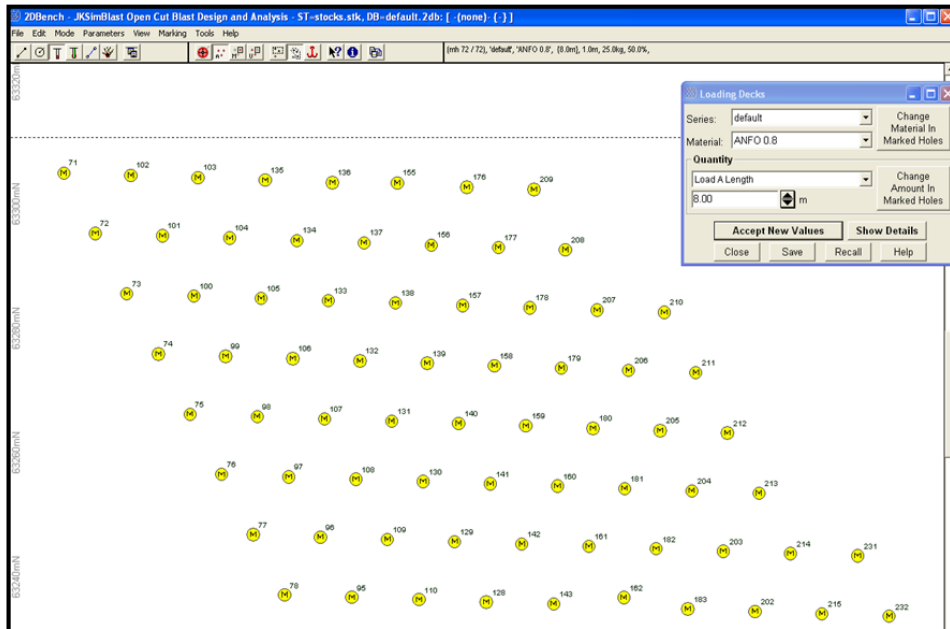


Figura 6. Botón para definir cargas
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

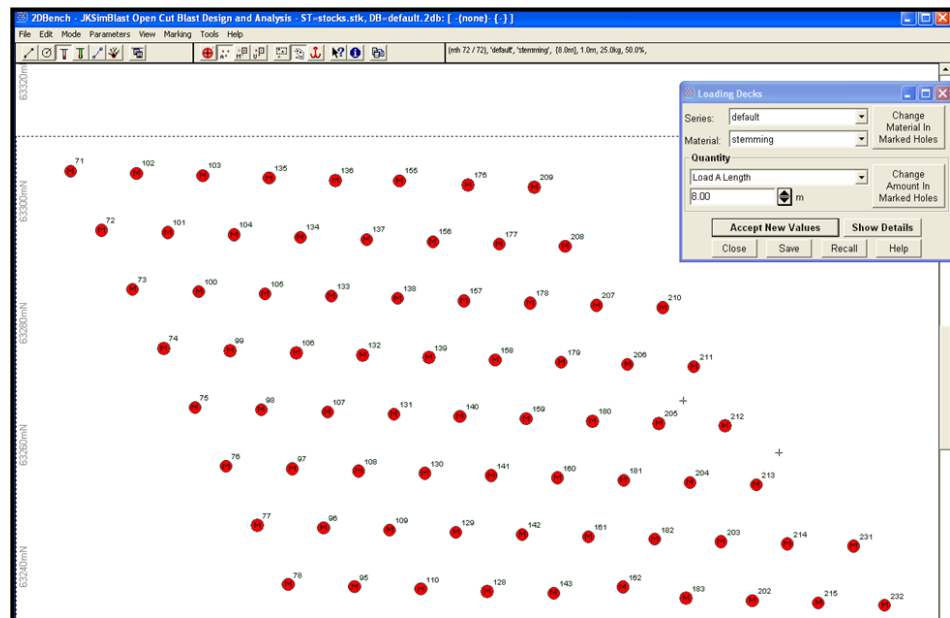


Figura 7. Botón para definir cargas
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

c. Asignación de tiempos de fondo (Noneles)

Para asignar tiempos de fondo se hace clic en el icono “SOWNHOLE” y posteriormente en el icono Parameters for current mode.

