

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CATAMARCA
FACULTAD DE TECNOLOGIA Y CIENCIAS APLICADAS**

INGENIERIA DE MINAS



TRABAJO FINAL

**“Análisis técnico - económico de la
disminución del factor de carga en voladuras
de labores subterráneas horizontales de
sección completa”**

ALUMNO: Varela Rodrigo Nicolás

M.U. N°: 01030

DIRECTOR: Herrera Rinaldo Nicolás

DICIEMBRE DE 2022



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
CAPITULO 1	5
INTRODUCCION	5
1.1 OBJETIVO GENERAL	6
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	6
1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES	6
1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO	8
1.5 GENERALIDADES	10
1.5.1 Ubicación geográfica del yacimiento	10
1.5.2 Geología	12
1.5.3 Mineralogía	13
1.5.4 Método de explotación	13
CAPITULO 2	16
MARCO TEORICO REFERENCIAL	16
2.1 Explosivos	16
2.2 Objetivo de los explosivos en minería	16
2.3 Procesos de reacción y detonación de un explosivo	16
2.4 Emulsiones explosivas	20
2.5 Propiedades de los explosivos	20
2.5.1 Potencia y energía	20
2.5.2 Velocidad de detonación	21
2.5.3 Densidad	22
2.5.4 Presión de detonación	22
2.5.5 Estabilidad	22
2.5.6 Resistencia al agua	23
2.5.7 Diámetro critico	23
2.5.8 Desensibilización	24
2.5.9 Consumos específicos de explosivos	24
2.5.10 Condiciones atmosféricas	26
2.6 Criterios de selección de explosivos	26
2.7 Costos del explosivo	26
2.8 Condiciones de seguridad	26
2.9 Accesorios de voladura	27
2.9.1 Sistemas no eléctricos de iniciación	27
2.10 Carga del taladro	29



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

2.10.1 Carguío semi mecanizado subterráneo	29
CAPITULO 3	30
ESTUDIO DE LA DISMINUCION DEL FACTOR DE CARGA EN VOLADURAS DE LABORES SUBTERRANEAS DE SECCION COMPLETA	30
3.1 Sectores en desarrollo y preparación	30
3.2 Metodología de trabajo	30
3.3 Sobre excavación	32
3.4 Diagramas de perforación	33
3.5 Operación de carga y voladura	40
3.6 Modelos de Carga	43
3.7 Simulaciones de energía	46
3.8 Secuencia de Detonación	48
3.9 Simulación de Isolineas	51
3.10 Nomenclatura Utilizada	52
3.11 Categorización del estado de los frentes	53
3.12 Control del estado del frente	53
3.13 Implementación de Check list y reportes de voladura	56
3.14 Implementación de tacos inertes de arcilla	59
3.15 Capacitación del personal	60
3.16 Mediciones técnicas	61
3.16.1 Medición de la velocidad de detonación del explosivo	61
3.16.2 Medición de vibración en campo lejano	62
3.16.3 Procedimiento de medición de fragmentación	63
CAPITULO 4	64
PRUEBAS DE VOLADURAS EN DESARROLLO Y PREPARACION	64
VETA MARIANA CENTRAL	66
4.1 PRUEBA 1 “MC425GTW”	66
4.1.1 Perforación real del frente	66
4.1.2 Control de Perforación	66
4.1.3 Adherencia al Diagrama de Perforación	67
4.1.4 Check List de Voladura	68
4.1.5 Avance de Voladura y Sobre excavación	69
4.1.6 Simulación De Distribución De Energía	69
4.1.7 Medición De La Velocidad De Detonación	71



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

4.1.8 Medición De Vibraciones En Campo Lejano _____	71
4.1.9 Análisis Granulométrico _____	73
4.1.10 Check List Prueba 6 “MC425GB026E” _____	75
4.1.11 Resumen resultados Veta Mariana Central _____	75
VETA EMILIA _____	76
4.2.1 Simulación de Isolineas Prueba 2 “EM475RPA” _____	76
4.2.2 Simulación de Isolineas Prueba 7 _____	77
4.2.3 Carga del arranque Prueba 7 _____	77
4.2.4 Check List de Voladura Prueba 7 “EM425RPA” _____	78
4.2.5 Resumen resultados Veta Mariana Central _____	78
VETA MARIANA NORTE _____	79
4.3.1 Resumen Resultados Veta Mariana Norte _____	79
VETA SAN MARCOS _____	79
4.4.1 Resumen Resultados Veta San Marcos _____	79
CAPITULO 5 _____	80
ANALISIS DE RESULTADOS _____	80
CAPITULO 6 _____	93
ANALISIS ECONOMICO _____	93
CAPITULO 7 _____	99
CONCLUSIONES _____	99
RECOMENDACIONES _____	101
BIBLIOGRAFIA _____	103
ANEXO I: TEORIA DE VIBRACIONES INDUCIDAS POR VOLADURA _____	104
ANEXO II: PROCEDIMIENTOS DE MEDICIONES TECNICAS _____	108



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Ubicación Geográfica del Yacimiento	11
Figura 2.	Accesos al proyecto.	11
Figura 3.	Distrito Cerro Negro: ubicación de los principales depósitos	12
Figura 4.	Perforación descendente de cámara para el método de explotación	14
Figura 5.	Diagrama de perforación Chimenea de cara libre	15
Figura 6.	Vista longitudinal/transversal chimenea de cara libre	15
Figura 7.	Desarrollo de detonación. (Manual práctico de voladura EXSA, 2019)	17
Figura 8.	Proceso de detonación de una carga explosiva. (López Jimeno, 2004)	19
Figura 9.	Sistema de fases inmiscibles (Explosivos industriales)	20
Figura 10.	Influencia del diámetro de la carga sobre la VOD. (Ash, 1977)	21
Figura 11.	VoD vs Diámetro de carga. (Ash, 1977)	23
Figura 12.	Reducción de los costos de operación con el factor de carga	25
Figura 13.	Componentes del detonadore no eléctrico. (Manual EXSA)	28
Figura 14.	Sistema de transmisión. (Manual práctico de voladuras EXSA, 2019)	28
Figura 15.	Zonas Mineralizadas	30
Figura 16.	Diagrama estándar Vetas Marianas y Eureka (Previo al análisis)	34
Figura 17.	Diagrama de Perforación estándar Veta San Marcos	35
Figura 18.	Diagrama Arranque Centro estándar pruebas (Vetas Marianas/Eureka)	37
Figura 19.	Diagrama Izquierda estándar pruebas (Vetas Marianas/Eureka)	39
Figura 20.	Diagrama Derecha estándar para pruebas (Vetas marianas y Eureka)	39
Figura 21.	Carga Explosiva estándar Vetas Marianas y Eureka (Previo al análisis)	40
Figura 22.	Carga Explosiva Diagrama de Perforación estándar Veta San Marcos	41
Figura 23.	Carga Explosiva Diagrama Arranque Centro estándar pruebas	42
Figura 24.	Carga Explosiva Diagrama Arranque Izquierda/Derecha para pruebas	42
Figura 25.	Modelo de carga estándar para 3,8 metros (Vetas Marianas y Eureka)	44
Figura 26.	Modelo de Carga estándar para 4,5 metros (Vetas Marianas y Eureka)	44
Figura 27.	Simulación de Energía Modelo de Carga Arranque Centro estándar	46
Figura 28.	Simulación de Energía para Voladura Real	47
Figura 29.	Secuencia de Detonación estándar Vetas Marianas y Eureka	48
Figura 30.	Secuencia de Detonación estándar Veta San Marcos	49
Figura 31.	Secuencia de Detonación Arranque Centro estándar	49
Figura 32.	Secuencia de Detonación Arranque Izquierda/Derecha estándar	50
Figura 33.	Simulación de Isolineas Diagrama Arranque Centro/Izquierda/Derecha	51
Figura 34.	Simulación de Isolineas a Secuencia de Campo	52
Figura 35.	Medición de longitud de perforación mediante cinta métrica	54
Figura 36.	Distanciómetro laser	54
Figura 37.	Verificación de longitud de perforación mediante taqueador	54
Figura 38.	Control de paralelismo de perforacion.	55



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Figura 39.	Control de paralelismo de perforación	55
Figura 40.	Control de Burden y espaciamiento para el arranque	56
Figura 41.	Estructura de check list implementado en voladuras	57
Figura 42.	Estructura de reporte de voladura	58
Figura 43.	Especificaciones técnicas de tacos de arcilla	59
Figura 44.	Caja de tacos inertes	59
Figura 45.	Longitud de taco	60
Figura 46.	Utilización de tacos en el arranque	60
Figura 47.	Registro fotográfico para medición de fragmentación	63
Figura 48.	Perforación real del frente Prueba 1	66
Figura 49.	Chequeo de Burden/Espaciamiento Prueba 1	67
Figura 50.	Adherencia Diagrama de Perforación Teórico Prueba 1	67
Figura 51.	Check List Prueba 1	68
Figura 52.	Simulación De Distribución De Energía Prueba 1	70
Figura 53.	Velocidad de Detonación Prueba 1	71
Figura 54.	Medición de Vibración Prueba 1	72
Figura 55.	Daño en estructuras delicadas según Norma DIN 4150	72
Figura 56.	Registro fotográfico Prueba 1	74
Figura 57.	Distribución granulométrica Prueba 1	74
Figura 58.	Check List Prueba 6	75
Figura 59.	Simulación de isocargas Prueba 2	76
Figura 60.	Simulación de Isocargas Prueba 7	77
Figura 61.	Carga del Arranque Prueba 7	77
Figura 62.	Check list Prueba 7	78
Figura 63.	Factor de Carga por Numero de Prueba	82
Figura 64.	Longitud de Perforación y Avance medidos en análisis	84
Figura 65.	Rendimiento de Avance Por Prueba	84
Figura 66.	Sobre Excavación por prueba	86
Figura 67.	Adherencia Diagrama Teórico Por Prueba	87
Figura 68.	Base de datos de Velocidad de Detonación	88
Figura 69.	Base de datos de Fragmentación	89
Figura 70.	P80 Obtenido por Prueba	90
Figura 71.	Velocidad de Detonación por Prueba	91
Figura 72.	Velocidad de detonación VS Rendimiento de Avance	91
Figura 73.	PPV por prueba	92
Figura 74.	Comparación Costos Diagrama antiguo VS empleado en pruebas	94
Figura 75.	Ahorro por prueba	95
Figura 76.	Costo teórico de detonadores VS Costo Real.	97
Figura 77.	Ahorro costo de detonadores en prueba	98



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Figura 78.	Ubicación del coax strip sobre el cable coaxil	109
Figura 79.	Corte del cable coaxil	110
Figura 80.	Corte del conductor interno	110
Figura 81.	Corte de la lámina dieléctrica	110
Figura 82.	Colocación de ficha conectora	111
Figura 83.	Sujeción de ficha	111
Figura 84.	Conexión del cable coaxil al cebado	112
Figura 85.	Colocación del cable coaxil en el pozo	112
Figura 86.	Encendido del equipo	113
Figura 87.	Conexión del cable al equipo	113
Figura 88.	Nivel de batería del equipo	113
Figura 89.	Medición de longitud del cable	114
Figura 90.	Autoconfiguración del equipo/Modo espera	114
Figura 91.	Minimate Pro 4.	116
Figura 92.	Geófono	116
Figura 93.	Toma de fotografías	118
Figura 94.	Análisis granulométrico mediante software	119



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Base de datos de sobre excavación	32
Cuadro 2.	Parámetros teóricos diagrama estándar: Vetas Marianas y Eureka	34
Cuadro 3.	Parámetros teóricos diagrama estándar: Veta San Marcos	35
Cuadro 4.	Parámetros teóricos diagrama de perforación estándar	37
Cuadro 5.	Comparación Diagrama de perforación teórico VS propuesta	38
Cuadro 6.	Parámetros teóricos Diagrama de Perforación estándar	38
Cuadro 7.	Modelos de Carga Diagrama de Perforación estándar Vetas Marianas	43
Cuadro 8.	Modelo de Carga Diagrama de Perforación pruebas Veta San Marcos	45
Cuadro 9.	Modelos de Carga Diagrama de Perforación Arranque Centro estándar	45
Cuadro 10.	Modelos de Carga Diagrama Perforación Arranque Izquierda/Derecha	45
Cuadro 11.	Resumen siglas de labores	53
Cuadro 12.	Clasificación del estado de los frentes	53
Cuadro 13.	Matriz de evaluación de condiciones de frentes	53
Cuadro 14.	Rango típico de VOD para la emulsión empleada	61
Cuadro 15.	Características técnicas de emulsión utilizada	62
Cuadro 16.	Valores máximos de PPV norma DIN 4150	62
Cuadro 17.	Avance y sobre excavación reportados Prueba 1	69
Cuadro 18.	Resumen de las vibraciones medidas	73
Cuadro 19.	Resumen Resultados Veta Mariana Central	75
Cuadro 20.	Resumen resultados Veta Mariana Central	78
Cuadro 21.	Resumen Resultados Veta Mariana Norte	79
Cuadro 22.	Resumen Resultados Veta San Marcos	79
Cuadro 23.	Tabla Resumen resultados Pruebas	80
Cuadro 24.	Base de Datos de Factor de Carga y Rendimiento de Avance	81
Cuadro 25.	Resumen Factor de Carga Teórico	82
Cuadro 26.	Sobre excavación en pruebas para Vetas Marianas	85
Cuadro 27.	Resumen Costos Matriz en pruebas realizadas.	93
Cuadro 28.	tipos de daños inducidos por tronadura	106
Cuadro 29.	Análisis granulométrico por software en formato xls (Excel).	119



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar los resultados de las voladuras en labores subterráneas de sección completa, mediante la reducción del factor de carga, tanto en frentes de mineral como de estéril.

Esta reducción del factor de carga se realizó mediante modificaciones de los modelos de carga y diagramas de perforación vigentes previo al estudio; con el objetivo de generar el ahorro en el consumo de explosivos, disminución la sobre excavación y las vibraciones generadas.

Se realizaron 10 (diez) pruebas, para las cuales se empleó la misma metodología de trabajo (cuantitativa y cualitativa), donde se efectuaron implementaciones en el proceso con el objetivo de recopilar información de las voladuras. Se compararon los resultados obtenidos en las pruebas realizadas respecto a los valores pertenecientes a la base de datos del socio estratégico.

Las voladuras fueron realizadas por una empresa contratista especialista en explosivos, la cual fue la encargada de la fabricación fuera de sitio, transporte y manipulación de los mismos, mientras que la empresa operadora del proyecto ejecutó las demás etapas del proceso minero.

Se empleó un sistema de carguío semi - mecanizado de emulsión, que presenta características diferentes de los explosivos tradicionales (ANFOs y altos explosivos), por lo cual se llevaron a cabo simulaciones y mediciones técnicas para obtener indicadores del comportamiento del explosivo en las voladuras.

Para la obtención de estos indicadores se realizaron simulaciones de distribución de energía teórica mediante la utilización software específicos, determinación de la velocidad de detonación mediante equipo “VOD ShotTrack 305”, medición de la fragmentación obtenida (P_{80}) a través de registros fotográficos del material volado y software de análisis granulométrico y vibración en campo lejano utilizando equipos “Minimate Pro 4”, control de sobre



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

excavación, control de la perforación, etc. Dichas mediciones técnicas y simulaciones permitieron establecer el comportamiento del explosivo durante las voladuras y eficiencia de resultados posteriores.

Finalmente, se realizó el análisis económico de los resultados con respecto a los valores actuales, para determinar el ahorro anual obtenido con la aplicación de la metodología planteada.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the results of blasting in full-section underground works, by reducing the load factor, both in ore and sterile fronts.

This reduction in load factor was carried out through modifications of the load models and drilling diagrams in force prior to the study; With the aim of generating savings in the consumption of explosives, reducing over-excavation and vibrations generated.

10 (ten) tests were carried out, for which the same work methodology (quantitative and qualitative) was used, where implementations were made in the process with the aim of collecting information from the blasts. The results obtained in the tests carried out with respect to the values belonging to the database of the strategic partner were compared.

The blasts were carried out by a contractor specialized in explosives, which was responsible for the off-site manufacturing, transport and handling of the same, while the company operating the project executed the other stages of the mining process.

A semi-mechanized emulsion loading system was used, which has different characteristics from traditional explosives (ANFOs and high explosives), for which simulations and technical measurements were carried out to obtain indicators of the behavior of the explosive in blasting.

To obtain these indicators, simulations of theoretical energy distribution were carried out through the use of specific software, determination of the detonation velocity by means of "VOD ShotTrack 305" equipment, measurement of the fragmentation obtained (P80) through photographic records of the flown material and software of granulometric analysis and vibration in far field using equipment "Minimate Pro 4", control of over excavation, control of drilling, etc. These technical measurements and simulations allowed to establish the behavior of the explosive during blasting and efficiency of subsequent results.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Finally, the economic analysis of the results with respect to current values was carried out, to determine the annual savings obtained with the application of the proposed methodology.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

CAPITULO 1

INTRODUCCION

En la minería actual, las prioridades de las voladuras subterráneas son la productividad, disminución de costos y la seguridad de los trabajadores, en ese sentido, la tecnología usada en el proceso de fabricación, carga y voladura de explosivos fue evolucionando para lograr esos objetivos. En esta evolución constante surgen en el mercado nuevos productos, buscando mejorar aspectos de eficiencia y seguridad.

Al utilizar explosivos, se busca su eficiencia en los resultados de las voladuras: fragmentación apropiada para la planta, proyección adecuada, vibraciones generadas, entre otros factores; los cuales están en función de las características del explosivo y condiciones geomecánicas del yacimiento; como: tipo de mineral, roca de caja, dureza, fallas estructurales, alteraciones, presencia de agua, etc.

La manipulación y almacenamiento de explosivos en minería subterránea juega un papel importante en la seguridad, donde surge la necesidad de emplear matrices, que presentan condiciones seguras de transporte y manipulación, al tratarse únicamente del material base del explosivo, no presenta propiedades explosivas hasta que se inicia la carga del primer taladro.

Las características de las emulsiones explosivas dependen de distintos factores: presión, temperatura a la cual se trabaja, velocidad de detonación, etc.; por lo que es necesario llevar un control por medio de mediciones que permitan analizar su comportamiento y los resultados obtenidos en las voladuras.

Las emulsiones se cargan mediante un sistema semi/mecanizado, facilitando realizar un control de las condiciones de trabajo, su consumo en las voladuras y analizar del costo asociado a este tipo de explosivo.

Al usar emulsiones explosivas es conveniente definir un modelo de carga para las labores de sección completa, buscando aprovechar eficientemente la energía asociada; permitiendo establecer el consumo teórico de explosivo para



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

condiciones estándar (cantidad de taladros y longitud de perforación promedio), que resulta fundamental para su posterior análisis económico.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la incidencia técnica/económica de la reducción del factor de carga en voladuras de labores horizontales subterráneas de sección completa en diferentes sectores del proyecto minero objeto de este estudio.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar las mediciones empleadas en la actualidad para la obtención de KPI's del proceso de voladura.
- Determinar los recursos necesarios para la realización de las diferentes mediciones a emplear.
- Determinar los procedimientos de utilización de equipos de medición.
- Realizar un análisis del rendimiento de avance en labores horizontales subterráneas de sección completa ante la reducción del factor de carga.
- Efectuar un análisis de la fragmentación obtenida en las voladuras de labores subterráneas de sección completa con la disminución del factor de carga.
- Llevar a cabo un análisis económico ante la reducción del factor de carga.

1.3 ALCANCES Y LIMITACIONES

La principal limitación del análisis es la restricción a divulgación de información referente a la empresa contratista que ejecuta el proceso de carga y voladura, la cual tiene carácter confidencial; por tal motivo no se puede brindar.

A la fecha de realizado el presente estudio, el proyecto cuenta con tres (3) vetas, estas corresponden a veta complejo Marianas, conformada por la veta principal Mariana Central, Mariana Norte y Emilia. La segunda corresponde a veta Eureka, actualmente en ambas se ejecutan tareas de



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

preparación/producción. Y la tercera corresponde a veta San Marcos, que ejecuta únicamente actividades de desarrollo en estéril.

Se realizaron mediciones técnicas en dichos sectores de manera aleatoria, sin embargo, como se observará en las pruebas ejecutadas, predominan las mediciones en material estéril; esto se debe a que la proporción de voladuras promedio en una campaña en estéril es mayor a las efectuadas en mineral. Se debe considerar adicionalmente que la presencia frecuente de fallas estructurales en las labores de mineral dificulta la realización de mediciones técnicas de manera simultánea.

La empresa especialista en explosivos inicio sus actividades en el proyecto a mediados del año 2020, periodo previo a este estudio, a partir del cual, el socio estratégico solicitó generar una base de datos en un lapso de seis (6) meses. La cual incluyó: factor de carga real y teórico de todas las voladuras de desarrollo y preparación, longitud promedio de perforación teórica, y real, avance real, rendimiento de avance, sobre excavación, consumo de explosivo, tonelaje volado, cantidad de taladros perforados, etc. La misma se empleó como herramienta comparativa respecto a los periodos siguientes, estableciéndose como KPI's (indicadores clave de la eficiencia). Se destaca que la longitud de avance real y la sobre excavación son reportadas por el área de topografía perteneciente al cliente. Los datos analizados en este estudio fueron comparados con dicha base para establecer si las metodologías de trabajo aplicadas generaron mejoras del proceso. Se incluye en el estudio del caso, la reducción del factor de carga mediante la aplicación de modelos de carga estandarizados por las dimensiones de las secciones, implementación de check list de voladura y secuencias de detonación estándar etc.

El análisis se encuentra restringido únicamente a labores horizontales subterráneas de sección completa de los diferentes sectores del proyecto, independientemente del tipo de material (estéril o mineral). Aunque la reducción del factor de carga se aplicó a toda voladura de labor horizontal, no se consideraron las voladuras de labores cuyas secciones incluyeron taladros



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

adicionales respecto a los parámetros establecidos en los diagramas estándar de perforación (taladros de levante, rebaje, desquinche, apertura, etc.).

El número de mediciones realizadas por campaña consistió en:

- Dos (2) mediciones de velocidad de detonación.
- Dos (2) mediciones de vibración en campo lejano.
- Dos (2) análisis de fragmentación.

Establecido mediante previo acuerdo con el cliente, lo que limitó la evaluación de todos los aspectos de la eficiencia de las voladuras en los sectores considerados para el análisis, ya que frecuentemente se solicitó que dichas mediciones se realicen en distintas labores para incrementar la representatividad.

El modelo de carga empleado en labores de desarrollo y preparación, respetará siempre un mismo esquema, usando emulsión explosiva, que será iniciada mediante un detonador y un Booster.

Las operaciones unitarias de perforación, limpieza, ventilación, fortificación son realizadas por la compañía cliente, mientras que el proceso de carga y voladura es efectuado por la empresa prestadora de dicho servicio.

La empresa especialista en voladuras no puede realizar modificaciones en los diagramas de perforación teóricos (implementados y modificados por el área de perforación del socio estratégico) para los diferentes sectores del proyecto. El diámetro de perforación empleado está limitado a 51 mm.

Se contó con materiales, herramientas, softwares y equipos disponibles por parte la empresa especialista en explosivos.

1.4 METODOLOGIA DE TRABAJO

El método para desarrollar el trabajo contempla una serie de etapas que describen los pasos más importantes del proceso:

- 1) Análisis de la información y Capacitación de personal.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

- Observación de los diagramas de perforación estándar de los diferentes sectores del proyecto y sus posteriores modificaciones por parte de la empresa cliente.
- Examinar las secuencias de detonación estándar asociadas a las modificaciones de los diagramas de perforación.
- Analizar el modelo de carga precedente e interpretar las modificaciones ejecutadas sobre este con el objetivo de reducir el factor de carga y disminuir la sobre excavación.
- Interpretación de base de datos de KPI's.
- Revisión de base de datos de mediciones técnicas.
- Identificación de problemáticas del proceso de voladura.
- Brindar capacitación a trabajadores de la empresa respecto al registro de datos y metodología de trabajo.