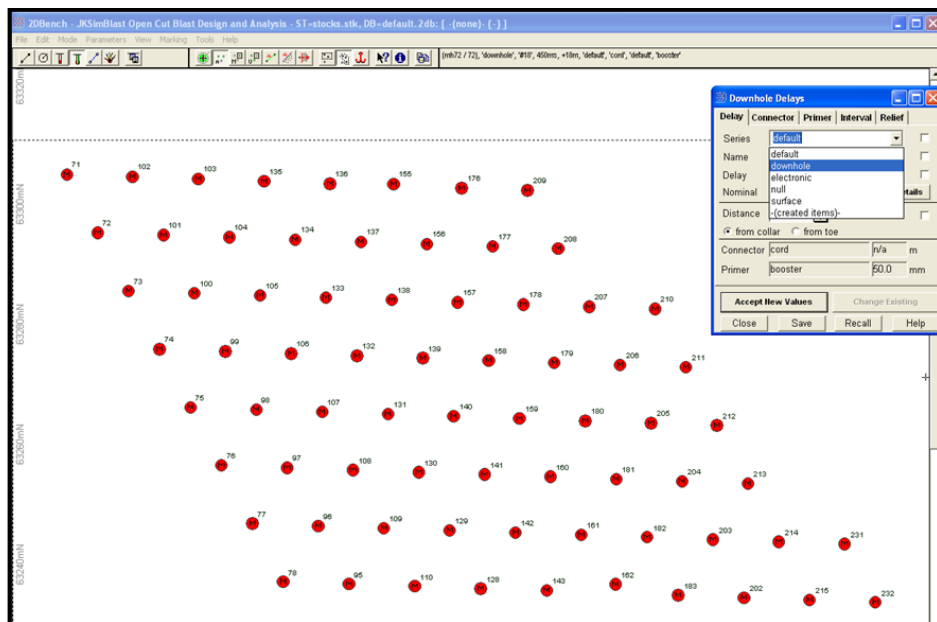


Figura 8. Botón para definir tiempos de fondo

Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

En los parámetros a utilizar para el primado se debe determinar el Delay o tiempo de fondo, en este caso todos los taladros estarán primados con un tiempo de 500 milisegundos. Se acepta los valores haciendo clic en el botón *Accept New Values*, luego se hace clic en el icono *Put Downhole delays in All the holes* en el menú de diseño y se

hace clic sobre el área de diseño para asignar el valor de tiempo de fondo.

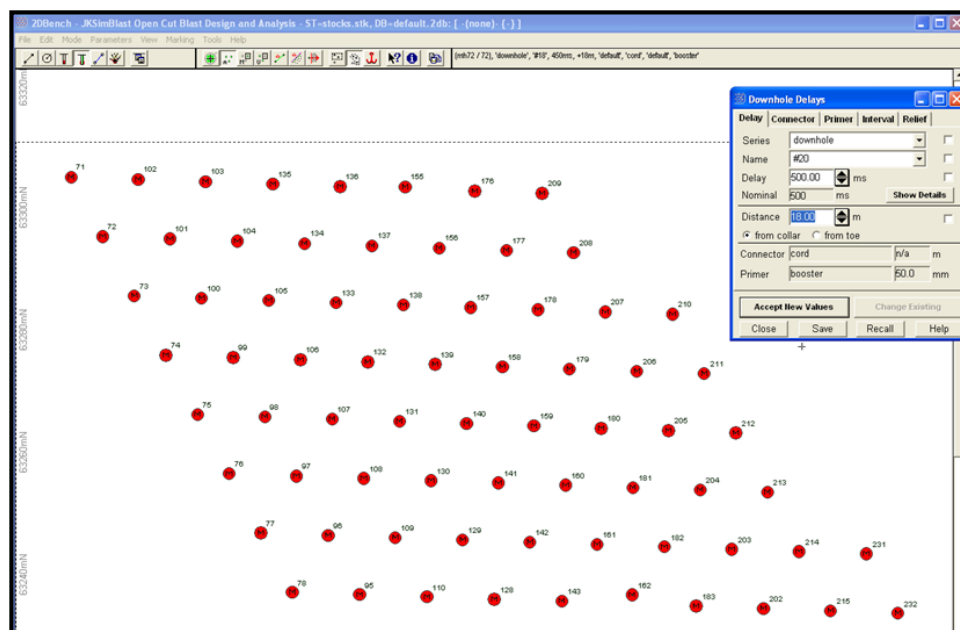


Figura 9. Ventana de parámetros – Tiempo de fondo
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

d. Amarre y asignación de retardos

Antes de empezar el amarre se debe de tener en cuenta lo siguiente; la secuencia de salida, la dirección de salida y el punto de inicio del proyecto. Para empezar con el amarre y asignación de retardos superficiales se debe ir a la barra de diseño y hacer clic sobre el ícono surface y luego sobre el ícono Parameters for current mode.

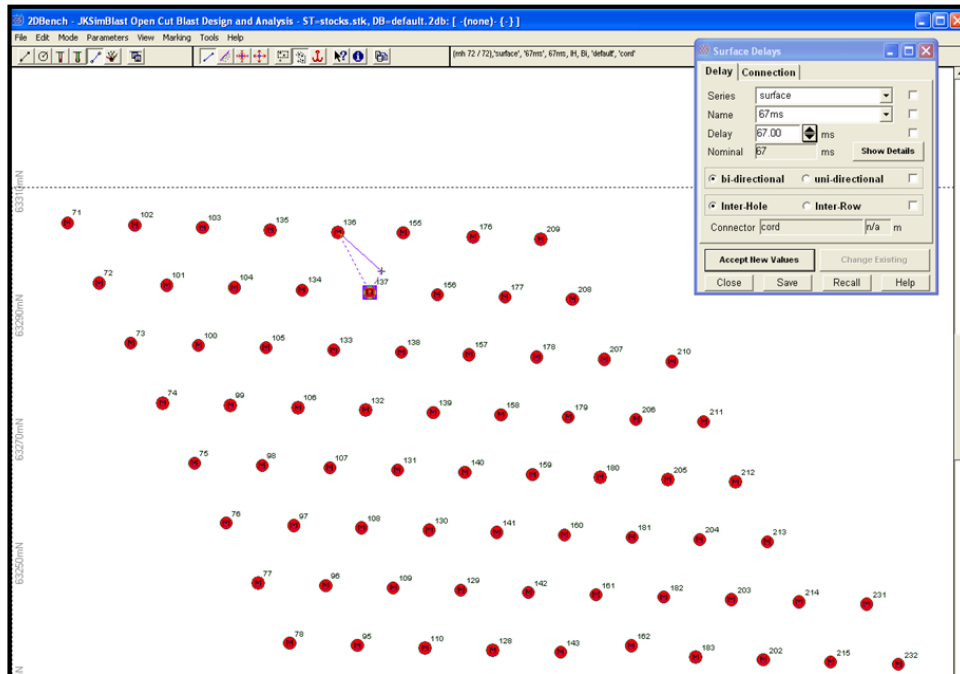


Figura 10. Botón para definir tiempos superficiales
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Para iniciar el diseño se debe definir la troncal, en este caso se cuenta la cantidad de columnas de taladros y se toma la mitad como la troncal. Para la troncal se usará retardos de 75 ms el valor para cada tipo de retardo se cambia en la opción Delay. Se acepta los valores haciendo clic en el botón *Accept New Values* y con ayuda del cursor se empieza a unir uno a uno los taladros de la troncal.

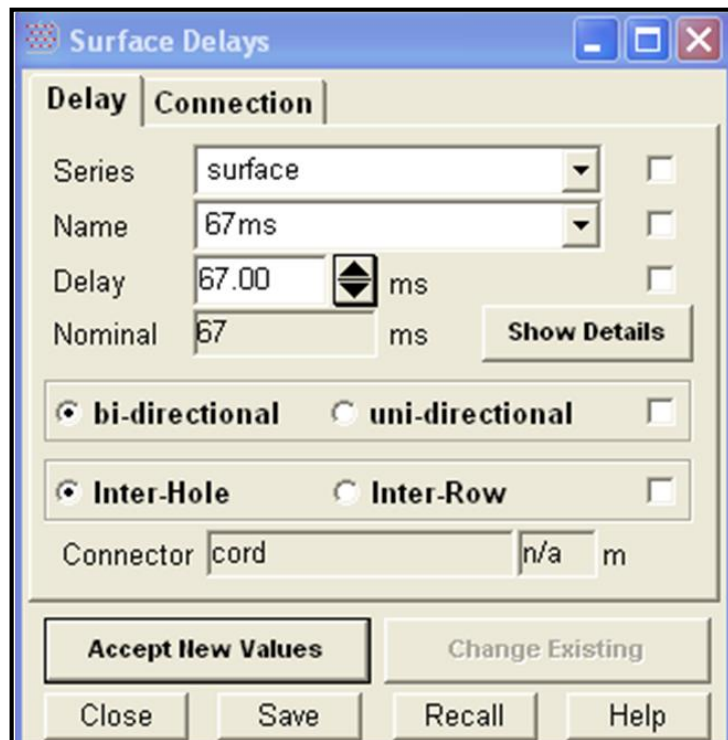


Figura 11. Ventana de Parámetros – Tiempo Superficiales
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Después de definir la troncal, se debe diseñar los brazos de salida, para esto se usan retardos de 17ms para toda la cresta. Los valores se cambian en la ventana Surface Delays.

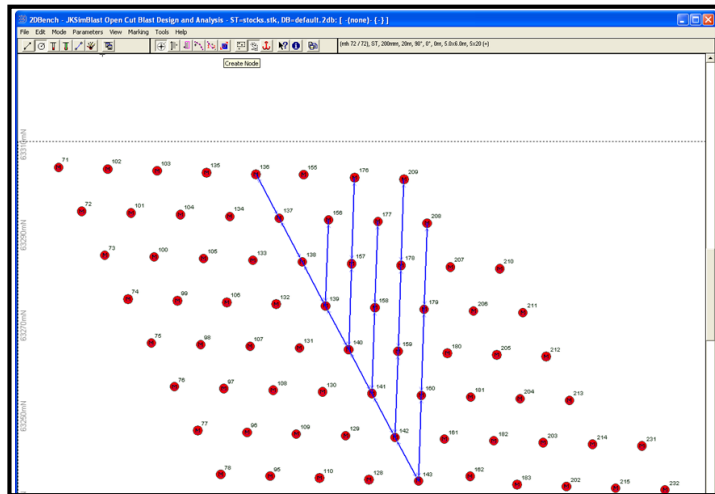


Figura 12. Ventana de Parámetros – Tiempo Superficiales
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

De igual manera para el lado del talud se usa retardo de 42 ms en la primera columna para diferenciar, 17 ms a continuación y retardos de 142ms al final, para cuidar el talud. Por último se une el contorno del proyecto con retardos de 100 ms.