2) Planteamiento de propuestas para mejoras:

- Creación e implementación de check list de voladura para llevar registro de las condiciones del sector y carga del explosivo.
- Establecer la implementación de reportes de voladura con el objetivo de resumir la información de la voladura para su posterior envío al cliente.
- Modificar el diagrama de perforación y modelo de carga teórico para Vetas Marianas/Eureka para disminuir el factor de carga.
- Modificar el modelo de carga de Veta San Marcos para disminuir el factor de carga sin variar su diagrama de perforación.
- Corregir la secuencia de detonación a emplear en función de las modificaciones del diagrama de perforación y analizar dicha secuencia mediante simulación de líneas de Isotiempo.
- Establecer la utilización de tacos de arcilla en taladros del arranque.

3) Recolección de datos:



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

- Relevamiento de datos en interior de mina de sectores a volar: cantidad de taladros perforados/no perforados, taladros tapados, fecha, sección, secuencia de detonación utilizada, calidad de perforación, etc.
- Recopilación de información asociada a los resultados de las voladuras.
- Concretar mediciones de velocidad de detonación y vibración en campo lejano en interior de mina.
- Realizar registros fotográficos en interior de mina y superficie para su posterior análisis granulométrico mediante software.
- Ejecutar simulaciones de distribución de energía teórica de labores a volar.

4) Registro de valores medidos

- Determinación de valores de mediciones técnicas realizadas mediante softwares correspondientes y su posterior registro en la base de datos.
- Generación de reporte de medición para su envío al cliente.

5) Análisis de resultados:

- Analizar los resultados obtenidos en las pruebas.
- Brindar recomendaciones para contribuir a la mejora del proceso de mediciones técnicas y control de perforación.
- Conclusiones.

1.5 GENERALIDADES

1.5.1 Ubicación geográfica del yacimiento

El distrito del proyecto está ubicado en el complejo Volcánico Bahía Laura en el noroeste del Macizo del Deseado, a unos 50 km al sureste de la localidad de Perito Moreno, en la provincia de Santa Cruz (Patagonia, Argentina).

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

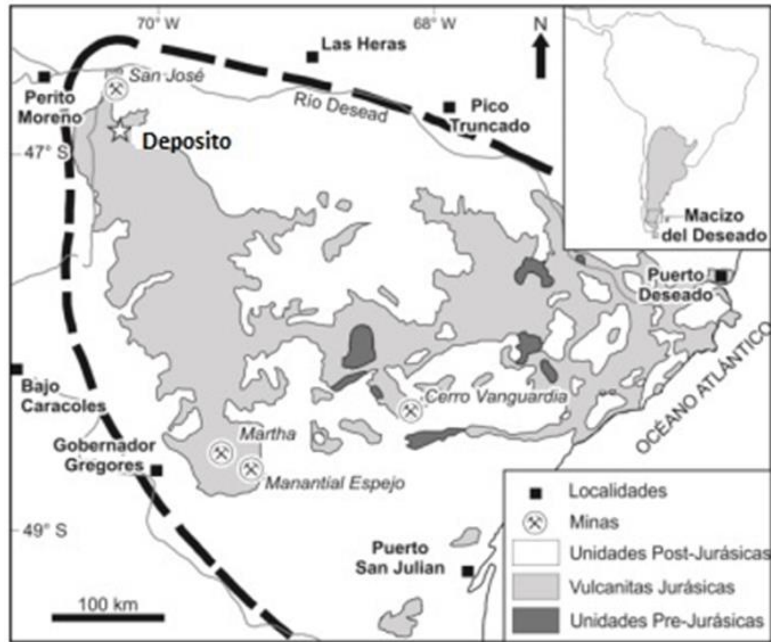


Figura 1. Ubicación Geográfica del Yacimiento

Se ingresa a través de ruta provincial 43, empalmando posteriormente con la ruta provincial 39, la cual cuenta con 2 accesos, ya sea desde la cuesta de Saladito, o bien, desde el Puerto Andacollo hacia el kilómetro 18, donde empalma con una ruta de tierra que conecta con el yacimiento y que recorre una distancia de aproximadamente 26 kilómetros (figura 2).



Figura 2. Accesos al proyecto.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

1.5.2 Geología

La geología de este distrito está representada por rocas del Complejo Volcánico Bahía Laura con edades que van desde los 156 a los 159 Ma (López, 2006). La secuencia se inicia con lavas andesíticas que están intercaladas con ignimbritas dacíticas e instruidas por cuerpos de composición andesítica.

El depósito epitermal representa el mejor ejemplo de depósitos de oro/plata de alta ley pertenecientes al Modelo Geotermal del Macizo del Deseado, con preservación de los dos subtipos (proximal y distal a intrusivos).

El distrito está compuesto por sistemas de vetas y brechas hidrotermales asociados a una alteración hidrotermal regional. El depósito está conformado por 5 sistemas de vetas principales, de las cuales 3 se encuentran en explotación/preparación: Eureka, Marianas y San Marcos hacia el oeste, alojadas en lavas e intrusivos andesíticos-dacíticos.

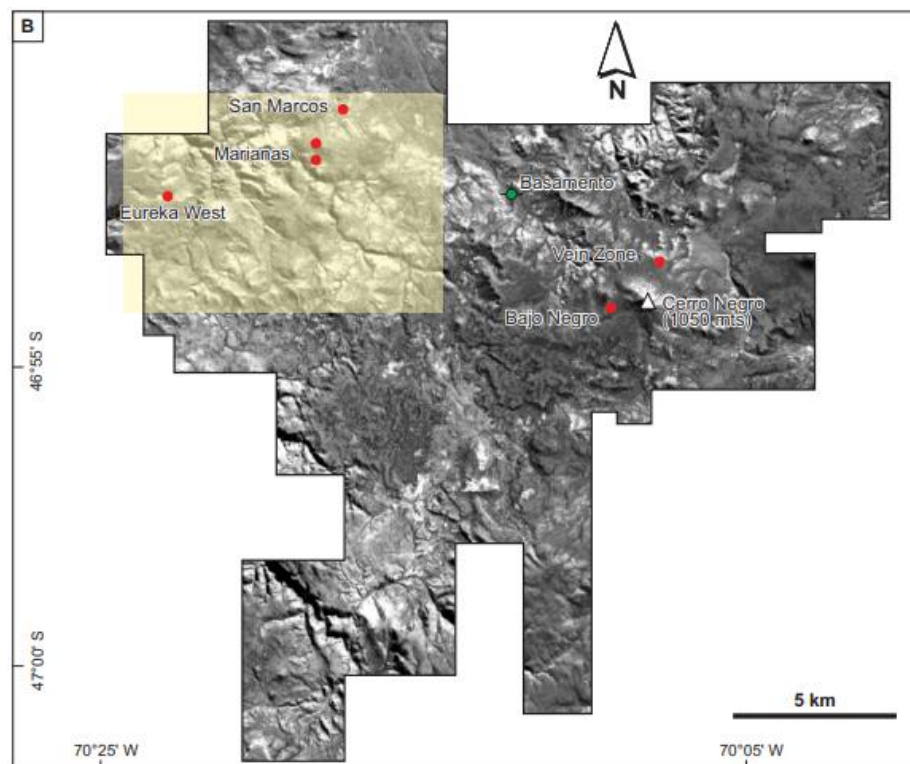


Figura 3. Distrito Cerro Negro: ubicación de los principales depósitos de Au-Ag.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

1.5.3 Mineralogía

Comprende un conjunto de mineralizaciones vetiformes epitermales de oro y plata con reservas estimadas en 6,7 millones de onzas de oro equivalente.

Vetas Marianas y San Marcos:

El sistema Marianas-San Marcos está conformado por vetas epitermales de cuarzo-adularia-esmectita con mineralización de oro y plata, compuesto mayormente por texturas coliformes-crustiformes agrupadas en 4 episodios principales, siendo 3 de naturaleza hidrotermal y el último de tipo tectónico-hidrotermal. La mineralización principal de metales preciosos se encuentra asociada a bandas tipo ginguro ricas en sulfuros y sulfosales de plata con metales base. La signatura geoquímica de las vetas corresponde a oro, plata, arsénico, antimonio, cinc, plomo, selenio y mercurio, con una relación plata/oro 10:1. La alteración hidrotermal incluye cuarzo, adularia, illita, esmectita, illita-esmectita y clorita.

Las vetas Marianas-San Marcos se clasifican como depósitos epitermales de metales preciosos de tipo baja sulfuración.

Veta Eureka

Las mineralizaciones corresponden a cuerpos vetiformes de rumbo NO y EO con longitudes, espesores y contenidos en metales preciosos excepcionales. Eureka es la veta más importante del distrito y del Macizo del Deseado, con una longitud de hasta 5 km y espesores de hasta 20 metros. En el extremo oeste, conocido como clavo Eureka West, se reconocieron tres etapas: hidrotermal, tectónica, y supergénica. En la etapa hidrotermal predominan los bandeados crustiforme-coloformes de cuarzo-calcedonia, adularia y carbonatos de Fe-Mn con un progresivo aumento de sílice y una disminución en el tamaño de las bandas.

1.5.4 Método de explotación

Se ha adoptado el método de explotación por caserones transversales con relleno o “transversal stopping”. Las cámaras se separan cada veinticinco (25)

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

metros verticales. Se tienen galerías de acceso, que conectan con una galería de transporte y desde allí, mediante cruzados dispuestos cada treinta (30) metros horizontales, mediante los cuales se accede al mineral (Galería basal), diariamente se efectúan 49 metros de desarrollo y preparación, con su correspondiente preparación e infraestructura, que delimitan las unidades de explotación, conocidas como cámaras, caserones o tajeos, que son transversales o longitudinales según lo permita la potencia de la veta). Las voladuras son efectuadas en planos verticales, con taladros largos paralelos y/o radiales. Las cámaras se explotan desde la galería basal con una altura de veintidós (22) metros (figura 4), produciendo 3500 toneladas diarias de mineral, estas son rellenas con material cementado o detrítico.

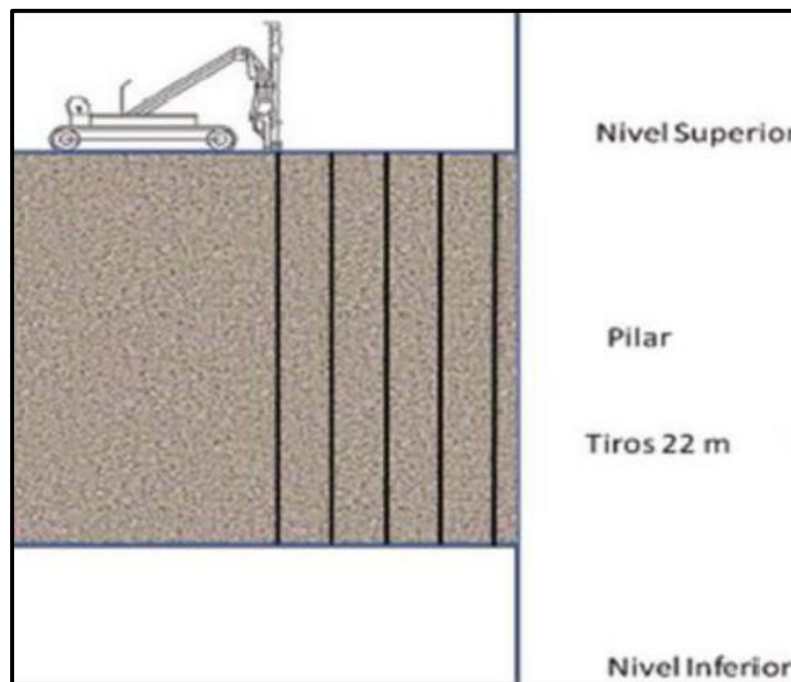


Figura 4. Perforación descendente de cámara para el método de explotación “transversal stopping” (Manual de Túneles y Obras Subterráneas". Carlos López Jimeno)

El método de explotación seleccionado para la operación en las vetas cuya potencia sea mayor a ocho (8) metros, es de Sublevel Stopping con relleno. Las vetas cuya potencia es menor a los ocho (8) metros se explotará usando el método Sublevel Retrieve. Ambos métodos contemplan que las cámaras, una vez explotadas, deberán de ser rellenas.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

En la apertura de la cara libre (figura 5) se perforan taladros paralelos e inclinados para las chimeneas en forma descendente o ascendente dependiendo de la metodología de minado del sector. En forma descendente se perfora la totalidad de la cámara buscando comunicar con el nivel inferior. En forma ascendente se perforan aproximadamente 12 metros para la primera voladura. La cantidad de voladuras depende del tipo de roca, buzamiento de la veta, diagrama utilizado, equipo de perforación, diámetro de perforación, tipo de explosivo.

Las voladuras proyectan la roca hacia la cara libre previamente preparada, que consiste en una chimenea ubicada en uno o ambos extremos y que conectan dos subniveles de diferente cota, las cuales delimitan la cámara, como se muestra en la figura 6.

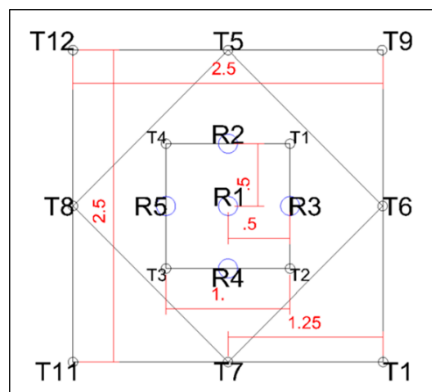


Figura 5. Diagrama de perforación Chimenea de cara libre

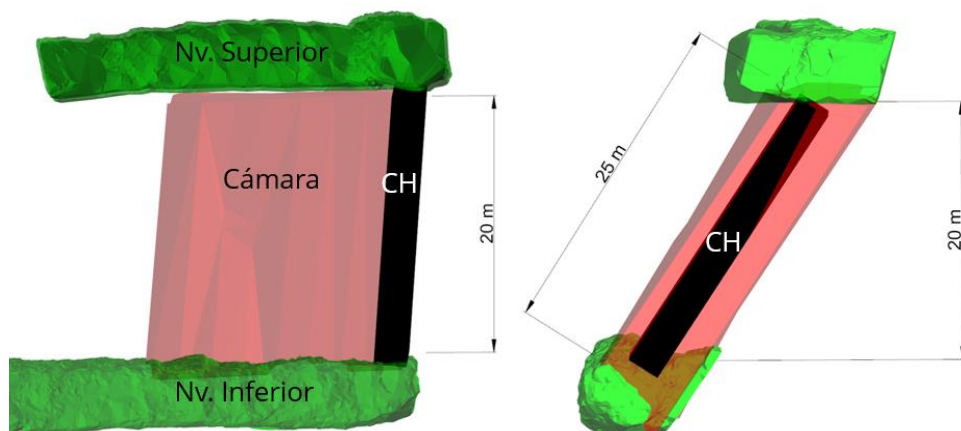


Figura 6. Vista longitudinal/transversal chimenea de cara libre



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

CAPITULO 2

MARCO TEORICO REFERENCIAL

2.1 Explosivos

Los explosivos industriales son una mezcla de sustancias combustibles y oxidantes que, incentivadas debidamente, dan lugar a una reacción exotérmica muy rápida, que genera una serie de productos gaseosos a alta temperatura y presión, que generando un volumen aproximadamente 1.000 a 10.000 veces mayor que el original.

2.2 Objetivo de los explosivos en minería

El objetivo de la utilización de explosivos en el arranque de rocas¹ es disponer de su energía concentrada químicamente, de forma que, liberada de un modo controlado se logre la fragmentación del macizo rocoso in situ².

2.3 Procesos de reacción y detonación de un explosivo

Los procesos de reacción de los explosivos según su carácter fisicoquímico y el tiempo en el que se realizan se clasifican en:

- **Combustión:** Toda reacción química capaz de desprender calor y que presenta un tiempo de reacción bastante lento.
- **Deflagración:** Combustión súbita con llama a baja velocidad de propagación, sin explosión. Es un fenómeno en el que el frente de deflagración se propaga a una velocidad baja.
- **Detonación:** Proceso fisicoquímico con gran velocidad de reacción y formación de productos gaseosos a elevada temperatura que adquieren una gran fuerza expansiva. Velocidades de reacción entre 1.500 y 7.000 m/s, según la composición del explosivo y condiciones de iniciación.

Los explosivos que detonan transmiten su calor por medio de una onda de choque, deformando la zona inalterada de la carga, provocando que esta

¹ Arranque de rocas: Rotura de rocas in situ.

² Roca in situ: Roca en su ambiente original.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

aumente su temperatura y una explosión con generación de nuevos gases. El proceso se repite con un movimiento ondulatorio que afecta a toda la masa de la carga explosiva y es la denominada “onda de choque”.

A la vez que se produce esta onda, la masa de explosivo que ha reaccionado genera una gran cantidad de gases a una elevada temperatura. Si esta presión secundaria actúa sobre el resto de la masa sin detonar, su efecto se suma al de la onda de presión primaria, pasando de una etapa de deflagración a otra de detonación a través de un proceso de transición que tiene lugar a alta velocidad (figura 7).



Figura 7. Desarrollo de detonación. (Manual práctico de voladura EXSA, 2019)

Un carácter determinante de la onda de choque en la detonación es que una vez que alcanza su nivel de equilibrio (temperatura, velocidad y presión), este se manifiesta durante todo el proceso, por lo cual se dice que es auto sostenida, mientras que la onda deflagrante tiende a amortiguarse hasta prácticamente extinguirse, de acuerdo con el factor tiempo/distancia a recorrer.

Si la onda de presión de los gases actúa en sentido contrario a la masa de explosivo sin detonar, se produce una deflagración lenta, ralentizándose la reacción explosiva de forma que al ir perdiendo energía la onda de detonación primaria es incapaz de iniciar el resto de la masa de explosivo, produciéndose la detención de la detonación. Esto se observa en la expresión de la presión



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

máxima de la onda explosiva (presión generada por la onda de choque en la detonación):

$$PD = \delta_e * VOD * W$$

Donde:

- PD : Presión de detonación.
- δ_e : Densidad del explosivo.
- VOD : Velocidad de detonación.
- W : Velocidad de partículas (productos).

Tanto en la deflagración como en la detonación, la turbulencia de los productos gaseosos da lugar a la formación de la onda de choque. La región de esta onda donde la presión se eleva rápidamente se llama “frente de choque”.

Por detrás del frente de choque, se forma una zona de reacción primaria, que queda delimitado por un plano ideal, que se denomina “Plano Chapman-Jouguet (CJ)”, en el cual la reacción alcanza su nivel de equilibrio (figura 8). Donde se deduce la ecuación fundamental conocida como “Condición de Chapman-Jouguet”:

$$VOD = S + W$$

Donde:

- VOD : Velocidad de detonación.
- S : Velocidad del sonido.
- W : Velocidad de partículas (productos).

Donde se deduce que cuando W tiene un valor negativo, es decir cuando las partículas se mueven en el sentido contrario al avance de la reacción de óxido-reducción, se tendrá que $VOD < S$, lo que significa que la velocidad de avance

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

de la reacción es menor que la velocidad del sonido. En este caso se tiene un fenómeno de deflagración subsónica.

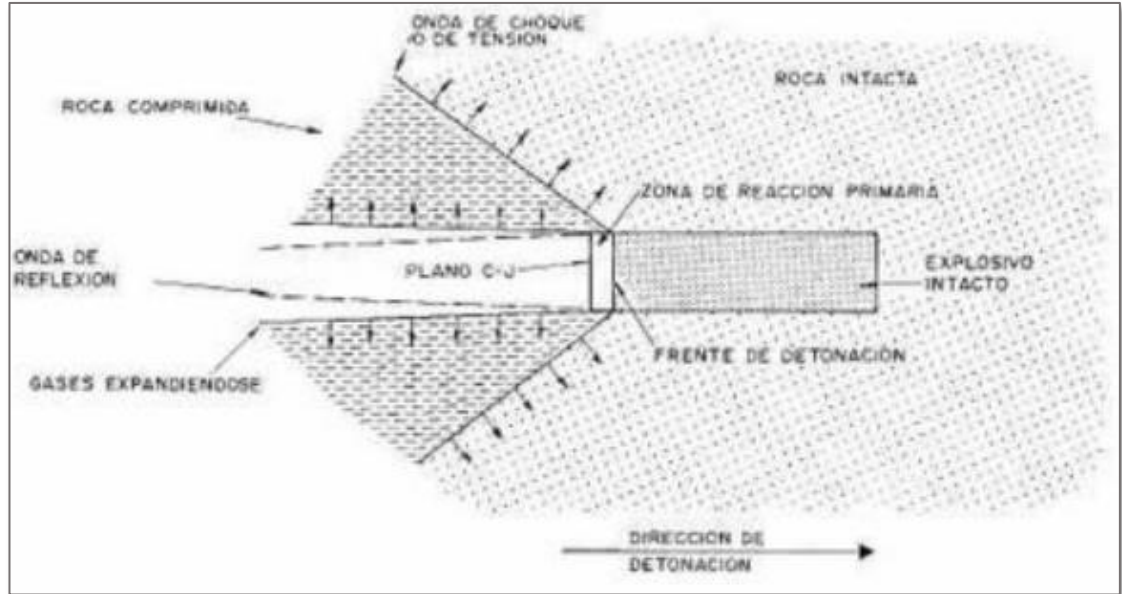


Figura 8. Proceso de detonación de una carga explosiva. (López Jimeno, 2004)

Se resume el proceso de detonación en un conjunto de etapas:

- 1) Detonación: Generada por un detonador³ que suministra (junto con un Booster generalmente) la energía necesaria para iniciar la carga explosiva del taladro generando una onda de choque inicial.
- 2) La onda de choque genera fracturas en el macizo rocoso
- 3) La onda avanza a alta velocidad originando la reacción de la masa, inicialmente en un punto.
- 4) Luego este punto se amplía hasta ocupar el diámetro total del explosivo, donde este adquiere su velocidad máxima de detonación (VOD).
- 5) Los gases en expansión, ocupan el espacio de las grietas y producen la fragmentación del material circundante al taladro, el cual también es comprimido por los gases, provocando que los fragmentos de roca tiendan a desplazarse hacia la cara libre. Este proceso se repite para la detonación de cada taladro de forma cíclica.

³ Detonador: dispositivo iniciador de cargas explosivas.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

2.4 Emulsiones explosivas

Las emulsiones consisten en un sistema que contiene dos fases líquidas naturalmente inmiscibles entre sí, una de las cuales se dispersa como pequeñas gotas (fase discontinua) dentro de la otra (fase continua). Este sistema requiere además otras sustancias (emulsificantes) para mejorar su estabilidad (figura 9).

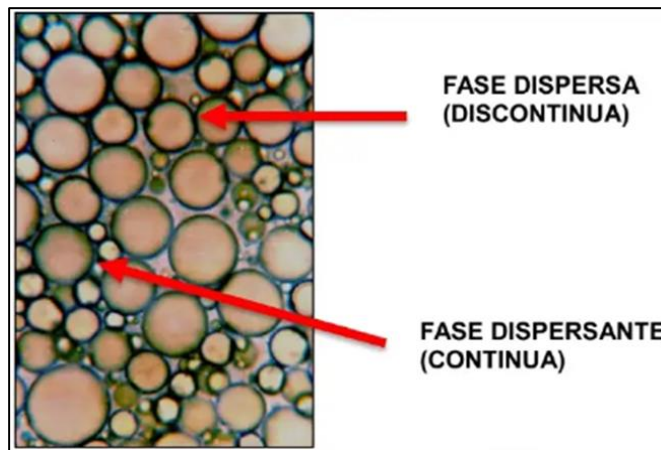


Figura 9. Sistema de fases inmiscibles (Explosivos industriales, Universidad católica Del Perú, 2014)

El aire contenido en las microesferas al ser violentamente comprimido por la presión de la onda de choque iniciadora, se calienta, produciendo un efecto denominado de puntos calientes (hot spots), que hacen detonar la emulsión.

Sus ventajas son su alta velocidad y potencia, excelente resistencia al agua, menor sensibilidad en manipuleo y el ser inodoras (no producen cefalea). Son entonces ideales para taladros inundados y para roca dura o competente.