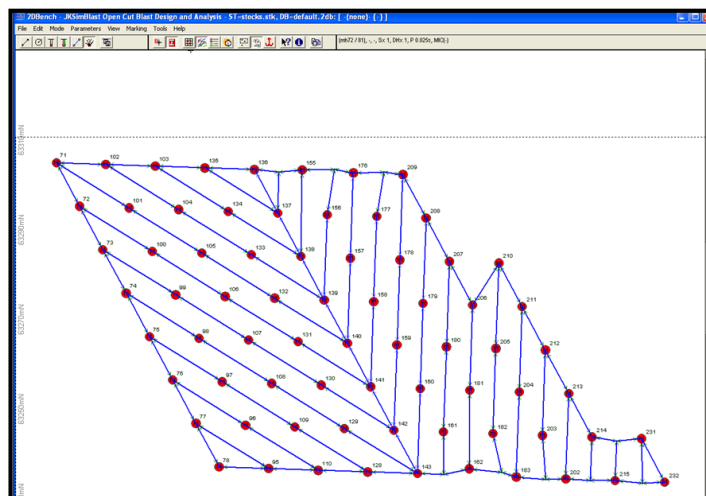


Figura 13. Diseño del contorno del proyecto – 100 ms
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

e. Simulación de la secuencia de salida

Para empezar la simulación se debe hacer clic en el ícono detonation, luego se debe hacer clic en el icono Start Detonation from Nearest Hole, el cual permite asignar el punto de inicio del disparo haciendo clic sobre el punto de inicio.

El objetivo de la simulación es verificar si la secuencia de salida de los taladros es la adecuada, evitando posibles cortes por mala distribución de tiempos superficiales y de fondo. Asegurando una buena fragmentación, una buena distribución de tiempos, para un óptimo monitoreo de vibraciones y evitando posibles tiros cortados por secuencia de salida.

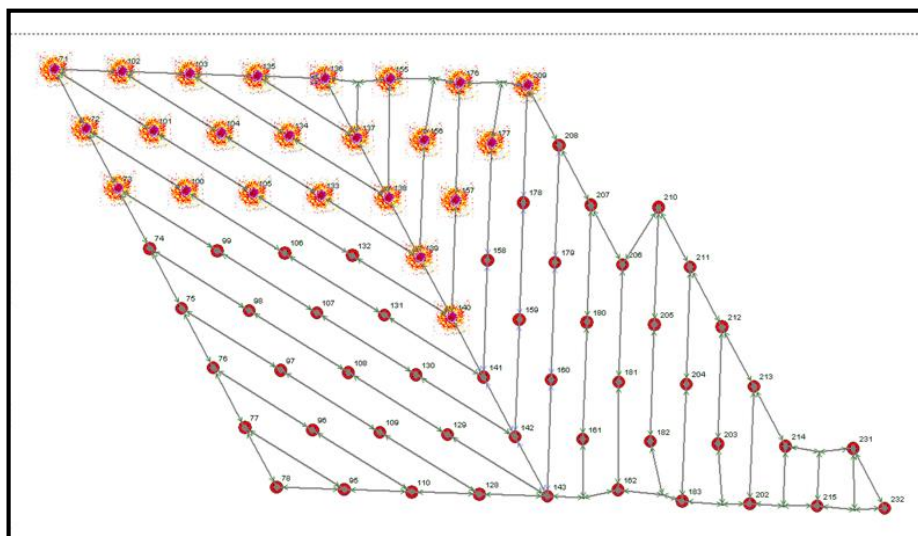


Figura 14. Simulación de la secuencia de salida
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

ANEXO B

Sistema de iniciación electrónica

Desde hace 11 años atrás, la industria minera, ha decidido ahora más que nunca utilizar los avances tecnológicos en las actividades de los procesos mineros y en las de sus proveedores. La meta ha sido crear una mejora en la productividad, y en la eficiencia de sus funciones y procesamientos.

La introducción de los detonadores electrónicos a la minería y la capacidad de precisión de disparo que estos poseen, han proporcionado a la industria minera una herramienta de optimización para las voladuras, que antes no estaban disponibles con los sistemas pirotécnicos, esto a proporcionado a los usuarios por primera vez, refinar los resultados de las voladuras para satisfacer las necesidades operacionales específicas o para superar restricciones en sus procesos. El resultado ha tenido significantes beneficios financieros y un mayor control sobre las funciones primarias y secundarias de la fragmentación de rocas. Este control a optimizado la productividad y la eficiencia de los procesos mineros, asimismo, la voladura electrónica ha traído un mayor nivel de confianza, posibilitando a los

usuarios revisar la funcionalidad del sistema completo antes de disparar, ayudando de este modo la prevención de errores en la voladura, y las consecuencias que podrían suscitarse.

Para la descripción de todos los accesorios de voladura que conforman el sistema de iniciación electrónica, se tomó en cuenta la información del Sistema I-kon de Orica, con la cual se ha ejecutado las voladuras.



Figura 15. Componentes del sistema electrónico
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

a. Detonador electrónico

Su función es detonar la carga explosiva, similar a un detonador pirotécnico, con la diferencia que presenta las siguientes características:

- Este detonador puede ser programable entre 0 a 15,000 milisegundos, con un incremento de 1 milisegundo, dando oportunidad a un amplio manejo de tiempos de amarre y contando con una exactitud del retardo programado de más o menos 0.1% de milisegundos. Esto garantiza no tener traslapes, que guarda directa relación con la probabilidad de acoplamiento de las ondas de choque producidas por cargas detonadas simultáneamente.



Figura 16. Detonador electrónico
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

- El detonador electrónico cuenta con un número de identificación único de fábrica que permite tener registrado cada detonador.

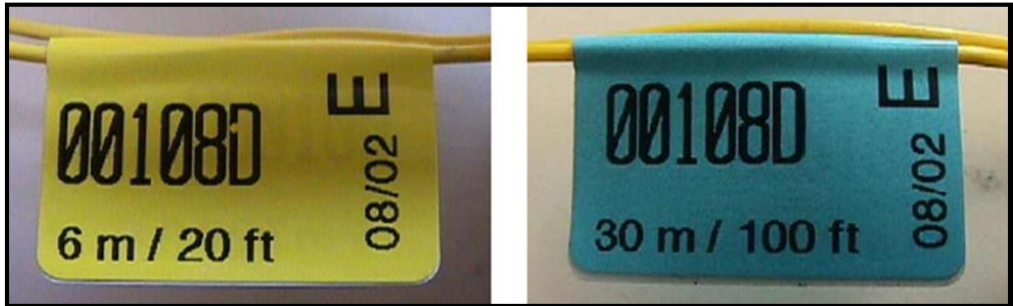


Figura 17. Número de serie del detonador electrónico
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

- Se realiza la comunicación bidireccional entre el control del equipo y el detonador. Para registrar o conectar un detonados, los cables tienen que ser insertados dentro de las ranuras terminales del conector, cualquier cable podría ser insertado dentro de cualquier ranura, pero un solo cable por ranura.

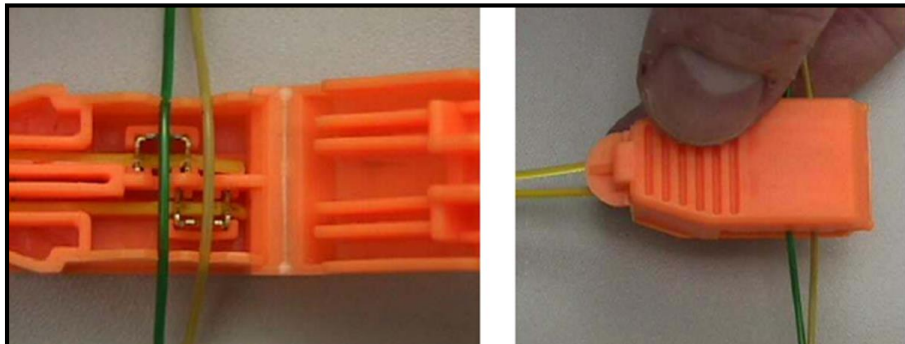


Figura 18. Conexión del detonador electrónico
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

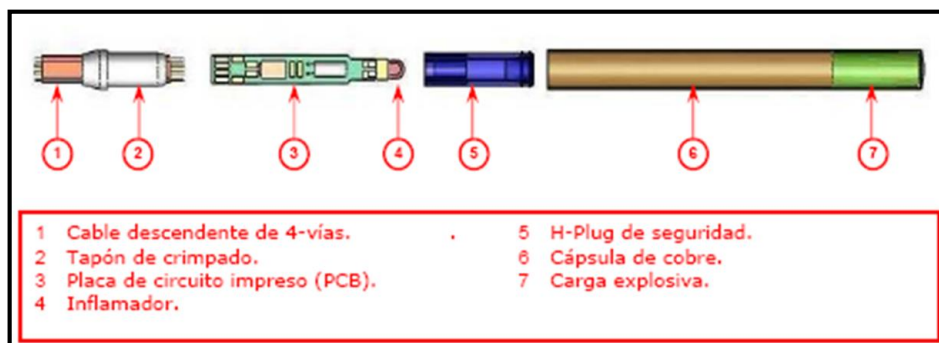


Figura 19. Estructura interna de un detonador electrónico
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

b. Cable de conexión

- El cable de disparo de dos vías, se utiliza para conectar los detonadores electrónicos del proyecto de voladura, también sirve para la conexión del logger al blaster.

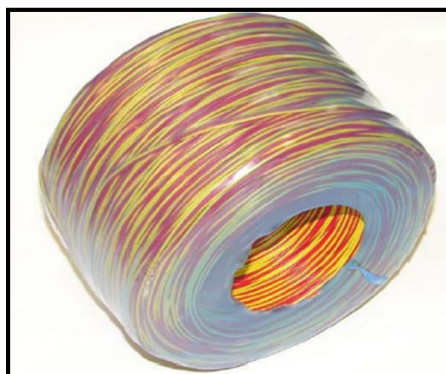


Figura 20. Cable de conexión
 Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

c. Logger (Programador de retardos)

El Logger es el dispositivo del sistema de voladura electrónica, mediante el cual, se puede testear todos los taladros del proyecto, a

través del software Shot Plus I o en forma manual, su trabajo es el siguiente:

- Este dispositivo verifica el estado del detonador.
- Lee y describe el ID del detonador en la memoria.
- Asigna tiempos de detonación.
- Chequea automáticamente el detonador y el cable, mediante un test de continuidad de línea.
- Cada logger tiene una capacidad de registrar 200 detonadores.
- Es inherentemente seguro y tiene 5 voltios de salida.



Figura 21. Logger
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

d. Blaster (Sistema de iniciación de alta seguridad)

Una vez efectuada la conexión, testeo y programación de tiempos de los taladros que conforman el proyecto de voladura, se procede con la detonación a través del Blaster, cumple las siguientes funciones:

- Este equipo realiza un auto chequeo completo y automático de la funcionalidad del sistema y programación del detonador.
- Cuenta con una capacidad de 1,600 detonadores (control de 8 logger con 200 detonadores por logger).
- Único con una llave de activación digital.
- Único con códigos de armado y fuego.
- Trabaja con un voltaje de salida de 24 V.