2.5 Propiedades de los explosivos

2.5.1 Potencia y energía

Es la medida del “contenido de energía” del explosivo y del trabajo que puede efectuar. La potencia define la energía disponible para producir efectos mecánicos. Es frecuente referir la potencia de un explosivo en tanto por ciento ANFO, al cual se le asigna el valor 100.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

2.5.2 Velocidad de detonación

Es la velocidad a la que la onda de detonación se propaga a través del explosivo y, el parámetro que define el ritmo de liberación de energía. Los factores que afectan a la velocidad de detonación son: la densidad de la carga, el diámetro, el confinamiento, la iniciación y el envejecimiento del explosivo. Para los tres primeros, conforme aumentan dichos parámetros, las velocidades de detonación resultantes crecen significativamente (figura 10).

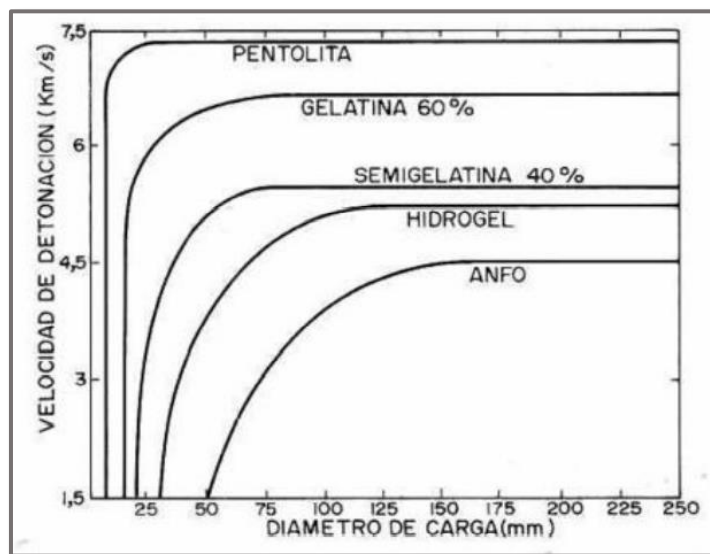


Figura 10. Influencia del diámetro de la carga sobre la VOD. (Ash, 1977)

Si iniciación no es lo suficientemente energética puede hacer que el régimen de detonación comience con una velocidad baja, y con respecto al envejecimiento, este hace que la velocidad de detonación también disminuya al reducirse el número y el volumen de las burbujas de aire, ya que son generadores de puntos calientes.

Utilidades de medir la velocidad de detonación:

- Facilita examinación cuantitativa del progreso de la detonación dentro del barreno.
- Toda comparación entre resultados de velocidad de detonación debe realizar dentro del contexto de la situación coyuntural de la voladura.
- Se deben usar datos de velocidad de detonación dentro de los límites estadísticos del caso.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Existen diversos métodos de medida de la velocidad de detonación. En este caso se considerará únicamente el método electrónico. Se basa en el periodo de tiempo transcurrido en el cual se consume una determinada longitud del rollo de cable coaxil conectado al equipo de medición, que consiste en un monitor de medición de velocidad de detonación, que tiene la capacidad de medir la longitud del cable consumido y en función del tiempo en el cual se produce la detonación en el taladro sobre el cual se realiza el estudio, mide la velocidad de detonación.

2.5.3 Densidad

La densidad de la mayoría de los explosivos varía entre 0,8 y 1,6 gr/cm^3 , y al igual que con la velocidad de detonación cuanto mayor es, más intenso es el efecto rompedor que proporciona.

En las emulsiones si la densidad es muy baja se vuelven sensibles al cordón detonante que los comienza a iniciar antes de la detonación del Booster⁴, o de lo contrario, si es muy alta, pueden hacerse insensibles y no detonar. Esa densidad limite es la denominada “densidad critica”.

2.5.4 Presión de detonación

La presión de detonación de un explosivo es función de la densidad y del cuadrado de la velocidad de detonación. Se mide en el plano “CJ⁵” de la onda de choque cuando se propaga a través de la columna de explosivo, como ya se ha indicado.

2.5.5 Estabilidad

La estabilidad de los explosivos es una de las propiedades que está relacionada con el tiempo máximo de almacenamiento de dichas sustancias para que estas no se vean mermadas en los efectos desarrollados en las voladuras. El hecho de que un compuesto químico este sujeto a una descomposición muy rápida cuando es calentado, indica que hay inestabilidad en su estructura.

⁴ Booster: Explosivo potente de alta densidad.

⁵ CJ: Chapman-Jouguet.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

2.5.6 Resistencia al agua

Es la capacidad para rechazar la penetración del agua. La unidad de medida empleada es la de “horas”. Varía de acuerdo con la composición del explosivo y generalmente está vinculada a la proporción aditivos especiales que contengan, así las emulsiones son muy resistentes al agua debido a que prácticamente no tienen poros a través de los cuales podría filtrarse el agua.

La escala de clasificación va desde: Nula, limitada, buena, muy buena y excelente. En la primera, el explosivo no tiene ninguna resistencia al agua, mientras que, en la última, garantiza una exposición superior a 12 horas.

2.5.7 Diámetro crítico

Las cargas de explosivo para las cuales la onda de choque no se propaga o si lo hace es con una velocidad muy por debajo a la del régimen, se le denomina “diámetro crítico” (figura 11).

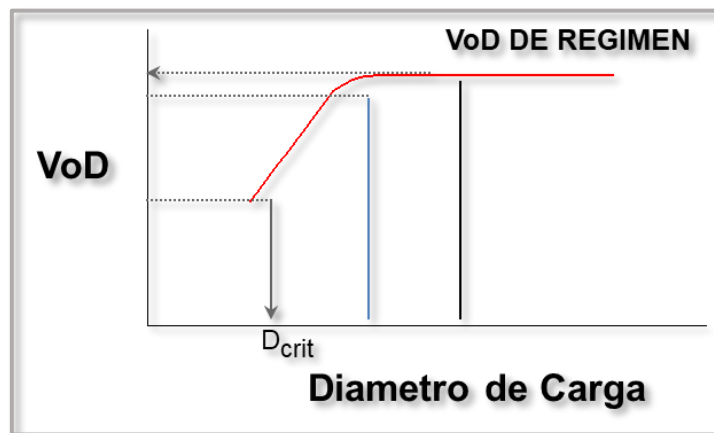


Figura 11. VoD vs Diámetro de carga. (Ash, 1977)

Los principales factores que influyen en el diámetro crítico de un explosivo son: El tamaño de las partículas, la reactividad de sus constituyentes, la densidad y el confinamiento.

Para que un explosivo detone de forma óptima, debe tener un diámetro mayor a su diámetro crítico; esto implica que el diámetro del barreno es un limitante en la elección del explosivo.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

2.5.8 Desensibilización

En muchos explosivos industriales, se ha observado que la sensibilización disminuye al aumentar la densidad por encima de un determinado valor. Este fenómeno es más característico en aquellas composiciones que no contienen sustancias como el TNT, la nitroglicerina, etc.

En la desensibilización dinámica pueden distinguirse a su vez por:

a) Desensibilización por cordón detonante

Los cordones detonantes de medio gramaje no inician correctamente a las emulsiones e incluso pueden llegar a hacerlos insensibles a otros sistemas de cebado. Este fenómeno depende en gran medida del diámetro de la carga.

b) Presión ejercida por cargas adyacentes

La desensibilización originada por la detonación de cargas adyacentes puede ser debida al:

- Paso a través de la carga de la onda de choque generada por otras adyacentes.
- Deformación lateral del barreno y consiguiente estrechamiento de la carga debido al movimiento de la roca o agua subterránea.
- Compresión de la carga por empuje del material de retacado intermedio.
- Por infiltración de los gases de explosión a través de fisuras o fracturas abiertas en el macizo.

2.5.9 Consumos específicos de explosivos

La cantidad de explosivo necesaria para fragmentar $1 m^3$ o 1 tonelada de roca, es el parámetro conocido por “consumo específico” o “factor de carga⁶”.

El factor de carga de una voladura se incrementa con:

⁶ Factor de carga: Relación masa/masa entre la cantidad de explosivo empleada para remover una (1) tonelada de material.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

- El aumento del diámetro de los taladros, la resistencia de la roca y el grado de fragmentación, desplazamiento y esponjamiento requerido.
- Con una mala distribución de la carga, disminución de la resistencia a la eyección del retacado, voladura en un frente cubierto de escombros, relación longitud/anchura inadecuada y tiempo de retardo efectivo de las cargas inadecuada.

Los factores de carga elevados, producen una buena fragmentación, y esponjamiento de la roca, sin embargo, amplían la proyección del material volado (dificultando su extracción), generan daño sobre las dimensiones del contorno (implicando mayor sostenimiento posterior), e incrementan los costes totales de consumo de explosivo. Por otro lado, los factores de carga bajos implican no disponer de la energía química necesaria para fragmentar el macizo rocoso, en estas condiciones el explosivo tiende a deflagrar, ocasionando que se deba realizar nuevamente el carguío, provocando pérdida de tiempo y costos dentro del ciclo de minado (figura 12).

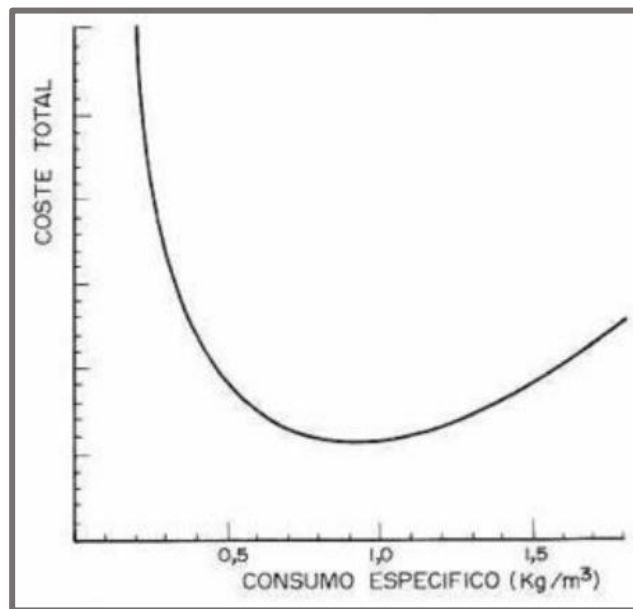


Figura 12. Reducción de los costos de operación con el factor de carga. (López Jimeno, 2004)

El factor de carga adecuado para operaciones subterráneas depende de la sección de las labores, diagrama de perforación, tipo de explosivo, tipo de



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

carguío, condiciones estructurales de los sectores, vibraciones generadas, volumen de gases producidos, etc.

2.5.10 Condiciones atmosféricas

Las bajas temperaturas ambientales influyen fuertemente en las emulsiones, ya que tienden a congelarse a temperaturas inferiores a 2°C . Para solventar este problema se utilizan sustancias como el Nitroglicol que hacen que el punto de congelación pase a -20°C . Las altas temperaturas también dan lugar a inconvenientes que hacen el manejo del explosivo peligroso como es el caso de la denominada exudación.

2.6 Criterios de selección de explosivos

La elección del tipo de explosivo forma parte importante del diseño de una voladura y, por consiguiente, de los resultados a obtener. Los factores a analizar para una correcta selección: precio del explosivo, diámetro crítico, características de la roca, volumen de roca a volar, presencia de agua, condiciones de seguridad, atmósferas explosivas⁷ y problemas de suministro.

2.7 Costos del explosivo

El costo del explosivo por metro de avance está en función del tipo labor y sección. Tenemos que considerar el costo de la voladura como global y no como actividad unitaria. Ejemplo: grado de fragmentación para etapas posteriores, sostenimiento por sobreroturas⁸, tiempo de ventilación, etc.

2.8 Condiciones de seguridad

Un punto de equilibrio, a veces no fácil de lograr en un explosivo, es el binomio sensibilidad-seguridad. Este problema se ha resuelto con el empleo de emulsiones que son insensibles a los golpes, fricciones y estímulos subsónicos, pero poseen un grado de sensibilidad adecuada para la iniciación.

⁷ Atmósfera con presencia de gases con características explosivas.

⁸ Sobre excavación.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

2.9 Accesorios de voladura

Pueden clasificarse en dos grupos:

- Sistemas no eléctricos.
- Sistemas eléctricos.

En este caso se considerará únicamente el sistema de iniciación no eléctrico.

2.9.1 Sistemas no eléctricos de iniciación

Se basa en una señal lineal en forma de onda de choque de baja energía, pero lo suficientemente fuerte para iniciar un elemento de retardo incorporado en el detonador y no ser disruptiva.

De acuerdo con el tiempo que duran los intervalos de retardo, se conocen dos series: Periodo largo (LP) especial para túneles, frentes en galerías y periodos cortos (MS) para labores de sección completa subterráneas⁹.

Constan de un tubo delgado de plástico transparente de 3 mm de diámetro recubierto en su interior por una fina película de explosivo de 20 mg/m y una capsula detonadora. La velocidad de la onda de choque dentro del tubo es de unos 2000 m/s y no es lo suficientemente potente para iniciar a los explosivos en contacto con dicho tubo.

Los elementos básicos de los sistemas iniciadores comprenden:

- a) El chispeo¹⁰, se considera como elemento básico al medio originador del impulso iniciador.
- b) Al tren de transmisión del impulso iniciador, que va desde el punto de origen hasta el núcleo sensible del detonador.
- c) Detonador, este comprende:
 - 1) El elemento de retardo que, al recibir el impulso iniciador a través del tren de transmisión, lo retiene un tiempo determinado

⁹ Labores subterráneas de Sección completa: Labores cuyas secciones no incluyen taladros adicionales, fuera de los parámetros establecidos en los diagramas estándar de perforación, por ejemplo: taladros de levante, rebaje, desquinche, apertura, etc.

¹⁰ Generación de energía para la iniciación de la voladura.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

antes de transferirlo a la carga sensible para producir su inflamación.

- 2) La carga primaria (azida de plomo, fulminato de mercurio o similares) al recibir la llama o la onda de impulso iniciador se inflama y hace detonar a la carga base, la que a su vez hace detonar a la carga explosiva que le rodea (cebo o prima) como muestra la figura 13.

d) Cebo.

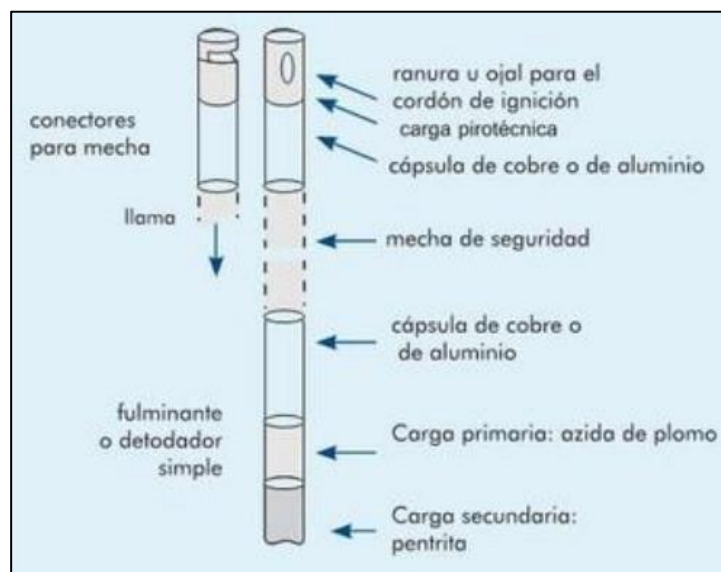


Figura 13. Componentes del detonador no eléctrico. (Manual práctico de voladuras EXSA, 2019)

A continuación, se muestra el sistema de transmisión de un taladro, según la figura 14.



Figura 14. Sistema de transmisión. (Manual práctico de voladuras EXSA, 2019)



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

2.10 Carga del taladro

Podemos clasificar los métodos empleados en minería subterránea como:

- Carguío de emulsiones (semi mecanizado).
- Carguío mecanizado.

En este caso se considerará el método de carguío semi mecanizado en minería subterránea.

2.10.1 Carguío semi mecanizado subterráneo

Las ventajas de un carguío semi mecanizado subterráneo pueden resumirse en:

- Alto aprovechamiento del volumen perforado.
- Aumento de la densidad de carga dentro de los taladros.
- Posibilidad de formar cargas selectivas de explosivo.
- Utilización de emulsión explosiva¹¹ de menor coste que los encartuchados.
- Reducción de los tiempos de carga de las voladuras.
- Mejor control del explosivo y autonomía en el suministro de este.

Todas estas ventajas se traducen en un menor coste.

El método analizado consiste en un sistema de emulsión bombeable gasificada, la tecnología representa mejoras en la voladura, seguridad, rendimiento, voladura, productividad, rentabilidad y la reducción de desperdicios.

Los equipos utilizados son módulos de diferentes capacidades montados sobre pequeños camiones para su acceso fácil a las zonas de disparo, donde la emulsión es mezclada con el gasificante (generalmente nitrito de sodio) para su sensibilización dentro del taladro.

Con objeto de no ampliar en exceso el marco teórico se incluirá en el “Anexo I” la teoría relacionada a vibraciones generadas por voladuras.

¹¹ Emulsiones explosivas: Mezcla estable de un líquido inmiscible disperso en otro.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

CAPITULO 3

ESTUDIO DE LA DISMINUCION DEL FACTOR DE CARGA EN VOLADURAS DE LABORES SUBTERRANEAS DE SECCION COMPLETA

3.1 Sectores en desarrollo y preparación

El proyecto en el que se llevó a cabo el presente análisis, cuenta con tres (3) vetas en las que se realizaron actividades de desarrollo y preparación, estas corresponden a veta complejo Marianas, conformada por la veta principal Mariana Central, Mariana Norte y Emilia. La segunda corresponde a veta Eureka, actualmente ambas ejecutan tareas de preparación/producción y la tercera Veta San Marcos, que efectúa actividades de desarrollo en estéril.



Figura 15. Zonas Mineralizadas

Se emplearon tres (3) equipos con sistemas de carguío semi mecanizado subterráneo (UBS), distribuidos en actividades de desarrollo y preparación para las diferentes vetas.

3.2 Metodología de trabajo

En primera instancia, la metodología de trabajo consistió en analizar los aspectos técnicos de la operación de carga y voladura (diagramas de perforación, explosivos y accesorios utilizados, modelos de carga, secuencias de detonación, sobre excavación, etc.) de manera de poder definir los



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

parámetros aplicados, identificar problemáticas y proponer acciones de mejoras que contribuyan a la optimización del proceso de voladura y generar ahorro.

De las observaciones realizadas, se concluye que los resultados obtenidos durante el periodo inicial de contratación de la empresa especialista, mostraron resultados desfavorables respecto al consumo de explosivos, costos y eficiencia de las voladuras; principalmente para las Vetas Marianas y Eureka. Por esta razón, se emplearon diagramas de perforación estándar sugeridos por el socio estratégico para ambas Vetas, así como la modificación del modelo de carga empleado en Veta San Marcos.

Adicionalmente, se establece la implementación de check list estándar de voladura y una matriz¹² de evaluación del estado del frente, de tal manera que la información asociada a las voladuras realizadas sea enviada al cliente y quede registrada en la base de datos, facilitando su posterior análisis.

La modificación de los diagramas de perforación implica un análisis teórico de los aspectos relacionados al mismo:

- Modelo de carga.
- Análisis de energía.
- Secuencia de detonación
- Análisis de isocargas.
- Control de perforación.

Una vez establecida la factibilidad técnica de las modificaciones planteadas desde el punto de vista operativo para la realización de voladuras, se debe capacitar al personal de campo respecto a las modificaciones efectuadas.

Se llevaron a cabo controles en campo de las voladuras realizadas mediante mediciones técnicas (fragmentación obtenida, velocidad de detonación del explosivo empleado, vibraciones generadas por la voladura), efectuadas de manera aleatoria para voladuras de desarrollo y preparación. Generalmente, las mediciones técnicas no son ejecutadas de manera simultánea para una misma

¹² Matriz: Componente base de los explosivos en emulsión.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

voladura. Como se mencionó en los alcances y limitaciones del estudio, la cantidad de mediciones por campaña se limita a dos de cada parámetro, con el objetivo de obtener una mayor representatividad del análisis; por lo que no fue posible realizar todas las mediciones técnicas para cada prueba.

Se consideraron un total de diez (10) voladuras en el análisis, sobre las cuales se estableció una comparación respecto a voladuras de periodos previos, para comprobar si se generaron mejoras en la eficiencia y reducción de costos.

El relevamiento de información permitió realizar un seguimiento de los resultados de la voladura, analizar y comparar los resultados ante la implementación de una propuesta de mejora. Así, ante una modificación en los parámetros operativos utilizados, permitiendo evaluar el resultado obtenido, permitiendo que las metodologías implementadas establezcan los aspectos a mejorar dentro del proceso de voladura.

Finalmente, se brindaron recomendaciones con el objetivo de contribuir a la mejora del proceso de mediciones técnicas y operativas.

3.3 Sobre excavación

La sobre excavación fue reportada por el área de topografía perteneciente a al socio estratégico, dicha área comparte la información mediante una base de datos (cuadro 1) de manera semanal/mensual.

LABOR	NIVEL	MES	MINA	Vreal (m3)	Avance (m)	Vdiseño (m3)	%SE	Objetivo de sobreexcavacion
EK_398CX593_N	398	ENERO	EK	276,29	10,5	217,35	27,12%	15,00%
EK_372GB595_E_V1	372	ENERO	EK	302,13	11	227,7	32,69%	15,00%
EK_268GB608_W_V1	268	ENERO	EK	399,74	14,5	300,15	33,18%	15,00%
EK_268XC600_E	268	ENERO	EK	253,6	9,6	198,72	27,62%	15,00%
MN_525GB025_E_V1	525	ENERO	MN	136,9	5,1	105,57	29,68%	15,00%
MN_500GB036_W_V1	500	ENERO	MN	51,1	2,2	45,54	12,21%	15,00%
MN_500GB030_E_V1	500	ENERO	MN	272,5	11,5	238,05	14,47%	15,00%
MN_500XC036_N	500	ENERO	MN	268,8	11,5	238,05	12,92%	15,00%
MN_500XC026_N	500	ENERO	MN	778	27	558,9	39,20%	15,00%
MN_475GB030_E	475	ENERO	MN	267	10,3	213,21	25,23%	15,00%
MN_475GB036_W	475	ENERO	MN	236,5	10,7	221,49	6,78%	15,00%
MN_500GT_E	475	ENERO	MN	58,2	2,5	51,75	12,46%	15,00%
MN_550XC038_N	550	ENERO	MN	115,2	4	82,8	39,13%	15,00%

Cuadro 1. Base de datos de sobre excavación



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

A partir de la base de datos, se determinó cual es la sobre excavación promedio generada en labores subterráneas de sección completa empleadas en desarrollo y preparación, correspondiente al periodo de inicio de actividades de la empresa especialista de explosivos en el proyecto, hasta el momento previo de la ejecución del estudio.

$$\text{Sobre excavacion promedio (\%)} = 23,41\%$$

Como se mostró en el cuadro 1, el objetivo de sobre excavación para las labores corresponde a un 15%.

El área de topografía midió la sobre excavación correspondiente a las labores de desarrollo y preparación de Vetas Marianas (Veta Mariana Central, Veta Mariana Norte y Veta Emilia) y Veta Eureka; sin embargo, no se consideró la sobre excavación promedio que se genera para Veta San Marcos.

3.4 Diagramas de perforación

Según se explicó en los alcances y limitaciones del estudio, la empresa especialista en voladuras no puede realizar modificaciones en los diagramas de perforación teóricos estandarizados (implementados y modificados por el área de perforación del socio estratégico) para los diferentes sectores del proyecto.

El análisis de la carga en labores de desarrollo y preparación del proyecto, se basa en determinar si la disminución del factor de carga por medio de la implementación de modelos de carga estandarizados, relacionado a la aplicación de diagramas de perforación propuestos por el socio estratégico (con menor cantidad de taladros para los diagramas de perforación de Vetas Marianas y Eureka), logra mejorar la eficiencia de las voladuras; y aminorar los costos del explosivo utilizado.