Figura 22. Blaster – Iniciador de voladura
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

e. Software Shot Plus i

Luego de conseguir los datos del computador, se lleva esta información al terreno y se procede a conectar cada detonador al logger, el cual le indica al detonador el tiempo de salida de acuerdo con el diseño previamente indicado y a su vez reconoce el estado de este, indicando si la línea descendente tiene problemas o existe alguna fuga de corriente (comunicación bidireccional). El software permite:

- Trabaja directamente con los detonadores electrónicos, y permite dar simulaciones de salida, considerando parámetros de tipo de material.
- Los amarres diseñados son descargados directamente al logger.
- Permite analizar los tiempos de amarre.

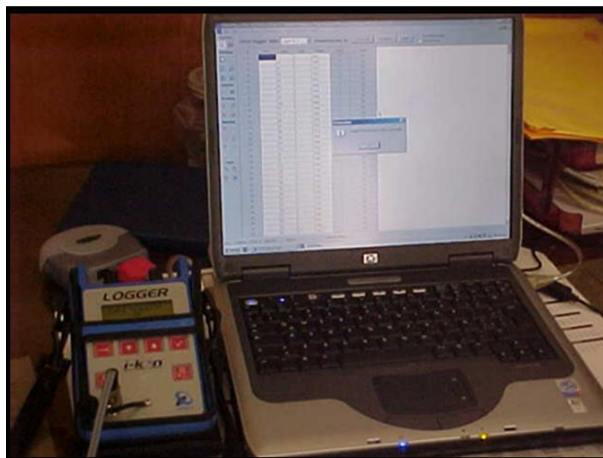


Figura 23. Programación de tiempos en Software Shot plus i
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

Para una mejor apreciación del sistema de voladura con detonadores electrónicos, se muestra el siguiente esquema gráfico, en el cual se detalla, todos los componentes del sistema (ver figura 10).

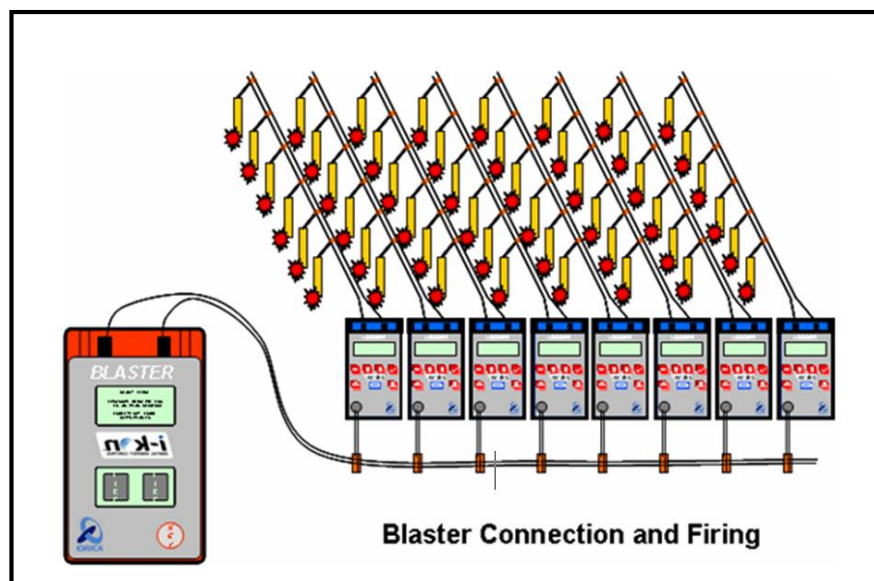


Figura 24. Circuito de voladura con detonadores electrónicos
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

ANEXO C

Conexión e iniciación de detonadores electrónicos

Para la ejecución del presente procedimiento es requisito indispensable que las personas involucradas cuenten con su Equipo de Protección Personal (EPP), asimismo, las personas involucradas, deben de contar con la licencia de manipuladores de explosivos, otorgada por la SUCAMEC.

En el siguiente procedimiento, se indican las siguientes etapas secuenciales de operación de voladura con detonadores electrónicos:

- Delimitar la zona del proyecto de voladura a cargar, a través de estacas, cinta de seguridad, y carteles con indicaciones “Zona Cargada”, con la finalidad de evitar el ingreso de personal extraño al área de voladura.

- Realizar la medición de taladros con wincha, y escribir la profundidad real en la estaca de perforación, para efectos de incrementar la profundidad si fuese menor que la indicada en la estaca, y para rellenar en el caso de haber un exceso en la perforación (consideramos como estándar más menos (+/-) 50 cm de diferencia), una vez efectuada la medición, se para la estaca de perforación sobre el detritus del taladro.