A continuación, se muestra el diagrama de perforación estándar (figura 16) y sus parámetros teóricos (cuadro 2) para labores de sección completa subterránea en Vetas Marianas y Eureka (empleado previamente al estudio):

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

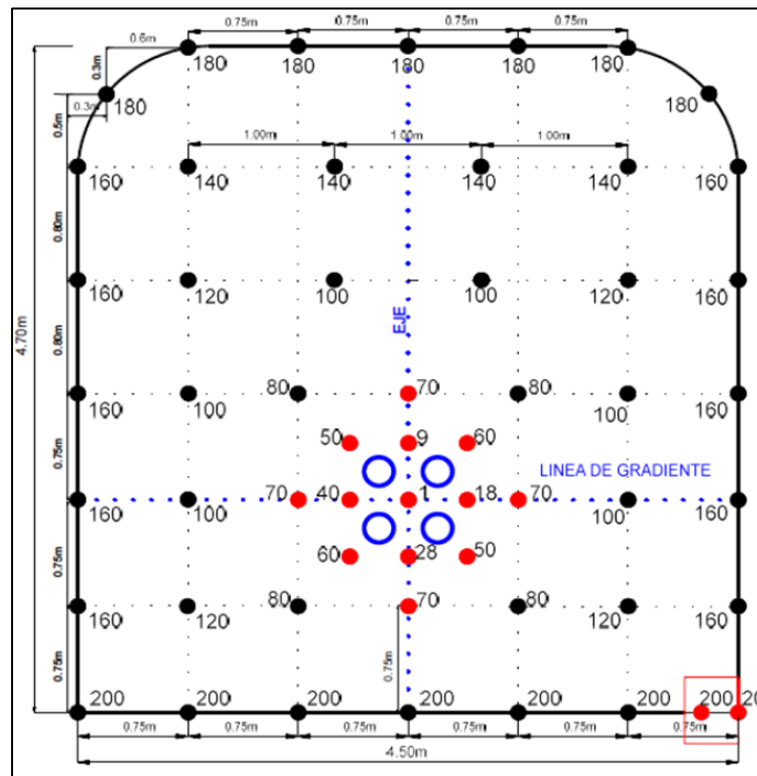


Figura 16. Diagrama de Perforación estándar Vetas Marianas y Eureka (Previo al análisis)

Las longitudes de perforación establecidas en el diseño fueron de 3,8 y 4,5 metros. El diámetro de perforación utilizado fue restringido a 51 mm.

Parámetros Teóricos		Parámetros Teóricos	
Total de taladros	56 + 4	Total de taladros	56 + 4
Arranque	9	Arranque	9
Destroza	22	Destroza	22
Hastiales	10	Hastiales	10
Coronas	7	Coronas	7
Zapateras	8	Zapateras	8
Alivios	4	Alivios	4
Diámetro de Taladros cargados (mm)	51	Diámetro de Taladros cargados (mm)	51
Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102	Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102
Longitud de perforación (m)	3,8	Longitud de perforación (m)	4,5
Material a remover (Tn)	212	Material a remover (Tn)	251
Perforación Especifica (m/tn)	1,07	Perforación Especifica (m/tn)	1,07
Emulsión explosiva (Kg)	293,5	Emulsión explosiva (Kg)	352
FC (Kg/tn)	1,38	FC (Kg/tn)	1,40

Cuadro 2. Parámetros teóricos diagrama de perforación estándar: Vetas Marianas y Eureka (Previo al análisis)

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Veta San Marcos cuenta con labores de mayor sección respecto a Vetas Marianas y Eureka, también posee un diagrama de perforación específico con una longitud de perforación fija de 3,8 metros (figura 17).

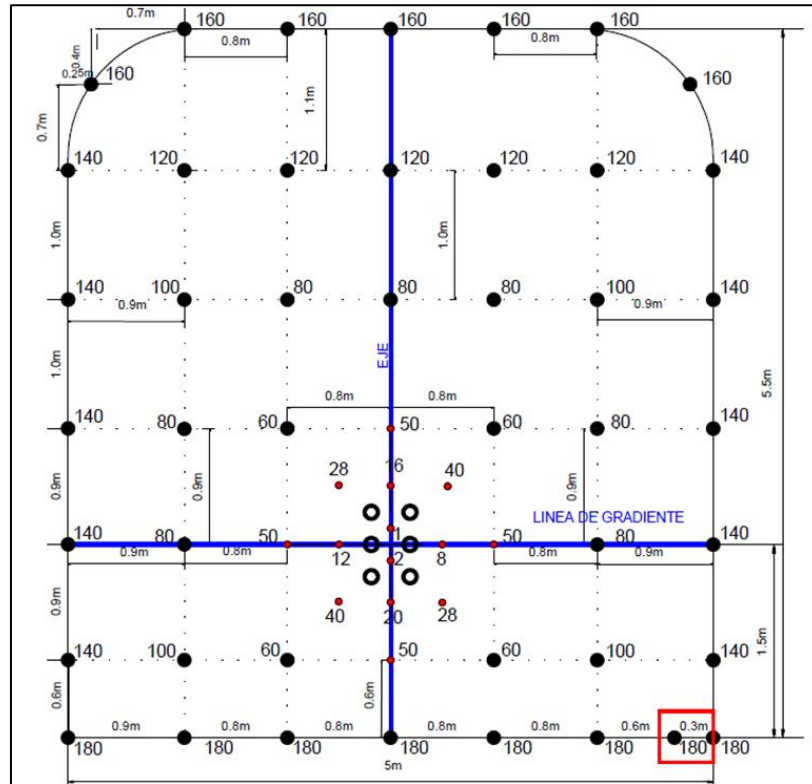


Figura 17. Diagrama de Perforación estándar Veta San Marcos

Parámetros Teóricos	
Total de taladros	59 + 6
Arranque	14
Destroza	20
Hastiales	10
Coronas	7
Zapateras	8
Alivios	6
Diámetro de Taladros cargados (mm)	51
Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102
Longitud de perforación (m)	3,8
Material a remover (Tn)	291,5
Perforación Específica (m/tn)	0,85
Emulsión explosiva (Kg)	350
FC (Kg/tn)	1,20

Cuadro 3. Parámetros teóricos diagrama de perforación estándar: Veta San Marcos



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

Ambos diagramas fueron utilizados durante un lapso de seis (6) meses, correspondiente al inicio de las actividades de la empresa especialista en explosivos en el proyecto y previo a la ejecución del estudio.

Se registraron resultados desfavorables para las voladuras de sección completa en dicho periodo para Vetas Marianas y Eureka (Veta San Marcos obtuvo buenos resultados), los de mayor importancia corresponden a:

- Sobre excavación promedio del 23% para voladuras de desarrollo y preparación (obtenido de la base de datos del socio estratégico). Esta es suministrada por el área de topografía para Vetas Marianas y Eureka, sin considerar Veta San Marcos.
- Rendimiento de avance del 91,54% (valor promedio obtenido de la base datos asociado al periodo).
- Factor de carga real promedio elevado, el socio estratégico recomienda que el factor de carga real se encuentre entre 0,8 y 1,28 kg/tn en función de los tipos de roca presentes en el proyecto, para voladuras de sección completa (dependiendo del tamaño de la sección y sin considerar condiciones estructurales perjudiciales). El factor de carga real promedio previo al análisis fue de 1,675 kg/tn .
- Proyección de material con distancias superiores a 20 metros.
- Nivel vibracional elevado (Según Norma DIN 4150) por voladura.

Con el objetivo de buscar mejores resultados y reducir costos para el proceso de perforación/voladura, el socio estratégico diseñó diagramas de perforación, que permitieron la reducción de la cantidad de taladros en voladuras de desarrollo y preparación en Vetas Marianas y Eureka (figura 18). No se realizaron modificaciones respecto al diagrama de perforación para Veta San Marcos.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

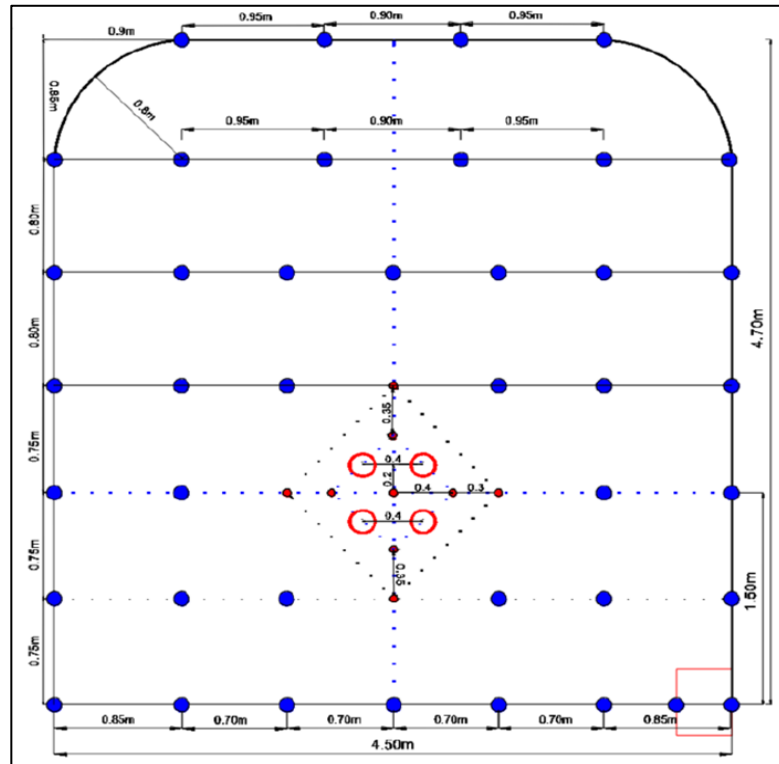


Figura 18. Diagrama de Perforación Arranque Centro estándar para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

Parámetros Teóricos		Parámetros Teóricos	
Total de taladros	50 + 4	Total de taladros	50 + 4
Arranque	9	Arranque	9
Destroza	19	Destroza	19
Hastiales	8	Hastiales	8
Coronas	6	Coronas	6
Zapateras	8	Zapateras	8
Alivios	4	Alivios	4
Diámetro de Taladros cargados (mm)	51	Diámetro de Taladros cargados (mm)	51
Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102	Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102
Longitud de perforación (m)	3,8	Longitud de perforación (m)	4,5
Material a remover (Tn)	212	Material a remover (Tn)	251
Perforación Especifica (m/tn)	0,97	Perforación Especifica (m/tn)	0,97
Emulsión explosiva (Kg)	267	Emulsión explosiva (Kg)	322
FC (Kg/tn)	1,26	FC (Kg/tn)	1,28

Cuadro 4. Parámetros teóricos diagrama de perforación estándar Arranque Centro para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

El diagrama de perforación propuesto para las pruebas presenta una reducción de seis (6) taladros, menor cantidad de metros perforados y disminución del factor de carga teórico (cuadro 5).



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

Diagrama de perforación 4,5 m x 4,7 m		
Ubicación	Teórico	Pruebas
Total de taladros	56 + 4	50 + 4
Corona	7	6
Hastiales	10	8
Zapateras	8	8
Auxiliares	22	19
Arranque	9	9
Alivio	4	4
Reducción de taladros (%)	-	11%
Tipo de Explosivo	Emulsion	Emulsion
Total de explosivo (Kg)	293,5	267
Factor de Carga (kg/Tn)	1,38	1,26
Total de metros perforados	212,8	190
Reducción de metros perforados (m)	-	22,8

Cuadro 5. Comparación Diagrama de perforación teórico VS propuesta

Adicionalmente, se establecieron diagramas de perforación estándar diferenciados por la ubicación del arranque: Centro, izquierda y derecha (figuras 19 y 20). A continuación, se muestran los parámetros teóricos asociados para longitudes de perforación de 3,8 y 4,5 metros (cuadro 6):

Parámetros Teóricos		Parámetros Teóricos	
Total de taladros	51 + 4	Total de taladros	51 + 4
Arranque	9	Arranque	9
Destroza	18	Destroza	18
Hastiales	10	Hastiales	10
Coronas	6	Coronas	6
Zapateras	8	Zapateras	8
Alivios	4	Alivios	4
Diámetro de Taladros cargados (mm)	51	Diámetro de Taladros cargados (mm)	51
Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102	Diámetro de Taladros Alivio (mm)	102
Longitud de perforación (m)	3,8	Longitud de perforación (m)	4,5
Material a remover (Tn)	212	Material a remover (Tn)	251
Perforación Especifica (m/tn)	0,97	Perforación Especifica (m/tn)	0,97
Emulsión explosiva (Kg)	270	Emulsión explosiva (Kg)	325
FC (Kg/tn)	1,27	FC (Kg/tn)	1,29

Cuadro 6. Parámetros teóricos Diagrama de Perforación estándar Arranque Izquierda y Derecha para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

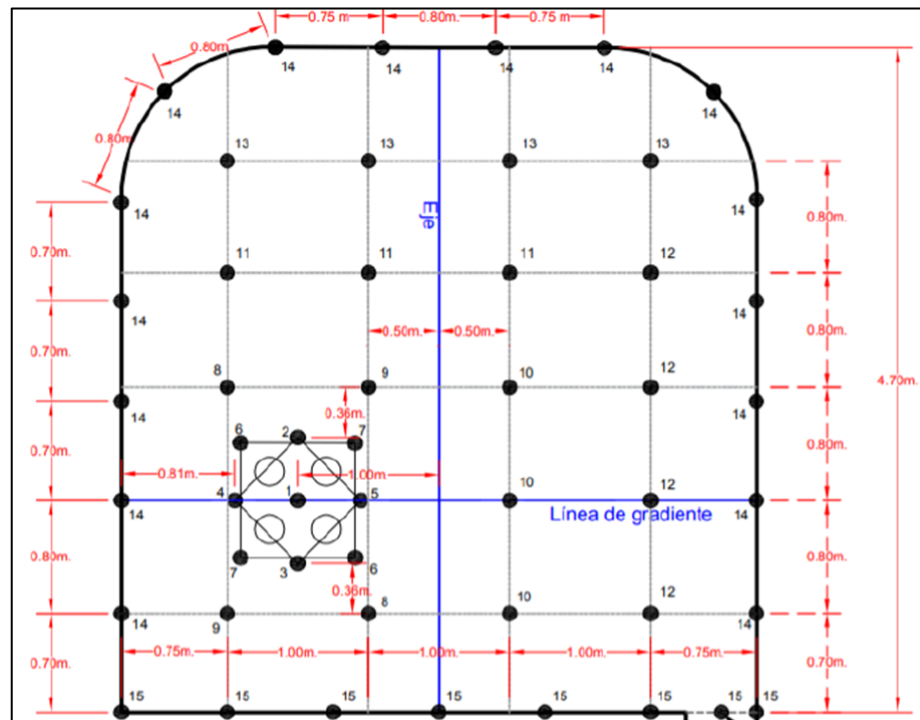


Figura 19. Diagrama de perforación Arranque Izquierda estándar para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

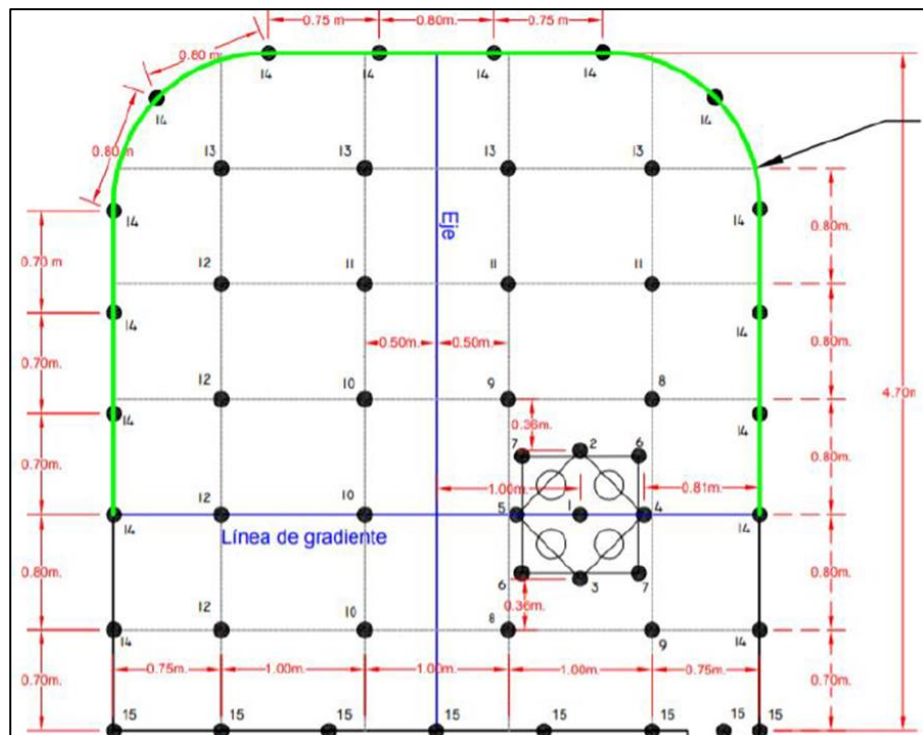


Figura 20. Diagrama de perforación Arranque Derecha estándar para pruebas (Vetas marianas y Eureka)

3.5 Operación de carga y voladura

Se utilizaron los siguientes explosivos:

- Emulsión: Para el carguío se emplearon unidades de bombeo subterráneas (UBS). Esta se utilizó como carga principal de los taladros.
- Boosters: Iniciadores cilíndricos a base de Pentolita (40 gr).
- Cordón detonante: de acuerdo a la carga de pentrita en su núcleo se utilizan en el proyecto de: 5, 40 y 60 gr/m.
- Detonadores no eléctricos: Utilizan de período corto, donde la secuencia varía desde $N^{\circ} 1 = 25 \text{ ms}$, hasta el $N^{\circ} 272 = 6800 \text{ ms}$ (25 ms de intervalo entre cada número de detonador consecutivo).
- Lip: Es un tubo de choque para transmisión de señal, posee un detonador no eléctrico con tiempo de 0 ms en su extremo, y permite la iniciación a distancia con mayor control y seguridad, tiene 500 metros de longitud.

A continuación, se establecerá el consumo teórico de explosivos para los diagramas de perforación mostrados anteriormente:

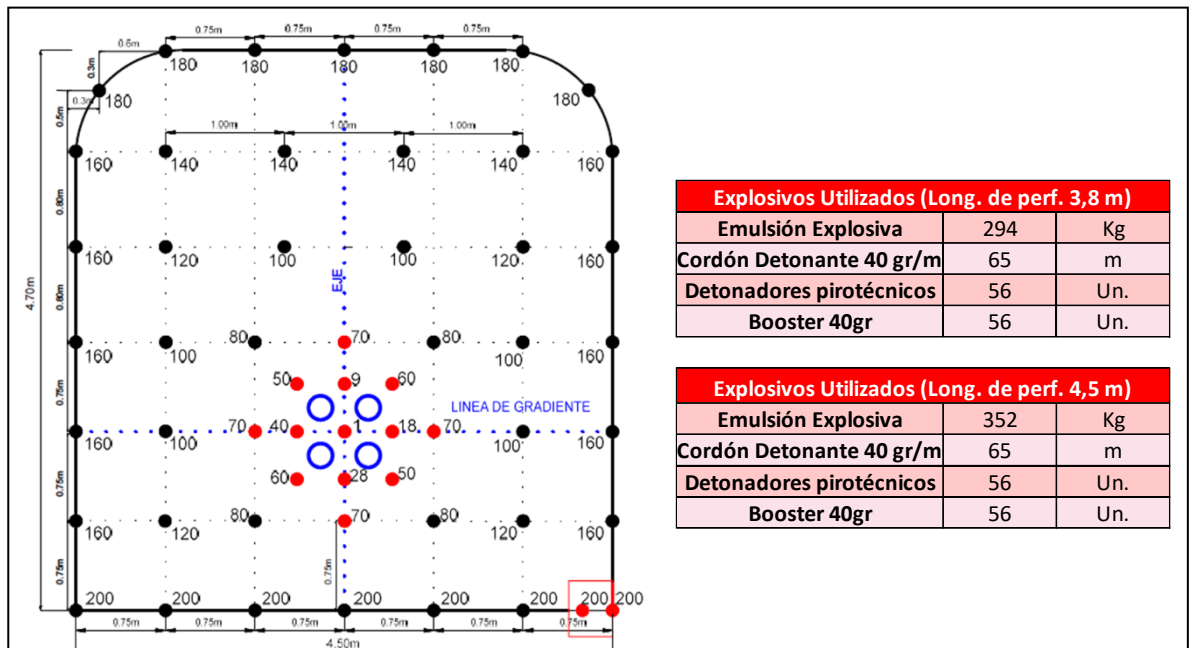


Figura 21. Carga Explosiva Diagrama de Perforación estándar Vetas Marianas y Eureka (Previo al análisis)

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

La figura 21 muestra el consumo teórico de explosivos para el diagrama de perforación estándar de Vetas Marianas y Eureka, empleado previamente al análisis.

Adicionalmente a la carga explosiva teórica mostrada en la figura 22, es necesario emplear cordón detonante de 5 gr/m para realizar el amarre del frente una vez concluido el carguío del explosivo, se utilizaron entre 45 y 60 metros (en las secciones analizadas) para Vetas Marianas y Eureka. También se emplea un (1) lip, cuyo extremo libre posee un detonador de carga mínima y tiempo de iniciación nulo (0 ms), este es conectado al cordón de amarre mediante un conector “J”.

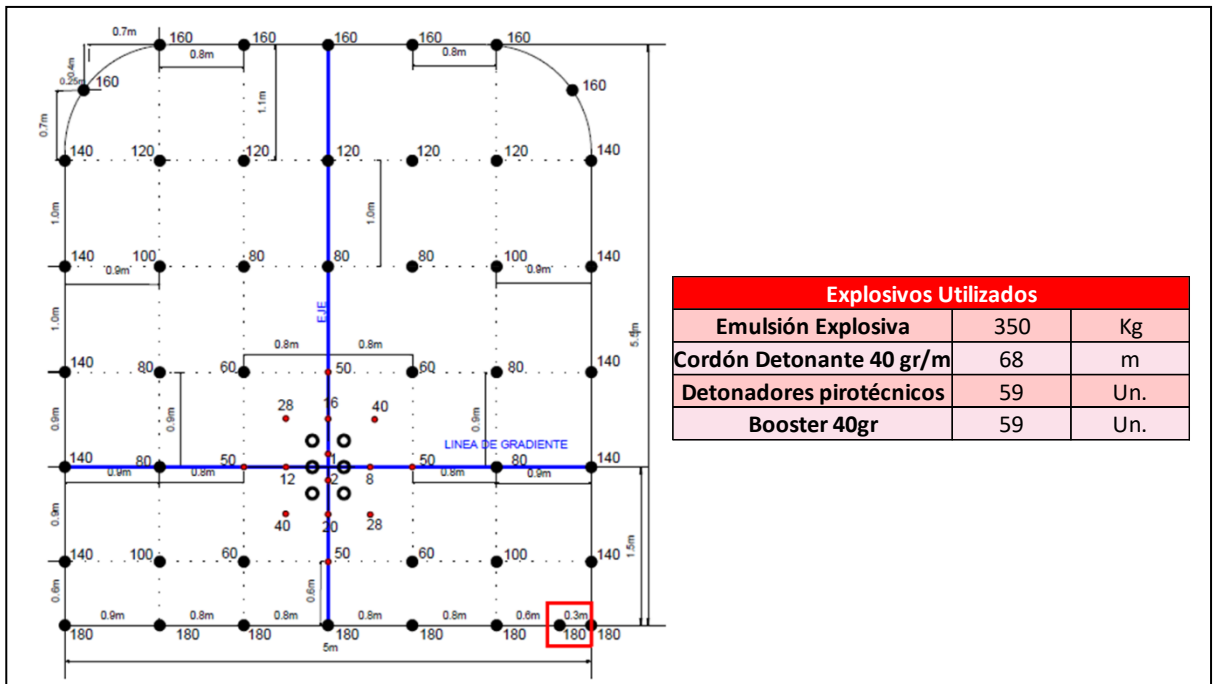


Figura 22. Carga Explosiva Diagrama de Perforación estándar Veta San Marcos

En este caso, la cantidad de cordón detonante de 5 gr/m empleada suele ser entre 10 y 20 metros superior a la sección de las labores de Vetas Marianas y Eureka.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

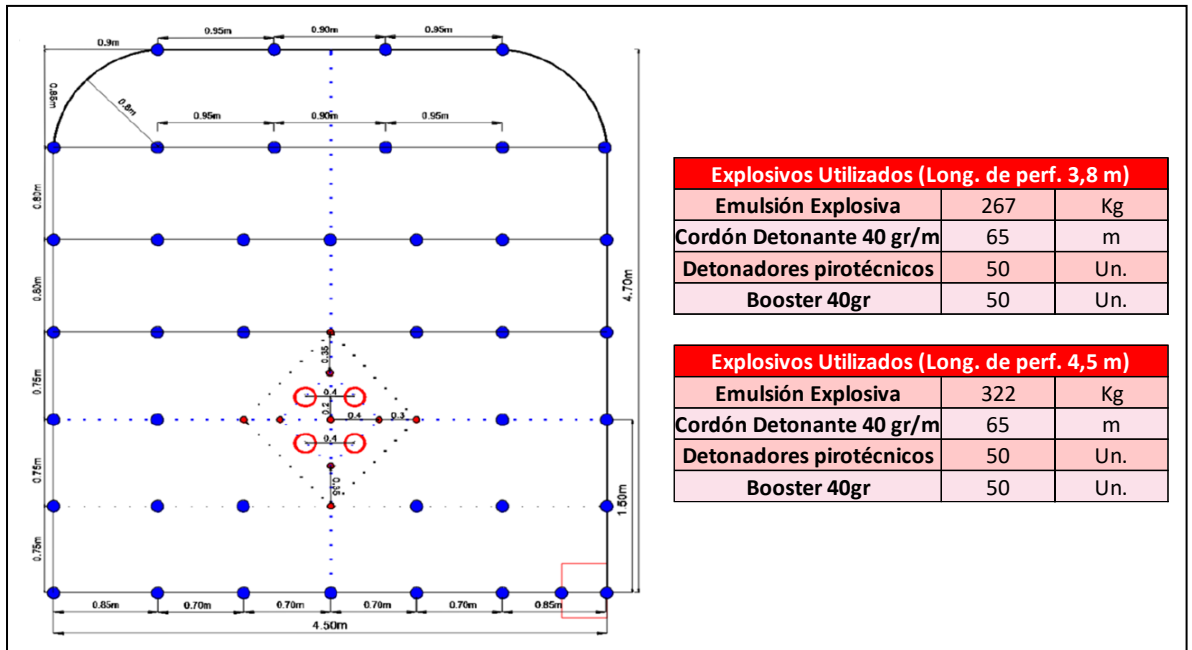


Figura 23. Carga Explosiva Diagrama de Perforación Arranque Centro estándar para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

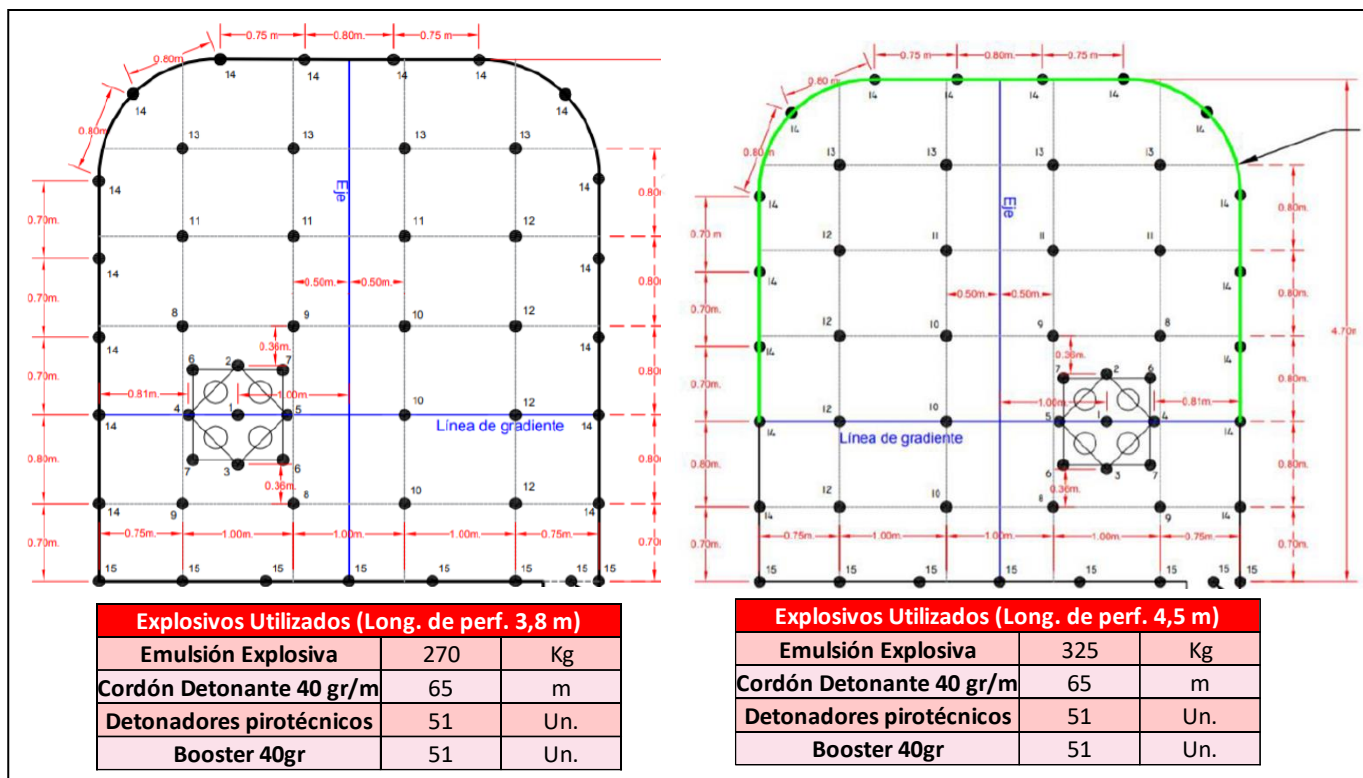


Figura 24. Carga Explosiva Diagrama de Perforación Arranque Izquierda/Derecha estándar para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

3.6 Modelos de Carga

Los modelos de carga¹³ indican la cantidad teórica de explosivo a utilizar de manera estandarizada en los diferentes sectores de la sección (arranque, coronas, auxiliares, hastiales y zapateras) para una determinada longitud de perforación. Las figuras 25 y 26 se muestran los modelos de cargas asociados a los diagramas de perforación estándar empleados previamente al estudio:

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Factor de Carga
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	3,8	6,5	6	6,5	3	293,5	1,38

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Factor de Carga
SM	5,5 x 5	51	3,8	6,5	7	7,5	3	350	1,20

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Carga (Kg/Tn)
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	4,5	8,5	8	8,5	3	352	1,40

Cuadro 7. Modelos de Carga Diagrama de Perforación estándar Vetas Marianas, Eureka y San Marcos (Previo al análisis)

¹³ Modelo de carga: Modelo que plantea el consumo teórico de explosivo en labores de sección completa de forma estandarizada para ciertas longitudes de carga.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

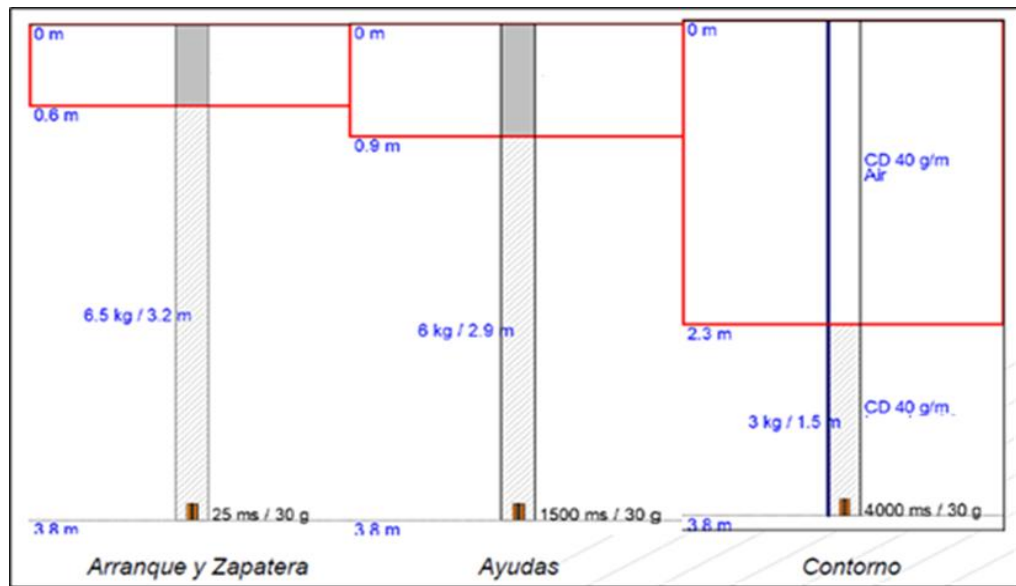


Figura 25. Modelo de carga estándar para 3,8 metros (Vetas Marianas y Eureka)

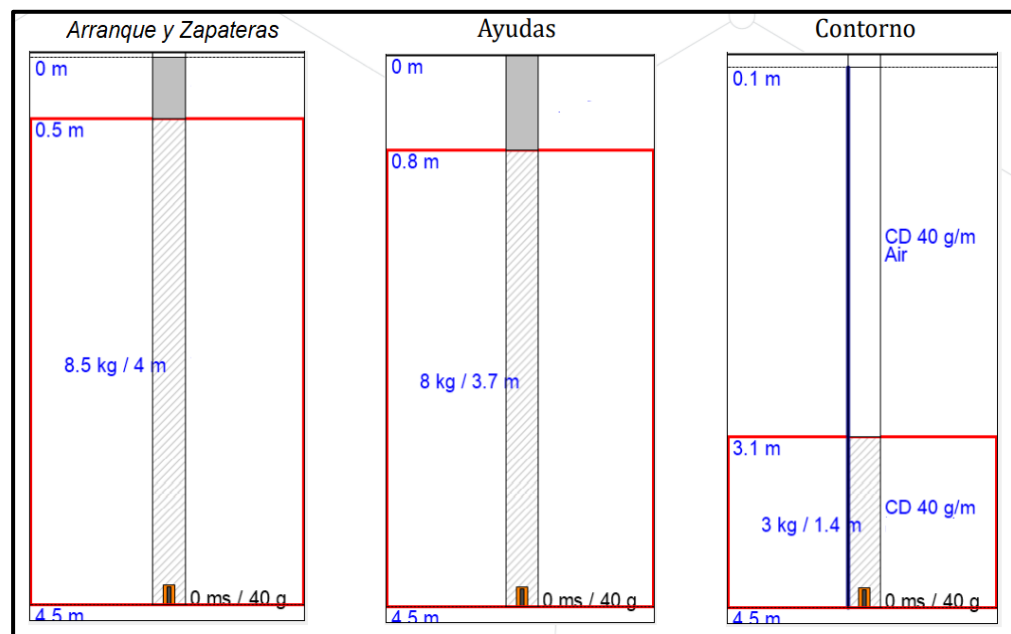


Figura 26. Modelo de Carga estándar para longitud de perforación de 4,5 metros (Vetas Marianas y Eureka)

La representación gráfica del modelo de carga permite establecer los materiales empleados, además de la emulsión (Booster, taco, detonador y cordón detonante). Como se muestra en la figura 26, se empleó taco (en este caso, taco inerte de arcilla) para el arranque, ayudas y zapateras; mientras que los taladros del contorno no utilizan taco, pero si cordón detonante de 40 gr/m; esto con el objetivo de disminuir la sobre excavación.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

La carga de los sectores de la sección (arranque, auxiliares, hastiales y zapateras) empleados en el periodo previo al estudio en Vetas Marianas y Eureka no fueron modificados durante la ejecución del mismo (figuras 25 y 26). Pero si para el caso de Veta San Marcos (cuadro 8). Razón por la cual se incluye su análisis en el estudio, a pesar de no verse modificado su diagrama de perforación estándar.

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Factor de Carga
SM	5,5 x 5	51	3,8	6,5	6	6,5	3	337	1,16

Cuadro 8. Modelo de Carga Diagrama de Perforación estándar para pruebas Veta San Marcos

A continuación, se muestran los modelos de carga teórica (cuadros 9 y 10) de los diagramas de perforación con menor cantidad de taladros que fueron propuestos para el análisis.

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Carga (Kg/Tn)
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	3,8	6,5	6	6,5	3	267	1,26

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Factor de Carga
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	4,5	8,5	8	8,5	3	322	1,28

Cuadro 9. Modelos de Carga Diagrama de Perforación Arranque Centro estándar para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Factor de Carga
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	3,8	6,5	6	6,5	3	270	1,27

Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Taladro (m)	Arranque (Kg/taladro)	Ayudas (Kg/taladro)	Zapatera (Kg/taladro)	Contorno (Kg/taladro)	Total Explosivo (Kg)	Factor de Carga
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	4,5	8,5	8	8,5	3	325	1,29

Cuadro 10. Modelos de Carga Diagrama de Perforación Arranque Izquierda/Derecha estándar para pruebas (Vetas Marianas y Eureka)

3.7 Simulaciones de energía

Las simulaciones de energía representan la energía asociada a una voladura que emplea un modelo de carga específico. De tal manera, es posible analizar si un modelo de carga específico posee una carga explosiva elevada y si el espaciamiento geométrico entre los taladros es insuficiente (generando superposición de halos de energía¹⁴).

A continuación, se muestra la simulación de energía asociada al diagrama de perforación con arranque en el centro estándar empleado para las pruebas (figura 27):

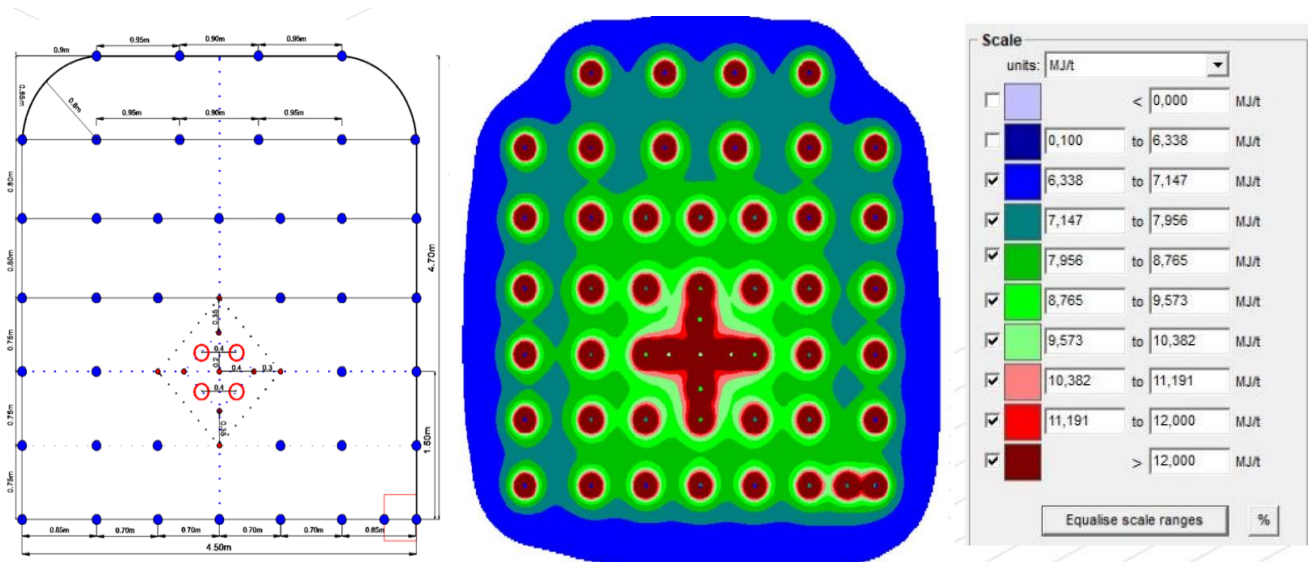


Figura 27. Simulación de Energía Modelo de Carga Arranque Centro estándar para pruebas

La distribución teórica de halos de energía para el modelo de carga específico mostrados en la figura 27, infiere que no se generara daños sobre la roca de caja, ya que el nivel teórico de energía al que se verá sometido está en el rango de entre 6,338 – 7,147 Mj/Tn (mega Joules por tonelada); si bien su magnitud no difiere en gran escala respecto a la asociada al material a volar, la

¹⁴ Halos de energía: Representan el nivel energético asociado a la carga explosiva de un taladro específico en forma de una circunferencia, cuyo radio se asocia a la magnitud de energía y su centro geométrico corresponde a la ubicación del taladro.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

mayor parte de esta es redirigida a la cara libre generada, y al no generarse nuevas detonaciones, la roca encajante tiende a absorber el impacto.

Sin embargo, el análisis mostrado es un comportamiento teórico, ya que el real dependerá de espaciamiento y Burden reales, longitud real de perforación, paralelismo de la perforación, la carga real empleada, etc. Por ello, no se inferirá con mayor profundidad en las simulaciones de energía teórica asociada a los diagramas de perforación estándar y los modelos de carga teóricos; ya que el interés real en la ejecución de estas simulaciones, es analizar el comportamiento de los modelos de carga respecto a la distribución real de los taladros perforados en los frentes.

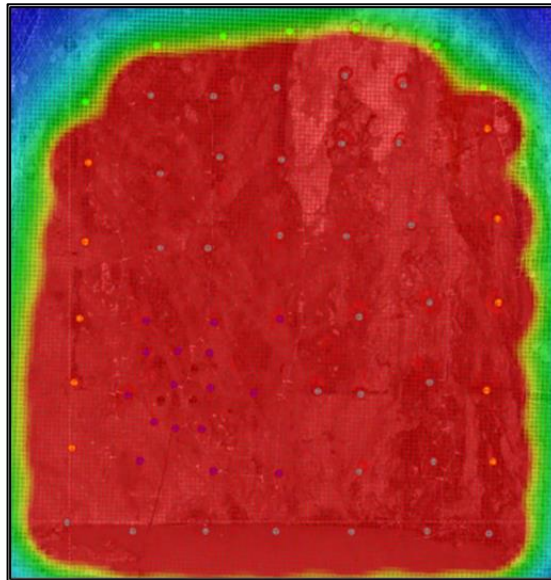


Figura 28. Simulación de Energía para Voladura Real

Como muestra la figura 28, es posible representar simulaciones de energía mediante zonas de influencia que reemplacen los halos de energía, en este caso, se observa, por ejemplo, que la zona de influencia asociada al sector de las zapateras y hastiales tienden a generar sobre excavación sobre el terreno, debido a una carga explosiva superior a la establecida para los modelos de carga teórico.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

3.8 Secuencia de Detonación

La secuencia de detonación consiste en la asignación de tiempos de salida a los taladros de los diagramas de perforación estándar, que detonaran en sucesión, según el tiempo predeterminado del detonador pirotécnico (en este caso) que se les asigne. Estos cuentan con diferentes números (entre 1 y 272), que poseen tiempos predeterminados (entre 25 y 6800 milisegundos).

La figura 29, muestra la secuencia de detonación (representada por el número de los detonadores) para el diagrama de perforación estándar empleado previamente al análisis para las Vetas Marianas y Eureka. La figura 30 corresponde a la secuencia de detonación para el diagrama de perforación estándar empleado en Veta San Marcos.

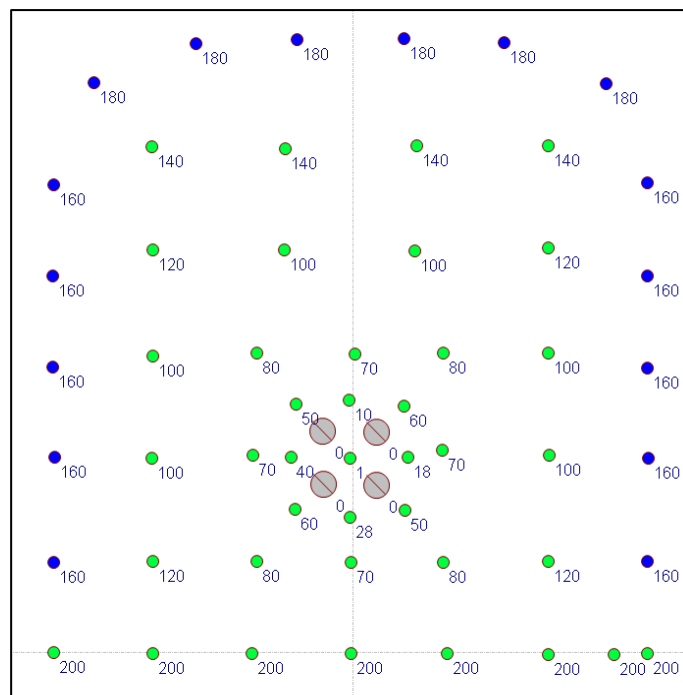


Figura 29. Secuencia de Detonación estándar Vetas Marianas y Eureka (Previo al análisis)

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

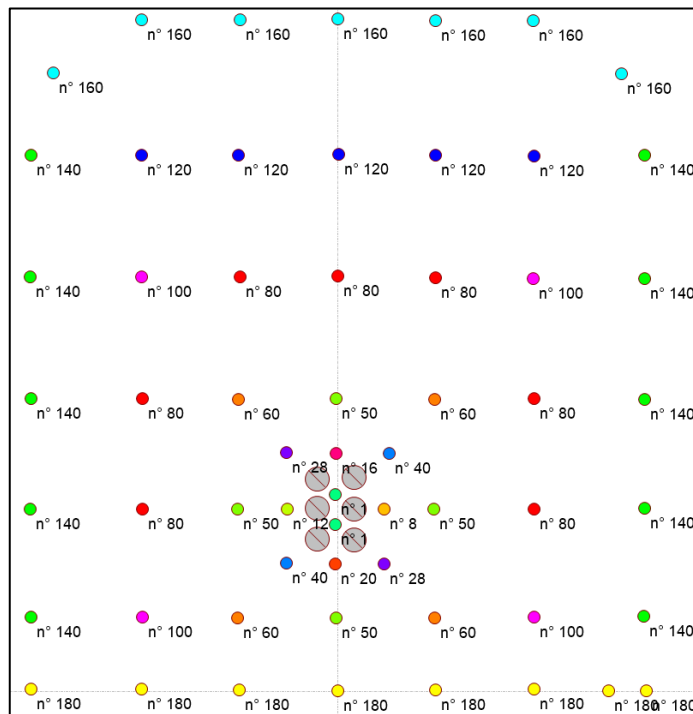


Figura 30. Secuencia de Detonación estándar Veta San Marcos

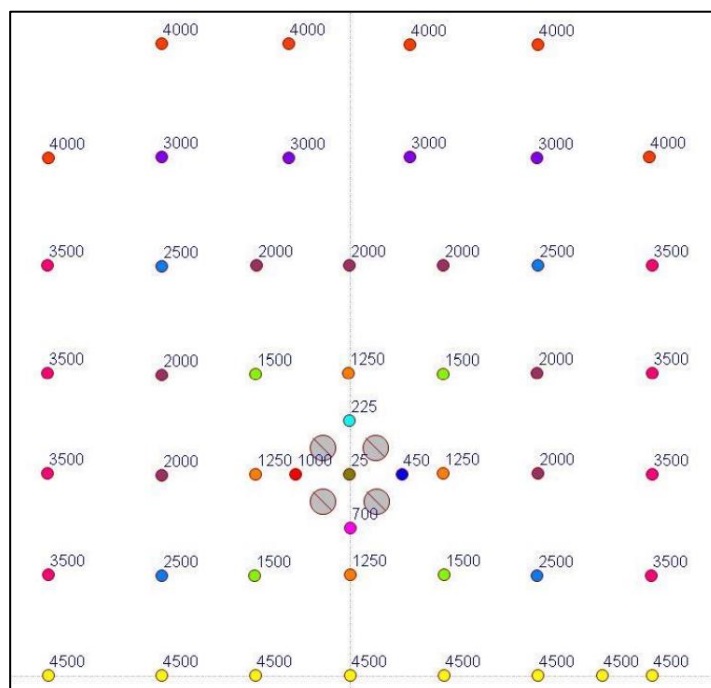


Figura 31. Secuencia de Detonación Arranque Centro estándar Vetas Marianas y Eureka para el análisis



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

La secuencia de detonación estándar asociada al diagrama de perforación estándar con reducción de taladros, empleado en las pruebas para las voladuras en Vetas Marianas y Eureka (figura 31), representa la secuencia con el tiempo de iniciación (expresado en milisegundos) asociado a cada detonador.