- Cuando los taladros tienen presencia de agua, se mide el nivel del agua con la ayuda de una wincha, y se escribe dicha medida de nivel en la estaca de perforación, junto con la profundidad del taladro, posteriormente, se ubica la estaca sobre el detritus del taladro en forma invertida, esta posición de la estaca indica a simple vista que el taladro tiene presencia de agua.
- Después de la medición del taladro, y de haber llegado a la profundidad solicitada, el personal especializado de voladura reparte en forma ordenada el booster y los detonadores pirotécnicos y electrónicos para realizar el primado de los taladros de perforación, el cebo generalmente se ubica a una altura entre 1.0 a 1.5 m de la base inferior del taladro.
- La operación de primado consiste en insertar un detonador electrónico y un detonador pirotécnico de respaldo a través de un orificio con salida, ubicado en el eje central de booster cilíndrico, una vez que aparecen las cápsulas de ambos detonadores en el otro extremo del iniciador, estos se introducen nuevamente, pero en sentido contrario en dos orificios de salida, de manera que los detonadores quedan anclados y totalmente alojados en los orificios ciegos del booster.
- Una vez ubicado el cebo, se procede con el carguío de explosivos en los taladros, de acuerdo con un diseño de carga explosiva, esta operación

se realiza mediante los Camiones Fábrica de Explosivos, el cual debe transitar en forma ordenada y con el cuidado del caso sobre el área a cargar, esta operación es realizada por el Operador de Piso quien realiza el trabajo mediante una wincha, y el Operador del Camión Fábrica.

- El Reglamento de Seguridad e Higiene Minera, en su artículo 227, inciso e), establece que en situaciones climáticas adversas como el caso de tormentas, se suspenderá el carguío de taladros hasta que pase el riesgo de contacto de una descarga eléctrica hacia los explosivos.
- Una vez cargados los taladros, se procede a introducir el material de taco en los taladros, mediante un Bob Cat, y jalando las líneas descendentes con un operador de piso, para verificar el anclado del Primer, y cuidar que las líneas no vayan a ser cortadas. Este proceso debe ser realizado con mucho cuidado, para evitar que su acción dañe las líneas descendentes de los detonadores y se obtenga de esta forma un tiro quedado, lo que perjudicaría los procesos siguientes. La altura del taco ayuda al confinamiento del explosivo, que favorece la fragmentación del material en la zona del taco.
- Antes de realizar el registro y conexión de los detonadores electrónicos, el operador del sistema deberá validar la malla en terreno, en caso de

existir diferencias, se deberá informar al jefe de Perforación y Voladura de la mina.

- Para registrar y conectar el detonador, el operador del sistema deberá abrir el conector de rápida unión y colocar los cables en las ranuras correspondientes, y luego cerrarlo para que se produzca la comunicación entre el logger y el detonador.
- Una vez finalizado el amarre y conexión del disparo se ejecuta las siguientes verificaciones: Cantidad de taladros de la malla, cantidad de taladros totales cargados por camión fábrica, cantidad de detonadores electrónicos utilizados, y cantidad total de detonadores registrados. Toda desviación registrada en la malla, debe de motivar la solución y equilibrio inmediato de la voladura en todos los puntos antes señalados, caso contrario, de no remediar el inconveniente, se procede a la cancelación de la voladura. El sistema electrónico detecta cuando un detonador registrado no ha sido conectado e indica al operador del sistema de este error, lo que permite corregir las conexiones y evitar los tiros cortados ocultos.
- Una vez concluida las conexiones, y haber verificado que todo el sistema de conexión se encuentra correctamente, se procede con la detonación, la cual iniciará de manera instantánea.

ANEXO D

Monitores de vibraciones

El objetivo de monitoreo de vibraciones es obtener un registro cuantitativo del resultado de impacto al macizo rocoso, para asegurar una óptima voladura y minimizar los riesgos en la ejecución de dichas actividades en los diferentes zonas y proyectos de voladura realizados en la mina.

a. Proceso para monitoreo de vibraciones

- **Paso 1.** El supervisor de Geotecnia comunica, coordina, analiza y ordena al Operador técnico, la(as) zona (s) de voladura(s) programada(s), refiriendo el número de proyecto, posición, lugar, nivel e indicando la ubicación del equipo de registro de vibraciones correspondiente y la zona de trabajo específico.
- **Paso 2.** Se debe planificar y estimar el tiempo para el desarrollo de la instalación del equipo de registro de vibraciones, con pleno conocimiento de las distancias y retrasos operacionales que pudiera suscitarse y evitar de esta forma apresuramientos indebidos.

- **Paso 3.** Antes de salir de las oficinas, revisar los materiales e instrumentos que se van a utilizar en el registro de vibraciones, además de seleccionar el equipo adecuado.
- **Paso 4.** Estacionar la camioneta en un lugar adecuados y seguro, respetando los procedimientos de estacionamiento establecidos, es decir, fuera del radio de acción de equipos mayores (palas, volquetes, perforadoras, tractores sobre orugas y ruedas, camiones de recojo de cables de alta tensión), especialmente lejos de crestas, toes, taludes prefragmentados, equipos trabajando, etc.
- **Paso 5.** Realizar una inspección de las condiciones del talud donde se tiene proyectado la instalación del equipo de monitoreo de vibraciones (sismógrafo) y tomar las medidas de seguridad correspondientes. Se debe estar atento al caminar sobre las vías principales.
- **Paso 6.** Demarcar el área donde se desarrolla la excavación para la instalación del equipo de registro de monitoreo con conos de seguridad ubicados a buen criterio del operador técnico, considerando las condiciones del lugar (tránsito, área reducida, bermas, equipos trabajando, etc.). los conos deben ser visibles a distancia prudente.