Figura 32. Secuencia de Detonación Arranque Izquierda/Derecha estándar Vetas Marianas y Eureka para el análisis



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

3.9 Simulación de Isolineas

Una vez definidas las secuencias de detonación a utilizar en el análisis, se lleva a cabo un análisis de isocronas de tiempo (figura 33):

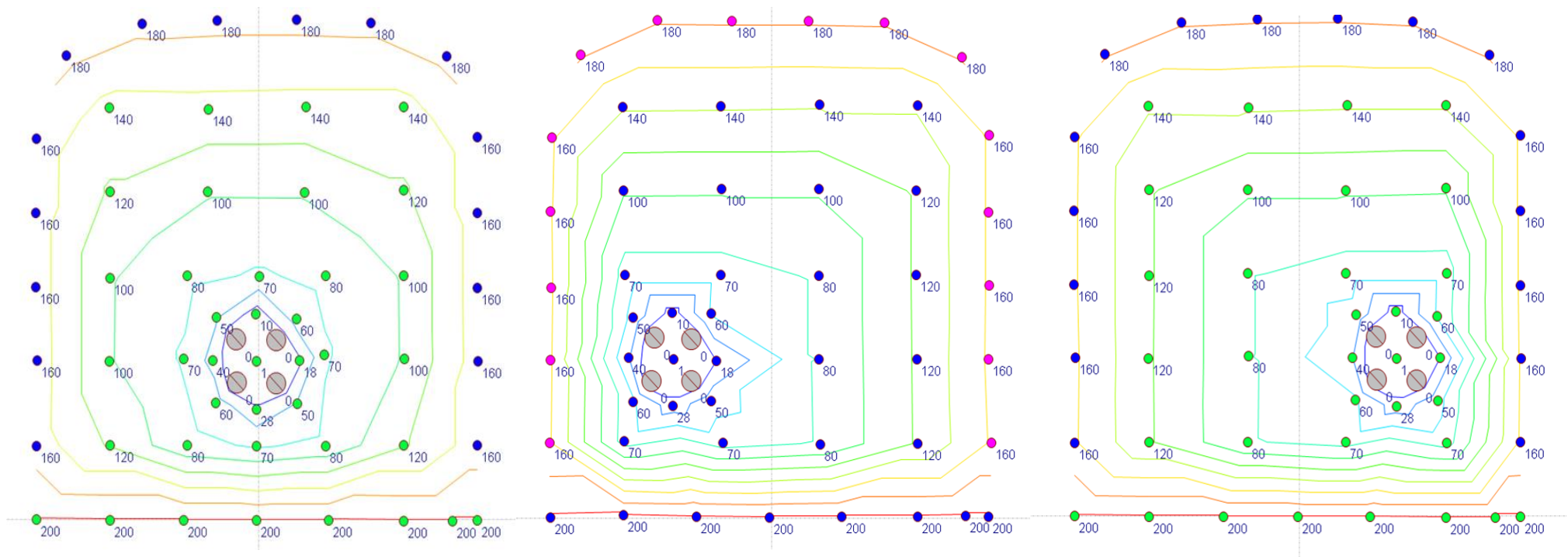


Figura 33. Simulación de Isolineas Secuencia de detonación Diagrama Arranque Centro/Izquierda/Derecha para análisis.

Las simulaciones de isocargas tienen como objetivo validar la funcionalidad de las secuencias de detonación a emplear, si no se observan isocargas entre cruzadas se supone un comportamiento teórico estable, evitando que cargas de fuego detonen antes de tener una cara libre para proyectar el material a volar. Para el caso de la figura 33, no se observan comportamientos inusuales de las isocargas para las secuencias detonación estándar a emplear.

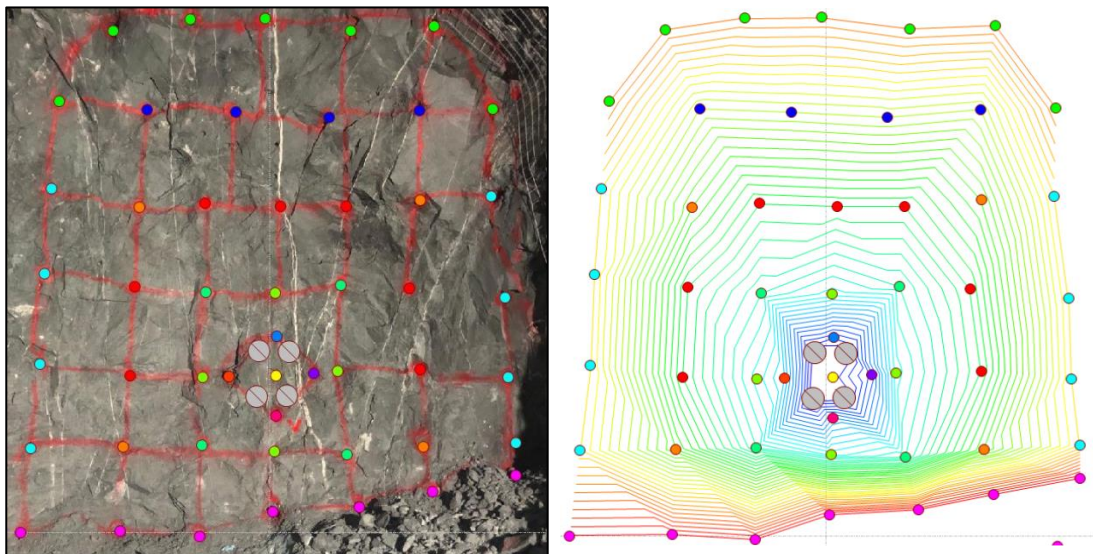


Figura 34. Simulación de Isocargas a Secuencia de Campo

Es importante plantear estas simulaciones una vez se conozca la distribución de los taladros en la sección, de forma que se pueda analizar su comportamiento en campo (figura 34).

3.10 Nomenclatura Utilizada

La nomenclatura empleada para la identificación de los sectores consiste en siglas y números, las primeras dos siglas corresponden a la mina, ya sea Mariana Norte (MN), Central (MC), Este o Emilia (EM), San Marcos (SM) u Eureka (EK). Luego, se especifica el nivel, posteriormente, el tipo de labor según sus siglas, se muestra en el cuadro 11 un resumen de las siglas de las labores consideradas en el estudio; y por último la orientación mediante siglas en inglés. Por ejemplo, el sector Mariana Central, nivel 425, galería de transporte oeste se resume como “MC425GTW”.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

TIPO DE LABOR	SIGLAS
Estocada de ventilacion	EV
Galeria basal	GB
Galeria de transporte	GT
Rampa	RPA

Cuadro 11. Resumen siglas de labores

3.11 Categorización del estado de los frentes

Se creó una matriz de evaluación de condiciones de los frentes de sección completa a volar, dicha evaluación debe realizarse de forma previa al inicio del carguío con el objetivo de establecer cuál es el estado del frente (cuadro 12).

Bueno	Siempre que se cumplan todos los parametros del rango.
Regular	Un frente se considera regular o irregular siempre que 1 de los 6 parametros no cumpla con lo especificado dentro del rango de "Bueno".
Irregular	

Cuadro 12. Clasificación del estado de los frentes

Matriz de evaluacion de condiciones de frentes						
Parametros	Bueno		Regular		Irregular	
	3,8 m	4,5 m	3,8 m	4,5 m	3,8 m	4,5 m
Longitud de perforación prom (m)	3,8 - 3,6	4,5 - 4	3,5 - 3	3,9 - 3,5	< 3	< 3,5
Adherencia de taladros (%)	100 - 90		90 - 80		< 80	
Taladros cortos (%)	0 - 5		5 - 15		> 15	
Burden (m)	0,8 - 1,0 m		1 - 1,2 m		> 1,2 m	
Presencia de Agua	NO		-		SI	
Falla	NO		SI		SI	

Cuadro 13. Matriz de evaluación de condiciones de frentes

3.12 Control del estado del frente

Para establecer la categorización de los frentes es necesario verificar su estado mediante controles de campo, además deben considerarse aspectos adicionales.

La longitud de perforación se mide mediante cinta métrica (figura 35) o un distanciómetro laser (figura 36), el mismo es empleado para medir la sección de la labor.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

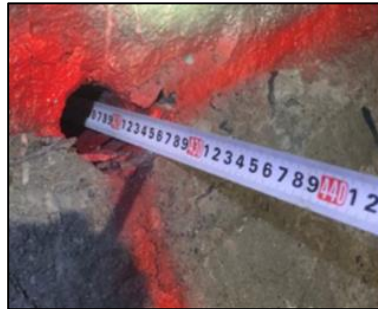


Figura 35. Medición de longitud de perforación mediante cinta métrica



Figura 36. Distanciómetro laser

En caso de medida una longitud de perforación inferior al límite aceptable para el diseño en los taladros, se verifica si estos se encuentran obstruidos por barro o rocas mediante la utilización de un taqueador (figura 37), se marcan sobre el mismo longitudes conocidas como guía.



Figura 37. Verificación de longitud de perforación mediante taqueador

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Adicionalmente, es necesario establecer el paralelismo entre los taladros del frente mediante la utilización de elementos guía que permitan extender la dirección teórica de perforación (figura 38).

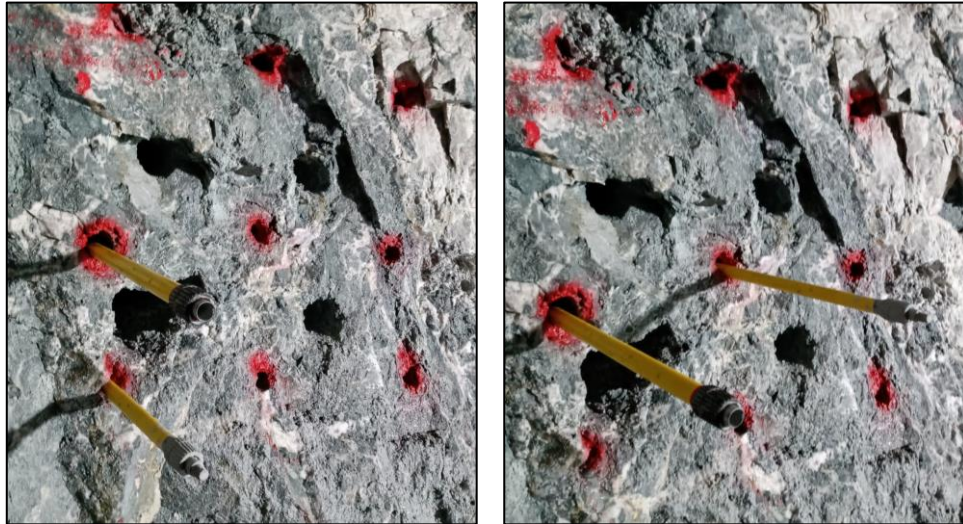


Figura 38. Control de paralelismo de perforación.

Este aspecto generalmente suele clasificarse como bueno, regular o irregular. Por ejemplo, la figura 38 muestra un paralelismo bueno para los taladros del arranque (deben considerarse adicionalmente taladros auxiliares y hastiales), mientras que la figura 39 presenta un paralelismo irregular.



Figura 39. Control de paralelismo de perforación



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Es de suma importancia realizar el control de paralelismo, longitud de perforación, Burden y espaciamento (figura 40) para los taladros del arranque, ya que estos son la salida de la voladura y generan la cara libre inicial.

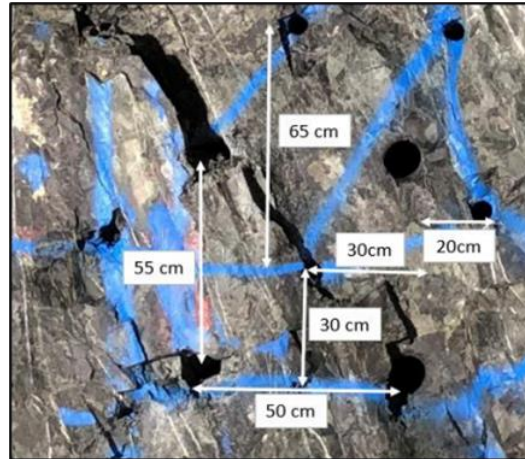


Figura 40. Control de Burden y espaciamento para el arranque

Como paso final, debe considerarse la adherencia, esta consiste en el porcentaje de coincidencia de la cantidad de taladros reales perforados, respecto al diagrama de perforación teórico correspondiente al sector que se está controlando.

3.13 Implementación de Check list y reportes de voladura

Con el objetivo de registrar la información relacionada a las voladuras de desarrollo y preparación, se establece la implementación de Check list, en el mismo se registran los aspectos de interés, entre ellos:

- Generalidades: Veta, sector, fecha, horario de recepción de frente, horario de inicio de carguío, horario de fin de carguío, tipo de roca, etc.
- Longitud de perforación promedio.
- Tamaño de la sección.
- Esquema del diagrama real de perforación y secuencia empleada, indicando adicionalmente longitudes irregulares.
- Cantidad de taladros cortos, tapados, no perforados, comunicados, con agua, con barro, etc.
- Presencia de falla.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

- Grado de paralelismo.
- Consumo de explosivo y accesorios de voladura.
- Observaciones.

El check list es empleado por el personal de supervisión de la empresa especialista en explosivos, los mismos son presentados y registrados.

		Mina:		Fecha:	
		Sector:		Tipo de Voladura:	
Entrega de frente:		$\text{Carga Lineal } \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}}\right) = \text{Densidad exp.} \times (\text{Diam.})^2 \times 0,507$ $\text{Factor de Carga } \left(\frac{\text{kg}}{\text{tn}}\right) = \frac{\text{Kg de explosivo}}{\text{Toneladas de material}}$			
Inicio carga:					
Fin de carga:					
Hora Voladura:					
Diagrama de perforación y carga				Condiciones del frente	
Tipo	Cantidad	Parámetros de P&V		Tipo	N°
Arranque		Diam. De perf. (mm) 51mm (2")		Cortos	
Ayudas		Long. de perforacion (m)		Tapados	
Hastiales		Ancho (m)		Con agua	
Corona		Alto (m)		Comunicados	
Zapatera		Tipo de explosivo		No perforados	
Vacios		Carga lineal (kg/m)	2,03	Paralelismo	
Desquinche		Peso por cartucho (kg)	0,430	Falla	Si / No
Total					
Condiciones del frente		Si	No	Observaciones	
Frente Saneado por Enaex					
Sostenimiento a tope					
Mallas cargadas					
Manga de ventilacion a 30m					
Piso con exceso de agua					
Gases en valores normales					
Piso limpio sin materiales					
Observaciones:					

Figura 41. Estructura de check list implementado en voladuras

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

En caso de producirse una voladura fallida es posible recurrir a los mismos y establecer si existieron factores que hubiesen afectado negativamente la voladura; por ejemplo, taladros del arranque cortos, presencia de falla, taladros no perforados, etc. Se muestra la estructura del check list empleado (figura 41).

Una vez informado el avance obtenido en la voladura del sector, se realiza un reporte de voladura (figura 42) con toda la información recopilada en el check list, el cual es enviada posteriormente al socio estratégico.

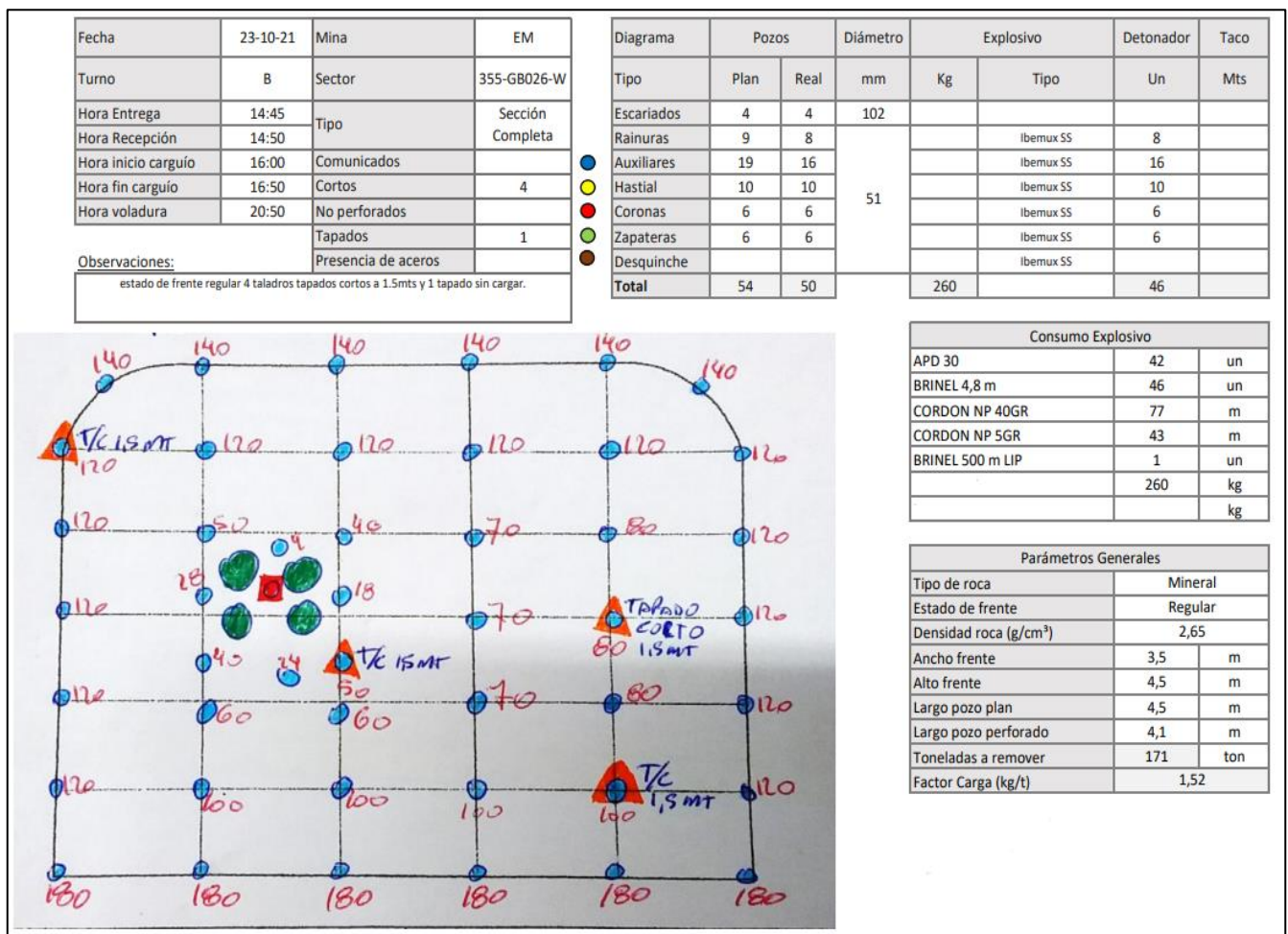


Figura 42. Estructura de reporte de voladura

3.14 Implementación de tacos inertes de arcilla

Durante la ejecución del análisis se realizaron pruebas mediante la utilización de tacos inertes de arcilla, ubicados en los taladros del arranque, esto con el objetivo de incrementar la magnitud de la velocidad de detonación y analizar su incidencia en el rendimiento de avance.

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas del producto (figura 43), las mismas fueron proporcionadas por el fabricante

Tacos Para Retacado “TN ®”

CARACTERISTICAS TECNICAS



- **Materia Prima Mineral**, MIX certificado por HTC Consultora. Mineral Pelitico silicoaluminoso Calco sódicos- ferrosos- Obtenido en laboreo de minas. Mix de porcentajes controlados. materia prima en perfil granulométrico equilibrado. Con proceso industrial bajo Normas de Calidad. Control fisico y quimico.(LAB TECMA/ ALS Chemex, ALEX STEWARD-100< CIC>300).
- **Envases** de polipropileno, material certificado. Tintas biodegradables. No contaminantes. Sin residuos contaminantes. Sin Minerales pesados. Sin mercurio ni plomo.
- **Dimensiones** Perfectas. Cilíndricas. Dúctiles. Parte trasera con sector para retacar sin perjudicar la herramienta ni adherencia en la misma. Parte delantera, área de contacto con la carga, aislada, protegida, soldada a fusión. para evitar contaminación con el explosivo y perjudicar la combustión.
- **Identificación** Fácil. Única Posición. Fácil identificación. Con distribución de materia prima para una fusión en respuesta a la voladura, Respuesta a la salida de calor, gases, y fuego.
- **Adherencia** alta en las paredes de la perforación. Plasticidad del envase y respuesta de la mezcla a la compresión. Respuesta equilibrada del fluido con el material. Excelente resistencia al retacado tras la adherencia.

Figura 43. Especificaciones técnicas de tacos de arcilla

El producto es comercializado en cajas de 25 kg, las cuales contienen 22 unidades (figura 44).



Figura 44. Caja de tacos inertes

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Cada taco posee una longitud de 45 centímetros y un diámetro de 51 milímetros (figura 45).



Figura 45. Longitud de taco

Los tacos deben ser colocados en los taladros correspondientes al arranque según lo muestra la figura 46.

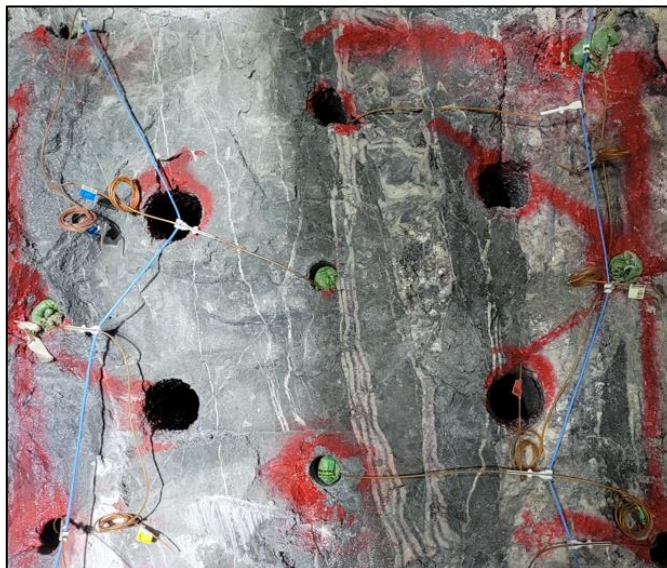


Figura 46. Utilización de tacos en el arranque

3.15 Capacitación del personal

Se realizaron capacitaciones a personal de campo respecto a los aspectos mostrados en incisos anteriores:

- Modelos de carga de las diferentes vetas.
- Secuencia de detonación.
- Evaluación de condición de los frentes.
- Control de perforación.
- Implementación y utilización de check list.
- Utilización de tacos de arcilla en taladros del arranque.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

3.16 Mediciones técnicas

Se realizaron controles de calidad a través de mediciones para la evaluación de resultados obtenidos en las voladuras:

- Mediciones de velocidad de detonación
- Vibraciones en campo lejano
- Grado de fragmentación.

Las mismas se llevaron a cabo en labores subterráneas de sección completa de diferentes niveles (para los cuales se implementaron los modelos de carga, secuencia de detonación, etc., descritos con anterioridad) de manera aleatoria; considerándose tanto voladuras en estéril y mineral.

Estas mediciones se realizaron de forma periódica, ejecutando el correspondiente reporte técnico a partir del cual se detalla el valor obtenido, para posteriormente realizar una comparación de los resultados según las condiciones en las que se midió.

3.16.1 Medición de la velocidad de detonación del explosivo

La velocidad de detonación, es uno de los indicadores que permite controlar la calidad del producto explosivo, verificando que el mismo alcance su VOD optima según el diámetro del taladro y confinamiento.

A continuación, se muestra el rango de valores frecuentes para la emulsión utilizada.

Tipo de Explosivo	VOD TIPICO (m/s)
Encartuchado en sitio	3500 a 4700
Emulsion explosiva	4000 a 5200
ANFO	3500 a 4100

Cuadro 14. Rango típico de VOD para la emulsión empleada



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Cada explosivo posee una velocidad de detonación óptima, la cual depende del diámetro de perforación, del confinamiento, temperatura, etc. La ficha técnica de la emulsión utilizada (cuadro 15) muestra un valor de velocidad de detonación óptimo para condiciones de trabajo standard (especificadas en la misma).

IBEMUX	
Densidade (g/cm ³)	0,90 a 1,25
Velocidade da detonação *(m/s)	4.800
Volume gasoso a 25°C (L/Kg)	990
Energia (KJ)	870
RWS **(%)	93
RBS **(%)	133
Resistência à água	Excelente
Classe de gases	1 (Não tóxico)

Cuadro 15. Características técnicas de emulsión utilizada

Estas mediciones permitieron analizar el comportamiento de la VOD en el interior del taladro para la carga explosiva asociado al mismo, si la VOD medida permanece constante luego de alcanzar un equilibrio autosostenido, implica que la detonación de la emulsión se produjo sin inconvenientes. Por otro lado, si la VOD aumenta progresivamente y alcanza un punto de inflexión para el cual disminuye exponencialmente, se puede afirmar que el explosivo ha deflagrado.

El procedimiento para la ejecución practica de medición de velocidad de detonación se anexa a “Anexo II”.

3.16.2 Medición de vibración en campo lejano

El objetivo de la medición de vibración en campo lejano consiste en determinar si las estructuras circundantes del sector en el cual se llevó a cabo, tienen la posibilidad de sufrir daños generados por dichas vibraciones.

Los equipos de vibración se encuentran calibrados según la norma internacional DIN 4150 (cuadro 16)

Tipo de Edificación	Frecuencia		
	Menos de 10 Hz	10 – 50 Hz	50 – 100 Hz
Estructuras delicadas muy sensibles a la vibración	3	3 - 8	8 - 10
Viviendas y Edificios	5	5 - 15	15 - 20
Comercial e Industrial	20	20 - 40	40 - 50

Cuadro 16. Valores máximos de PPV norma DIN 4150



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Los recursos y el procedimiento detallado para la ejecución de esta medición de se muestran en el Anexo II.

3.16.3 Procedimiento de medición de fragmentación

Se tomaron muestras fotográficas aleatorias del material volado en interior o exterior de mina utilizando un elemento de referencia con tamaño conocido (figura 47), según el procedimiento explicado en el anexo II, las cuales se procesan en el software para obtener la curva granulométrica y el valor del P_{80}^{15} (mm). De tal manera que sea posible determinar si su tamaño es adecuado para la alimentación de la planta y como material de relleno.

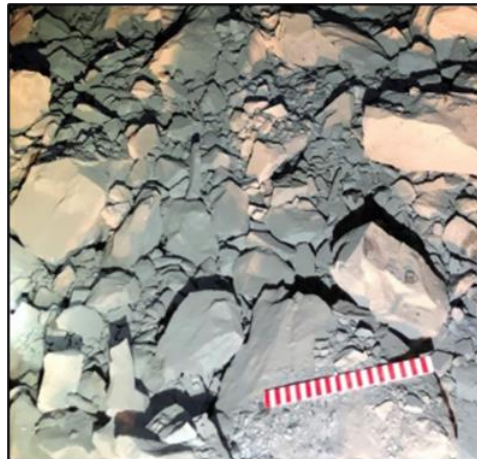


Figura 47. Registro fotográfico para medición de fragmentación

¹⁵ P_{80} : Tamaño de abertura de la malla de cribado para el cual el 80% de las partículas son pasantes.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

CAPITULO 4

PRUEBAS DE VOLADURAS EN DESARROLLO Y PREPARACION

Se ejecutaron un total de diez (10) voladuras en el análisis, estas se realizaron para obtener datos relacionados a la eficiencia de las mismas y el comportamiento del explosivo, considerando una previa modificación de los diagramas de perforación y modelos de carga asociados a las vetas que ejecutan tareas de desarrollo y preparación en el proyecto. Estas modificaciones fueron planteadas debido a resultados desfavorables, que presentan las voladuras de labores subterráneas de sección completa previo al análisis (sobre excavación, elevado factor de carga, proyección excesiva del material volado, vibraciones).

Los datos recopilados fueron tanto cuantitativos como cualitativos (detallados en el capítulo 3), se diferencia la información obtenida como previa y posterior a la voladura. Dentro de la información previa se incluye:

- Diagrama de perforación real (cantidad de taladros totales y por sección del frente, taladros no perforados, sección de la labor).
- Control de perforación (paralelismo de taladros, longitudes de perforación, espaciamiento y Burden, taladros tapados, taladros cortos).
- Categorización del estado del frente (capitulo 3.11).
- Llenado de check list de voladura.

Los mismos consisten en datos cualitativos, estos son de suma importancia, ya que el estado del frente y de la perforación influye en los resultados de las mediciones técnicas a ejecutar posteriormente; permitiendo establecer si estas son representativas del comportamiento del explosivo y de la voladura.

Luego, la información recopilada una vez concluida la voladura:

- Secuencia de detonación empleada en campo.
- Análisis de la secuencia de detonación real mediante líneas de Isotiempo.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

- Sobre excavación del sector.
- Rendimiento de avance.
- Consumo real de explosivo.
- Simulación de energía en base al diagrama de perforación real y consumo de explosivo registrado.
- Análisis del resultado para las mediciones técnicas realizadas.
- Reporte de voladura.

El procedimiento empleado para el registro de datos suele seguir dicho orden, sin embargo; no siempre es posible o necesario analizar todos los aspectos mencionados anteriormente. Por ejemplo, la realización del control de perforación es factible siempre y cuando se disponga de tiempo para el mismo. No se considera como tarea fundamental realizar simulaciones de energía, ya que no es posible incluir en las simulaciones la orientación real de las perforaciones, por lo que suelen emplearse en el caso en el cual la sobre excavación resultante sea elevada respecto a los valores registrados en la base de datos para el sector correspondiente.

Es importante recordar que, según se aclaró en las limitaciones del estudio y la metodología de trabajo (capítulo 3), la cantidad de mediciones técnicas que se llevan a cabo es limitada, por lo que no es frecuente realizar las misma de manera simultánea en una misma voladura.

Una vez recopilados los datos correspondientes a las pruebas, se debe realizar una comparación respecto a los valores registrados en la base de datos previos al análisis y de esa forma comprobar si se generaron ahorros y mejoras en la eficiencia de las voladuras.

Las pruebas fueron resumidas por mina, explicándose detalladamente la primera prueba y resumiéndose los resultados de las demás, esto con el objetivo de no volver repetitiva la explicación y su lectura.

VETA MARIANA CENTRAL

4.1 PRUEBA 1 “MC425GTW”

4.1.1 Perforación real del frente

La ubicación real de los taladros perforados es de suma importancia para los análisis que se realizarán posteriormente a la voladura (análisis de isocargas, simulaciones de energía, etc.). Para ello, se toma un registro fotográfico del frente y se posicionan los taladros perforados (figura 48):

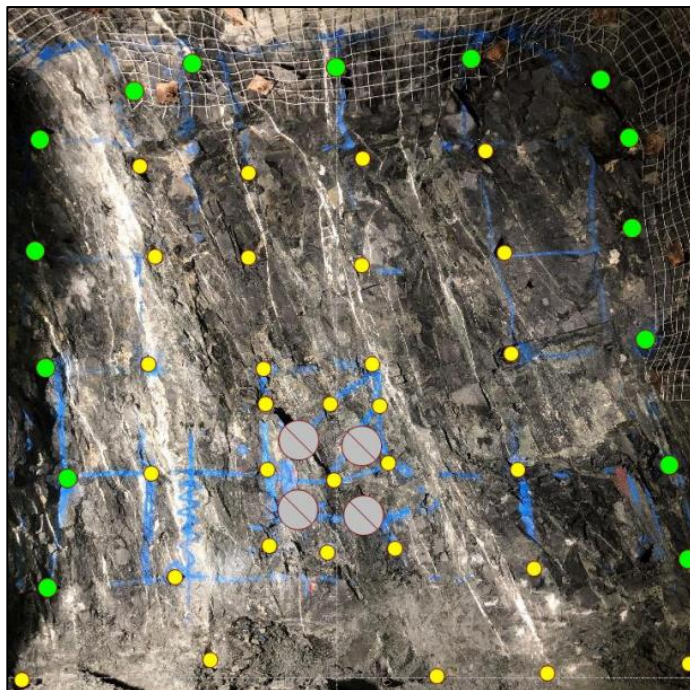


Figura 48. Perforación real del frente Prueba 1

4.1.2 Control de Perforación

Como se explicó en la metodología de trabajo para la ejecución de las pruebas, no siempre se dispone del tiempo necesario para llevar a cabo un control completo respecto a la perforación de todo el frente, para dichos casos, siempre que sea posible, se debe priorizar un control respecto a los taladros del arranque, evaluando su longitud de perforación, Burden y espaciamiento (figura 49).

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

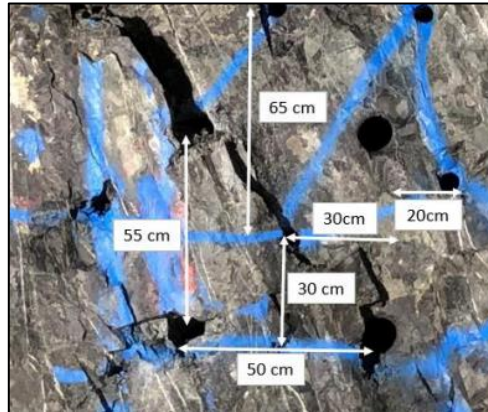


Figura 49. Chequeo de Burden/Espaciamiento Prueba 1

Se observaron espaciamientos superiores a lo establecido para el diagrama teórico de perforación establecido para Veta Marianas. Es importante realizar este procedimiento cuando se observen irregularidades en el arranque.

Adicionalmente, se midieron alto y ancho del frente, así como la longitud de perforación promedio, las mismas fueron determinadas por medio de un distanciómetro laser.

4.1.3 Adherencia al Diagrama de Perforación

Se evaluó la adherencia al diagrama de perforación teórico con arranque en el centro implementando para Veta Marianas descrito previamente (capítulo 3).

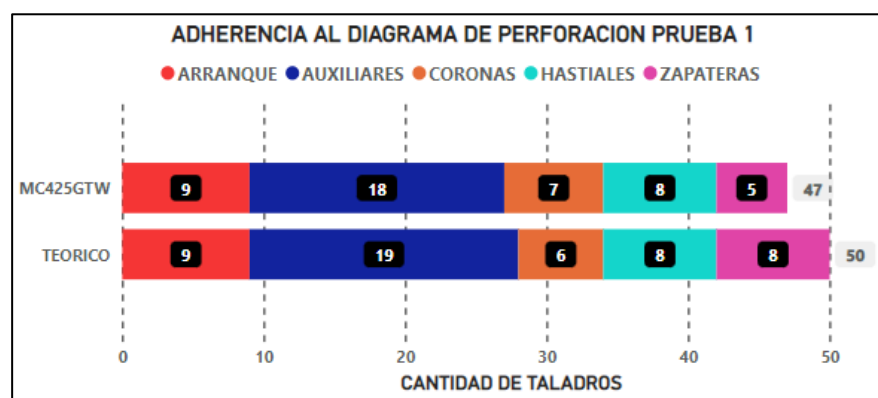


Figura 50. Adherencia Diagrama de Perforación Teórico Prueba 1

Según la cantidad de taladros perforados, mostrados en la figura 50, se identifican desvíos respecto al modelo teórico establecido para las pruebas en



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Veta Mariana Central. La adherencia al diagrama de perforación teórico para la prueba realizada en MC425GTW fue del 92%.

4.1.4 Check List de Voladura

La información recopilada anteriormente se registró en el check list de voladura, el mismo se encuentra a cargo del supervisor de la empresa especialista en explosivos. Una vez llenado el mismo (según la estructura mostrada en el capítulo 3), el check list de campo es digitalizado (figura 51) y subido a la base de datos para quedar registrado y ser posteriormente enviado al socio estratégico.

REGISTRO DE DISPARO EN LABOR HORIZONTAL												
Fecha	5/10/2021	Mina	MC	Diagrama	Pozos		Diámetro	Explosivo		Detonador	Taco	
Turno	B	Sector	425GTW	Tipo	Plan	Real	mm	Kg	Tipo	Un	Mts	
Hora Entrega	17:00	Tipo	Sección Completa	Escariados	4	4	102					
Hora Recepción	17:30			Rainuras	9	9		51,9	Emulsión	9	1	
Hora inicio carguío	18:00	Comunicados	4	Auxiliares	19	16	51	92,3	Emulsión	16	0,8	
Hora fin carguío	19:00	Cortos	5	Hastial	8	10		57,7	Emulsión	10	0,7	
Hora voladura	20:00	No perforados	1	Coronas	6	5		28,8	Emulsión	5	0,9	
		Tapados	1	Zapateras	8	5		28,8	Emulsión	5	1	
				Desquinche								
Observaciones:	Presencia de aceros		NO	Total	54	49		259,5		45		
Presencia de falla a 2,5 m en todo el frente												
										Consumo Explosivo		
										APD	45	un
										Detonadores	45	un
										CORDON NP 40GR	35	un
										CORDON NP 5GR	75	un
										BRINEL 500 m LIP	1	un
										Emulsion	259,5	un
										Encartuchado		un
										TACO DE ARCILLA 45 mm		un
										Parámetros Generales		
										Tipo de roca	Estéril	
										Estado de frente	Regular	
										Densidad roca (g/cm ³)	2,65	
										Ancho frente	4,53	m
										Alto frente	4,48	m
										Largo pozo plan	3,8	m
										Largo pozo perforado	3,8	m
										Toneladas a remover	204	ton
										Factor Carga (kg/t)	1,27	

Figura 51. Check List Prueba 1

Se reportó la presencia de una falla estructural en toda la dimensión del frente, estas suelen generar resultados adversos en la voladura, influyendo principalmente en el rendimiento de avance. Se clasifica el estado del frente según la metodología de trabajo explicada en el capítulo 3 como regular.

Se registró el consumo de explosivo en los sectores del frente (hastiales, corona, zapateras y auxiliares) de manera diferenciada, el operador del equipo



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

de carga es el que registra estos datos en su propia planilla de consumo, los kilogramos de emulsión usados son marcados por el equipo de carga. Se muestra también el consumo total de explosivo.

El valor del factor de carga mostrado el check list (figura 56) es un estimado teórico, una vez que el área de Topografía perteneciente al socio estratégico informa el avance para la voladura, se sustituye este valor por el real en los reportes; ya que el área de topografía envía la información en un lapso de aproximadamente 2 días, los reportes de voladura son enviados al día siguiente de haberse realizado.

4.1.5 Avance de Voladura y Sobre excavación

En este caso, el área de topografía reportó posteriormente un avance de 4 metros, ya que la longitud de perforación promedio fue de 3,8 metros; el rendimiento de avance será superior al 100%. Esto se debe al ajuste topográfico de avance que realizó el área de topografía en el cierre de avance semanal/mensual. Se consideraron estos avances como reales, ya que deben coincidir con lo reportado por el socio estratégico.

LABOR	FECHA	MINA	Vreal (m3)	Avance (m)	Vdiseño (m3)	%SE	Objetivo de sobreexcavacion
MC325GTW	5/10/2021	MC	224,19	4,00	212,981	5,64%	15,00%

Cuadro 17. Avance y sobre excavación reportados Prueba 1

4.1.6 Simulación De Distribución De Energía

A partir del diagrama real de perforación, la carga explosiva y secuencia de detonación empleadas, es posible realizar una simulación de la distribución de energía real de la voladura.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

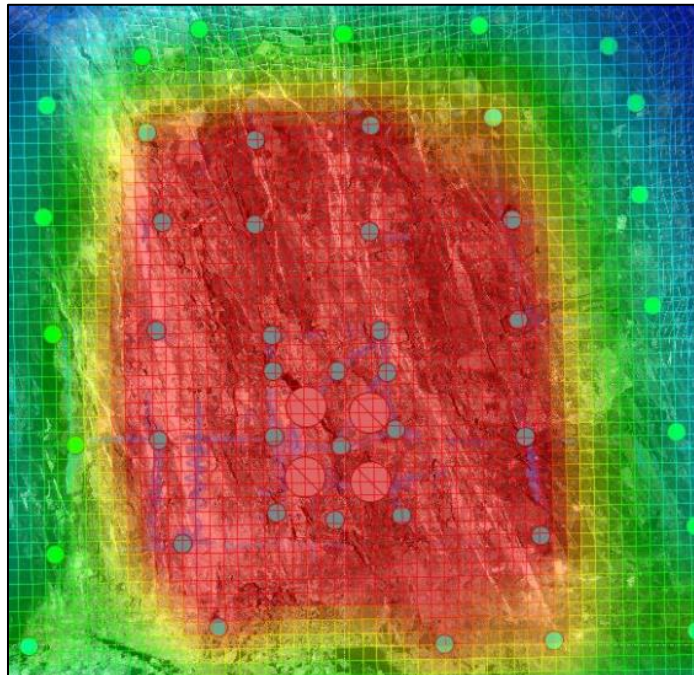


Figura 52. Simulación De Distribución De Energía Prueba 1

Comentarios:

- Se observó una distribución de carga irregular. Ya que la mayor concentración de energía se da en la zona central de la distribución (marcada de color rojo), sin embargo; en el sector de los auxiliares de hastial la energía tiende a disminuir rápidamente, tomando una tonalidad amarilla, marcando la reducción de la energía, esto debido a que el espaciamiento entre los auxiliares de hastial y los hastiales es superior a lo establecido teóricamente para el diagrama, provocando que la energía asociada al modelo de carga no sea la necesaria para el arranque de ese sector; provocando que se redirija la energía al centro de la voladura.
- Se mostraron niveles de energía bajos (tonalidad verde) para el contorno a excepción de las zapateras, asociado a lo que se mencionó anteriormente.
- Se llevaron a cabo un aumento de la carga de los pozos de la zapatera en el campo debido a que el espaciamiento real entre estos era superior al teórico.

4.1.7 Medición De La Velocidad De Detonación

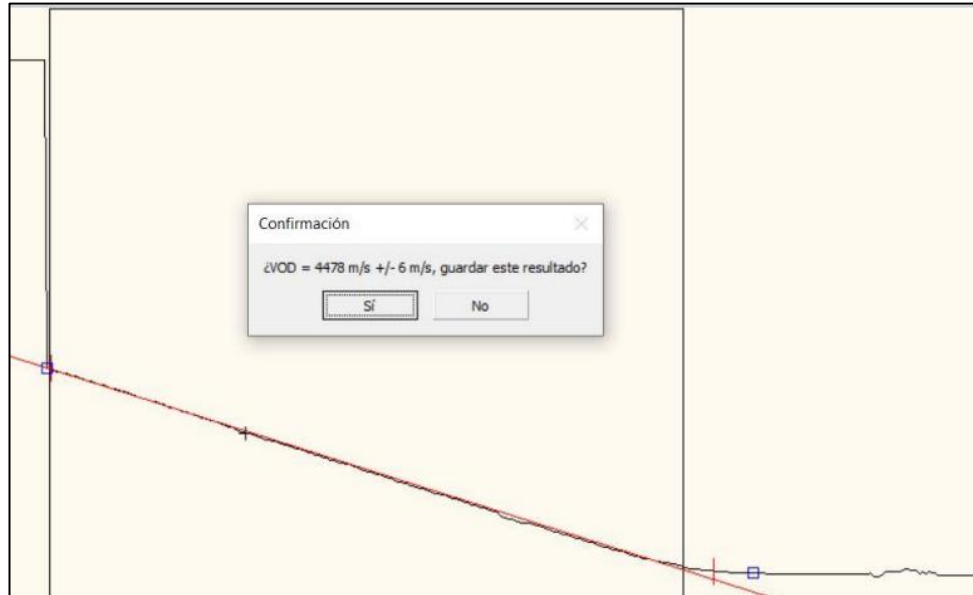


Figura 53. Velocidad de Detonación Prueba 1

Se realizó la medición de la velocidad de detonación en el primer taladro del arranque. Se explica el procedimiento de medición de manera detallada en el Anexo II. Se obtuvo:

$$VOD \left(\frac{m}{seg} \right) = 4478$$

Este se encuentra dentro de los valores típicos de VOD para la emulsión utilizada.

4.1.8 Medición De Vibraciones En Campo Lejano

Una vez realizada la medición según los procedimientos correspondientes (Anexo II), se debe llevar el equipo a superficie y conectarlo a una computadora con el software de vibración y generar automáticamente un archivo PDF con los resultados (figuras 54, 55 y cuadro 18).

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

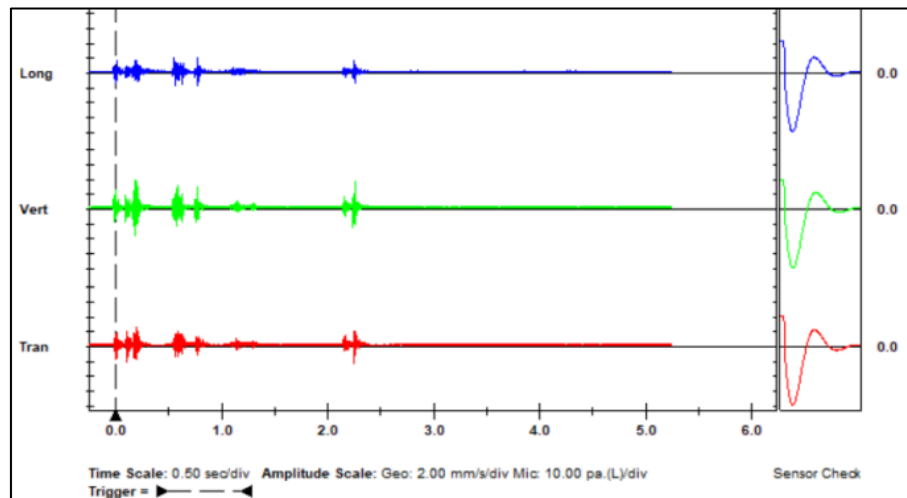


Figura 54. Medición de Vibración Prueba 1

La figura 54 muestra el comportamiento de las vibraciones generadas por la voladura en los ejes longitudinal, vertical y transversal. En este caso se observaron vibraciones uniformes en los diferentes ejes.

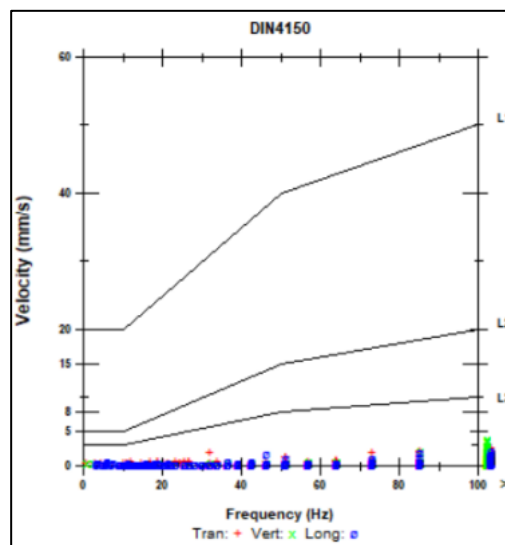


Figura 55. Daño en estructuras delicadas según Norma DIN 4150

La figura 55 muestra la magnitud de las vibraciones generadas en milímetros por segundo según su frecuencia durante la voladura realizada, en función de dicha información se establece cual es el efecto que producen las vibraciones sobre las estructuras circundantes al sector donde se midió. Los equipos de vibración se encuentran calibrados según la norma internacional DIN 4150.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

En este caso, las vibraciones generadas se ubican debajo de la línea 3 (estructuras delicadas muy sensibles a la vibración), indicando que hay baja probabilidad de que se haya generado daño incluso a estructuras sensibles.