- **Paso 7.** Coordinar con B – 1 o encargado del proyecto, el ingreso al área para tomar referencias de ubicación a partir del último taladro hacia el talud en dirección del pateo, para la correcta ubicación del equipo de registro de vibraciones.
- **Paso 8.** En el punto asignado, excavar sobre superficie el material fragmentado hasta encontrar macizo in – situ, colocar el geófono de direccionado hacia la parte central del proyecto, sobre superficie horizontal.
- **Paso 9.** Conectar el geófono hacia la caja de registro, encender y aplicar nivel digital de geófono, colocar peso equivalente (bolsa de detritus), asegurar conexiones, revisar estándar de calibración para registro (procedimiento de calibración de sismógrafo), finalmente activar inicio de monitoreo.
- **Paso 10.** Cubrir con cubierta metálica simple o doble el conjunto de elementos accesorios del equipo de registro de vibraciones y colocar pértiga imantada sobre la cubierta metálica.
- **Paso 11.** Mantenerse en el punto hasta que el lugar se encuentre libre de tránsito de equipo pesado, auxiliar y se garantice que el equipo de monitoreo de vibraciones se encuentre libre de riesgos asociados.

- **Paso 12.** Al salir y pasar el punto de vigía del sector comunicar al B – 1, vía radio, el término de la instalación de sismógrafo en el área de voladura y esperar la confirmación de este.
- **Paso 13.** Solamente ingresar al área cuando la mina este liberada completamente por la voladura, retirar el equipo y accesorios, así como extremar las precauciones para no entorpecer la producción.



Figura 25. Sismógrafo InstanTel
Fuente: Departamento de perforación y voladura, mina Toquepala, 2012.

ANEXO E

Procedimiento de voladura - mina Toquepala

a. Pre - Voladura

- El Jefe de Perforación y Voladura (B-1), en la reunión de operaciones indicará la zona de la voladura a través de un Line Up, el mismo que se distribuye a todas las secciones involucradas en el proceso productivo de la mina (operaciones, perforación y disparos, y mantenimiento).
- En el Line Up de voladura, se menciona, la zona y pala del disparo (primaria y/o secundario) los lugares donde NO DEBE quedar personal y/o equipo, los lugares donde PUEDE quedar personal y/o equipo, los lugares donde QUEDA LIBRE personal y/o equipo, y los lugares donde estarán ubicados los vigías. Asimismo, esta información es corroborada en el campo, por el supervisor de voladura y los supervisores de operaciones.
- El Line Up de Voladura, debe ser cumplido por todo el personal que labora en mina. Este Line Up es leído por el controlador Dispatch tanto por frecuencia de operaciones y mantenimiento en reiteradas

oportunidades. Aparte de ello, se escribe diariamente en las pizarras de voladura; la fecha, lugar del disparo, pala de referencia y la hora de la voladura.

- Concluida la reunión de operaciones, el jefe de perforación y disparos junto con el residente del servicio de voladura coordinan los trabajos que se deben ejecutar, referentes a diseños de carga, diseño y secuencias de amarre y distribución de vigías.
- Los supervisores de voladura deben chequear continuamente el proceso de carguío de explosivos, el proceso de amarre según la secuencia, y todas las coordinaciones presentes en el proceso de voladura; es decir, que todos los trabajos, se ejecuten de acuerdo con los procedimientos.
- Los vigías de voladura son personas que cumplen una delicada misión, la cual es impedir el ingreso de personas, y vehículos al área de influencia de las voladuras, evitando, posibles accidentes e incidentes, ellos, están identificados con un cartel rojo de “Alto, Vigía, Voladura”, y deben estar ubicados en sus áreas 10 minutos antes de las 13:00 horas. Reportando su ubicación al supervisor de voladura. En ese momento, también se encienda la sirena.

- Una vez cerrado el pase para una voladura, ningún vigía podrá autorizar el ingreso hacia el área de la voladura a cualquier persona por decisión propia, salvo con autorización del jefe de perforación y disparos de la mina. Es obligación de toda persona obedecer y respetar a los vigías de voladura cuando están cumpliendo su misión.

b. Voladura propiamente dicha

- Antes de las 13:00 horas el supervisor de operaciones (O – 1), el supervisor de mantenimiento de turno, y el residente del servicio de voladura, reportarán al encargado de realizar la voladura (B - 1). El librado del área.
- Una vez librada la mina por parte del supervisor de operaciones, la frecuencia de radio de operaciones mina, está destinada para uso exclusivo del personal de voladura.
- El residente del servicio de voladura, luego de haber librado el área afectada por la voladura debe esperar la orden radial del jefe de perforación y voladura de la mina, para iniciar el sistema de voladura electrónica.
- Después de cinco minutos de concluida la voladura el jefe de perforación y disparos, autorizará al encargado del servicio de

voladura el ingreso a la zona disparada, para verificar que el disparo ha sido concluido sin ningún problema.

- El encargado del servicio de voladura ingresará a la zona disparada, para verificar que todos los taladros hayan detonado, y así de esta manera, reporte al jefe de perforación y voladura que el disparo ha concluido sin novedad.

c. Post - Voladura

- Concluida la voladura, solamente el supervisor de perforación y voladura dará por finalizada la misma, comunicando al supervisor de operaciones y mantenimiento por las frecuencias de radio respectivas, aparte de indicar el retiro de los vigías y el apagado de la sirena.