	Trans	Vertical	Long
PPV (mm/s)	2,54	3,94	2,16
Tiempo (Relacionado al Disparador) (seg)	0,198	0,178	0,554
Frecuencia (Hz)	>100	>100	>100
VECTOR SUMA (mm/s):	34,3 (0,024 seg)		

Cuadro 18. Resumen de las vibraciones medidas

En el cuadro 18 se muestra la velocidad pico de la partícula (PPV), que representa el vector suma del desplazamiento de las partículas y el instante en el que se produjo.

Se identificó que detonación corresponde el PPV por medio de la secuencia de iniciación, teniendo en cuenta el instante en el que se produjo. El PPV fue registrado a los 24 milisegundos, correspondiente a la detonación del primer taladro.

4.1.9 Análisis Granulométrico

Se realizaron muestras fotográficas aleatorias del material volado en interior de mina (figura 56), según el procedimiento explicado en el Anexo II, las cuales se procesaron en software de análisis para obtener la curva granulométrica (figura 57) y el valor del P_{80} (mm).

Se representó la curva granulométrica por medio del porcentaje de pasante en el eje vertical (lineal) y el tamaño de las partículas en milímetros en el eje horizontal mediante una escala logarítmica.

Una vez obtenida la curva granulométrica se debe obtener el valor del P_{80} interpolando entre los porcentajes del material pasante y los tamaños de las partículas:

$$P_{80}(mm) = 536,47$$

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

El P_{80} obtenido es inferior al tamaño de alimentación a la trituradora Kleeman (1000 milímetros), esta se encarga de producir material de relleno.

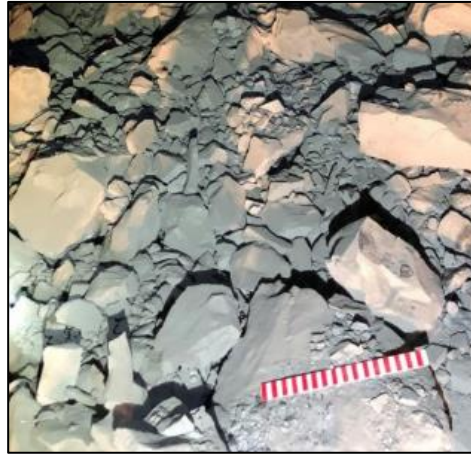


Figura 56. Registro fotográfico Prueba 1

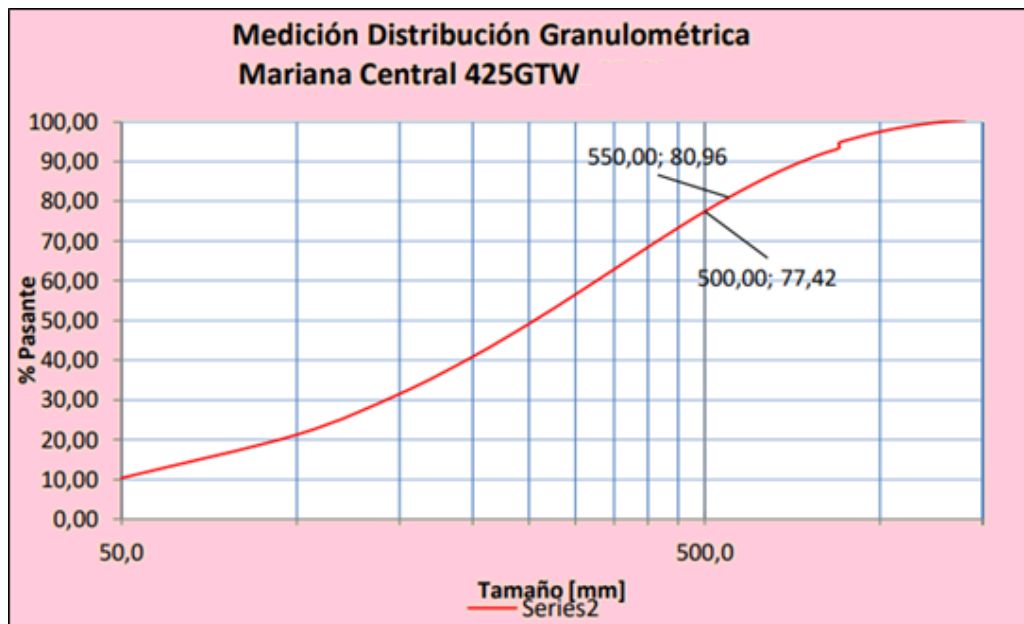


Figura 57. Distribución granulométrica Prueba 1



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

4.1.10 Check List Prueba 6 “MC425GB026E”

Se incluyó el check list de la prueba 6 (figura 58) debido a la importancia de este en este caso.

REGISTRO DE DISPARO EN LABOR HORIZONTAL			
Fecha	15/11/2021	Mina	MN
Turno	B	Sector	425GB026E
Hora Entrega	17:00	Tipo	Sección Completa
Hora Recepción	17:30		
Hora inicio carguío	18:00	Comunicados	0
Hora fin carguío	19:00	Cortos	5
Hora voladura	20:00	No perforados	2
		Tapados	1
Observaciones:		Presencia de aceros	NO
Presencia de falla a 2 m			

Diagrama	Pozos		Diámetro	Explosivo		Detonador	Taco	
Tipo	Plan	Real	mm	Kg	Tipo	Un	Mts	
Escariados	4	4	102					
Rainuras	9	9	51	43,3	Emulsión	9	1	
Auxiliares	19	21		89	Emulsión	21	0,7	
Hastial	8	10		48,1	Emulsión	10	0,7	
Coronas	6	6		28,8	Emulsión	6	1	
Zapateras	8	6		40,8	Emulsión	6	1	
Desquinche								
Total	54	56			250		52	

Consumo Explosivo		
APD	52	un
Detonadores	52	un
CORDON NP 40GR	45	un
CORDON NP 5GR	80	un
BRINEL 500 m LIP	1	un
Emulsion	250	un
Encartuchado		un
TACO DE ARCILLA 45 mm		un
Parámetros Generales		
Tipo de roca	Mineral	
Estado de frente	Irregular	
Densidad roca (g/cm ³)	2,65	
Ancho frente	4,65	m
Alto frente	4,45	m
Largo pozo plan	3,8	m
Largo pozo perforado	3,8	m
Toneladas a remover	208	ton
Factor Carga (kg/t)	1,20	

Figura 58. Check List Prueba 6

Se reportó, la presencia de una falla estructural a 2 metros, cinco (5) taladros cortos y un (1) tapado, categorizándose como irregular.

4.1.11 Resumen resultados Veta Mariana Central

Se empleó la misma metodología de trabajo para la prueba 6. A continuación, se resumieron los resultados de las pruebas 1 y 6 llevadas a cabo en Veta Mariana Central.

N° DE PRUEBA	Sector	FC (kg/tn)	Rendimiento Avance (%)	Sobre Excavacion (%)	VOD (mm/s)	PPV (mm/s)	P ₈₀ (mm)	Adherencia diagrama de Perforacion (%)
1	MC425GTW	1,21	105,3	5,64	4478	34,3	536,47	92
6	MC425GB026E	1,42	84	16,71	N/A	19,158	N/A	90

Cuadro 19. Resumen Resultados Veta Mariana Central

VETA EMILIA

4.2.1 Simulación de Isolneas Prueba 2 “EM475RPA”

La figura 59, muestra un modelo de simulación de isolneas asociado a la secuencia de detonación, carga explosiva y diagrama de perforación reales, el arranque de color azul, indica un tiempo entre pozos del arranque como “muy estable” (250 ms). Esta interpretación es realizada por el software de simulación.

No hay teoría que establezca cual es el tiempo optimo a emplear entre pozos próximos del arranque cuando se utilizan múltiples escariados, en este caso, permite asegurar la salida del material del arranque, favoreciendo posteriormente la proyección del material volado por los pozos auxiliares.

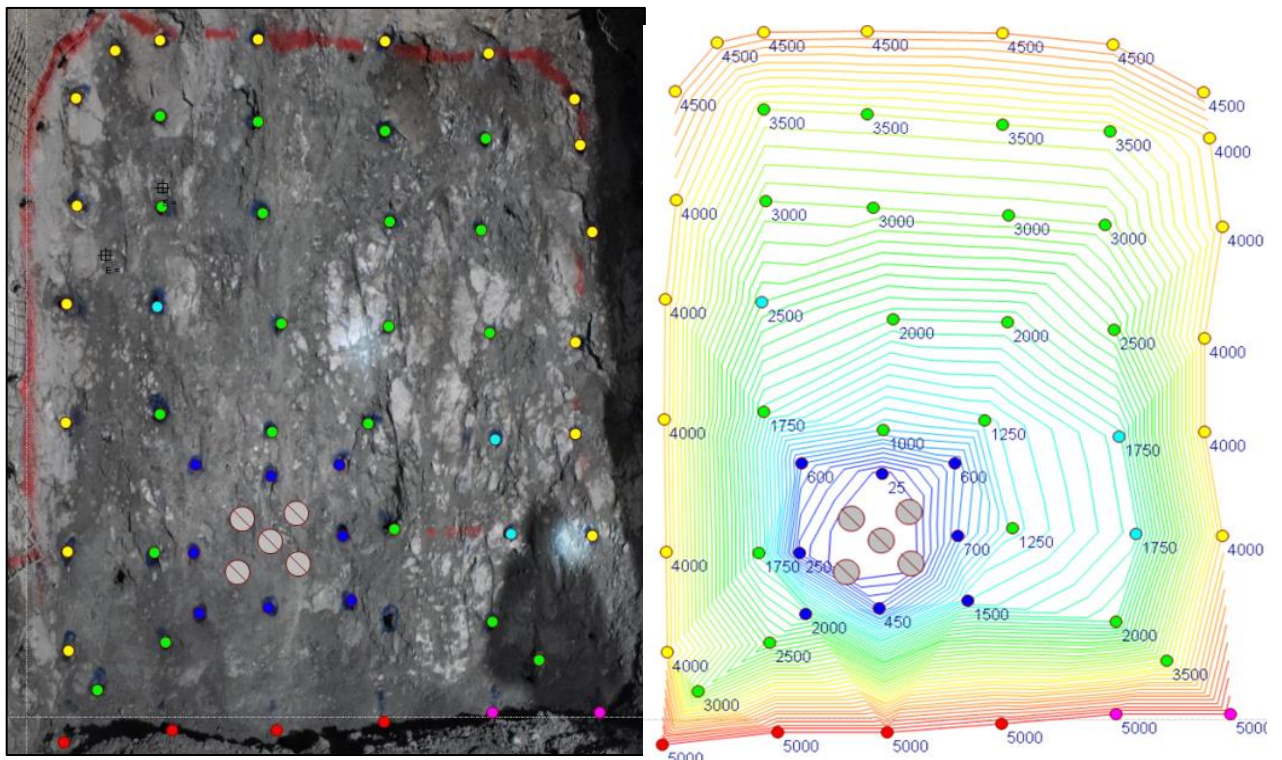


Figura 59. Simulación de isolneas Prueba 2

En el caso de los taladros pertenecientes al contorno, se observaron isolneas de color amarillo y azul, considerando el tiempo como corto, lo que favorece la generación del plano de fractura, el cual evita la sobre excavación. La secuencia se realizó con un tiempo final de 5000 milisegundos.

4.2.2 Simulación de Isolneas Prueba 7

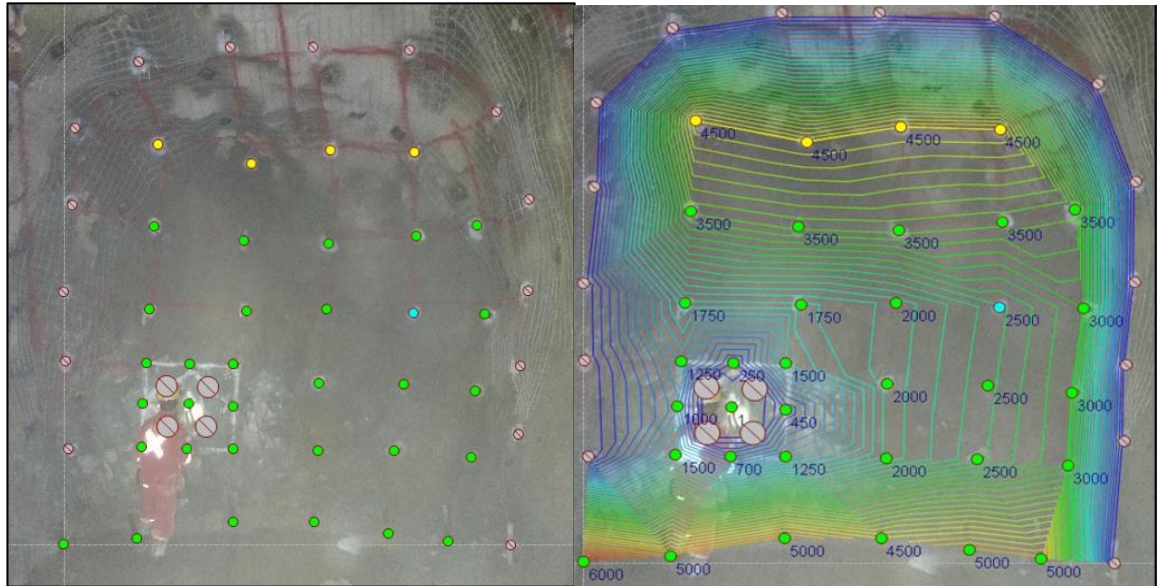


Figura 60. Simulación de Isolneas Prueba 7

Se observó en la figura 60 isolneas de color azul, indicando baja influencia en dicho sector. La secuencia se realizó con detonadores con un tiempo final de 6000 milisegundos.

4.2.3 Carga del arranque Prueba 7

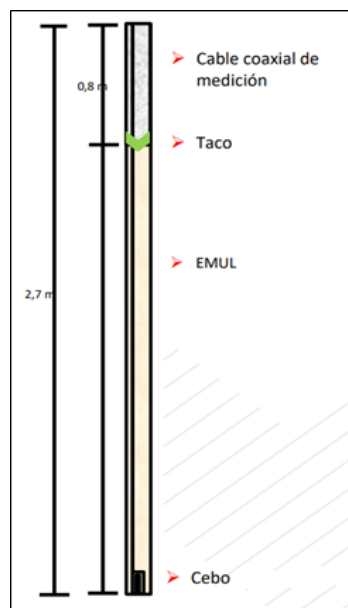


Figura 61. Carga del Arranque Prueba 7



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

VETA MARIANA NORTE

4.3.1 Resumen Resultados Veta Mariana Norte

A continuación, se resumieron los resultados de las pruebas 5 y 8 llevadas a cabo en Veta San Marcos donde se siguió la misma metodología de trabajo.

N° DE PRUEBA	Sector	FC (kg/tn)	Rendimiento Avance (%)	Sobre Excavacion (%)	PPV (mm/s)	P₈₀ (mm)	Adherencia diagrama de Perforacion (%)
5	MN475GB038E	1,34	95,6	18,52	6,324	207,63	92
8	MN350EV588W	1,30	95	8,62	20,86	245,01	92

Cuadro 21. Resumen Resultados Veta Mariana Norte

VETA SAN MARCOS

4.4.1 Resumen Resultados Veta San Marcos

A continuación, se resumieron los resultados de las pruebas 3, 4 y 9 llevadas a cabo en Veta San Marcos.

N° DE PRUEBA	Sector	FC (kg/tn)	Rendimiento Avance (%)	VOD (mm/s)	PPV (mm/s)	P₈₀ (mm)	Adherencia diagrama de Perforacion (%)
3	SM425RPA	1,27	100	4266	3,941	280	88,7
4	SM475RPA	0,93	100	N/A	9,796	624	94,9
9	SM475RPA	1,22	100	5064	3,41	N/A	95

Cuadro 22. Resumen Resultados Veta San Marcos



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

CAPITULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS

Para una mejor interpretación de los resultados, se compararon los valores de cada parámetro obtenido en las diferentes pruebas de voladura (cuadro 23).

Prueba	MINA	Sector	Longitud de Perf. (m)	Carga Explosiva (kg)	Factor de carga (kg/tn)	Rendimiento De Avance (%)	P80 (mm)	Velocidad De Det. (mm/s)	PPV (mm/s)	Observaciones	Material
1	MC	MC325GTW	3,8	295,5	1,21	105,3	536,47	4478	4,19	Presencia de falla a 2,5 m en todo el frente. (Relleno)	Esteril
2	EM	EM475RPA	3,8	394	1,67	94,7	163	4906		6 Taladros cortos, 2 comunicados, 2 no perforados y 2 tapados	Esteril
3	SM	SM425RPA	3,8	330	1,27	100	280	4266	3,941	4 Taladros cortos, 3 comunicados	Esteril
4	SM	SM475RPA	3,5	233	0,93	100	624		9,796	4 taladros cortos, 2 comunicados	Esteril
5	MN	MN475GB038E	4,5	319,6	1,34	95,6	207,63		6,324	Sin Observaciones	Mineral
6	MC	MC425GB026E	3,8	250	1,42	84			19,158	Presencia de falla a 2 m	Mineral
7	EM	EM425RPA	2,7	165	1,38	92,6	212	4160	4,702	Presencia de falla y taladros cortos	Esteril
8	MN	MN350EV588W	4,2	305	1,30	95	245,01		20,86	3 taladros cortos	Esteril
9	SM	SM475RPA	3,8	371	1,30	100		4744	16,337	Barro en los taladros	Esteril
10	EM	EM400RPA	3,8	276	1,22	100		5064	3,41	4 Taladros cortos, 2 no perforados	Esteril

Cuadro 23. Tabla Resumen resultados Pruebas



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Base de Datos: Factor de carga y Rendimiento previos al análisis

Se consideraron voladuras de sección completa en desarrollo para estéril y preparación en mineral de la base de datos (cuadro 24) correspondiente al periodo previos al análisis, para establecer una relación entre el factor de carga y el rendimiento de avance obtenidos en el estudio. A partir de la base de datos se estableció un rendimiento de avance promedio de 91,54%, para un factor de carga promedio de 1,675 *kg/tn*.

SECTOR/NIVEL	FACTOR DE CARGA REAL (kg/tn)	RENDIMIENTO POR VOLADURA (%)
425RPA	1,27	110,53
475GB011W	1,67	110,00
528CX600W	1,49	106,67
430GB032W	1,38	105,41
242GB614W	1,68	102,86
525GB036W	1,48	102,86
450GTW	1,29	102,63
475ACC	1,46	102,63
350GB590E	1,44	100,00
380GB0W23W	1,31	100,00
502GB614E	1,31	100,00
425GB026W	1,28	94,29
554GB607E	1,46	92,11
525GB036E	1,61	89,47
425CX029N	1,39	86,67
425GB026E	1,30	84,44
550GB038E	1,37	77,14
300RPA	1,33	66,67
580GB038E	1,28	60,00
430GB032E	1,43	56,58

Cuadro 24. Base de Datos de Factor de Carga y Rendimiento de Avance (previo al análisis)

Factor de carga del análisis

El cuadro resumen (cuadro 25), muestra los valores teóricos de factor de carga esperados para los diagramas de perforación establecidos para Veta Marianas, así como para la modificación del modelo de carga de Veta San Marcos que fueron planteados en la metodología de trabajo.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

ARRANQUE CENTRO					
Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Perforacion (m)	Total Explosivo	Factor de Carga
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	3,8	267	1,26
			4,5	322	1,28
SM	5,5 x 5	51	3,8	337	1,16
ARRANQUE DERECHA/IZQUIERDA					
Vetas	Sección	Diámetro (mm)	Longitud Perforacion (m)	Total Explosivo	Factor de Carga
MC, MN, EM y EK	4,5 x 4,7	51	3,8	270	1,27
			4,5	325	1,29

Cuadro 25. Resumen Factor de Carga Teórico

A continuación, el gráfico (figura 63) resume los valores de factor obtenidos en las pruebas:

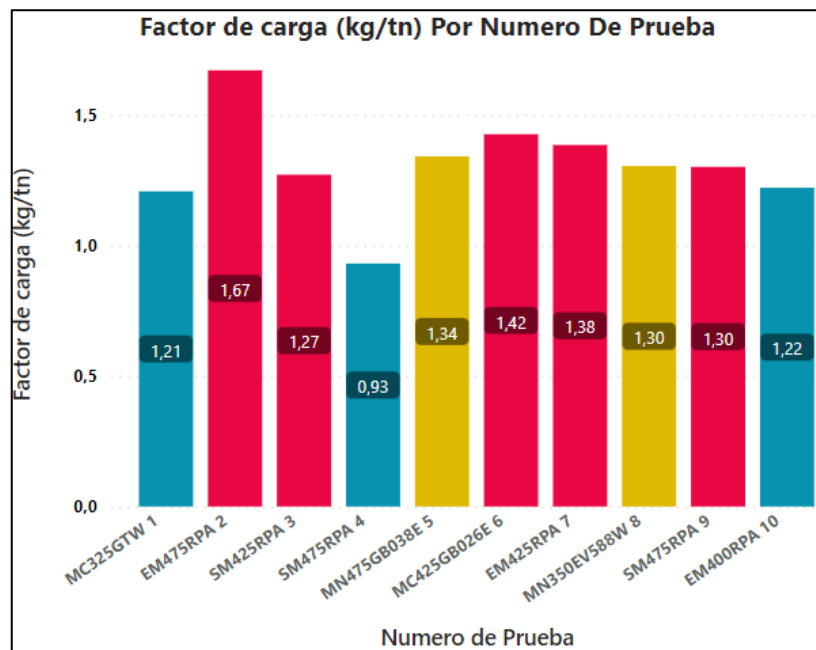


Figura 63. Factor de Carga por Numero de Prueba

Comentarios:

- Se muestra un factor de carga elevado respecto al estimado teórico (1,26 kg/tn , para una longitud de perforación de 3,8 metros) en el caso de la prueba número 2, realizada en EM475RPA, con un valor real de 1,67 kg/tn (marcado de color rojo en la figura 63); no se respetó el modelo de carga teórico establecido para el análisis, debido a las malas



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

condiciones de perforación, por lo que se reajustaron las cargas para los taladros circundantes.

- Las pruebas 1, 4 y 10 mostraron valores de factor de carga inferiores respecto a los planteados teóricamente para sus longitudes de perforación. Para el caso de la prueba 4, se alcanzó un factor de carga real de $0,93 \text{ kg/tn}$ (19,8 % inferior respecto al valor teórico esperado), esto se debió a la presencia de 4 taladros cortos y 2 comunicados, ya que no se incrementó la carga de los taladros cercanos.
- La prueba número 8, realizada en MN350EV588W obtuvo un factor de carga real de $1,30 \text{ kg/tn}$ (marcado de color amarillo), el cual es ligeramente superior a su estimado teórico de $1,28 \text{ kg/tn}$.
- La prueba número 5 (MN475GB038E), marcada de color amarillo, muestra un factor real de $1,34 \text{ kg/tn}$, superior en un 4,5% respecto al valor teórico de $1,28 \text{ kg/tn}$ para una longitud de 4,5 metros.
- La prueba número 3 realizada en SM425RPA obtuvo un factor de carga real de $1,27 \text{ kg/tn}$, superior en un 9,5 % respecto al planteado teóricamente ($1,16 \text{ kg/tn}$). Esto se debe a la presencia de 4 taladros cortos y 3 comunicados; por lo que se debió modificar la carga de los taladros adyacentes.
- En el caso de la prueba número 9, se muestra un factor de carga real de $1,30 \text{ kg/tn}$, un 12,1% superior al valor teórico para Veta San Marcos. Esto debido a que no se respetó el modelo de carga recomendado.
- Las pruebas 6 y 7 obtuvieron factores de carga reales de $1,42$ y $1,38 \text{ kg/tn}$ respectivamente, hasta un 11,3% superior al planteado en el modelo de carga teórico; esto se debe a la presencia de fallas estructurales en ambos frentes.
- El factor de carga real promedio obtenido para el análisis es de $1,30 \text{ kg/tn}$.

Rendimiento de avance del análisis

A continuación, la figura 64 indica las longitudes de perforación medidas con respecto al avance real de las voladuras realizadas en el análisis:

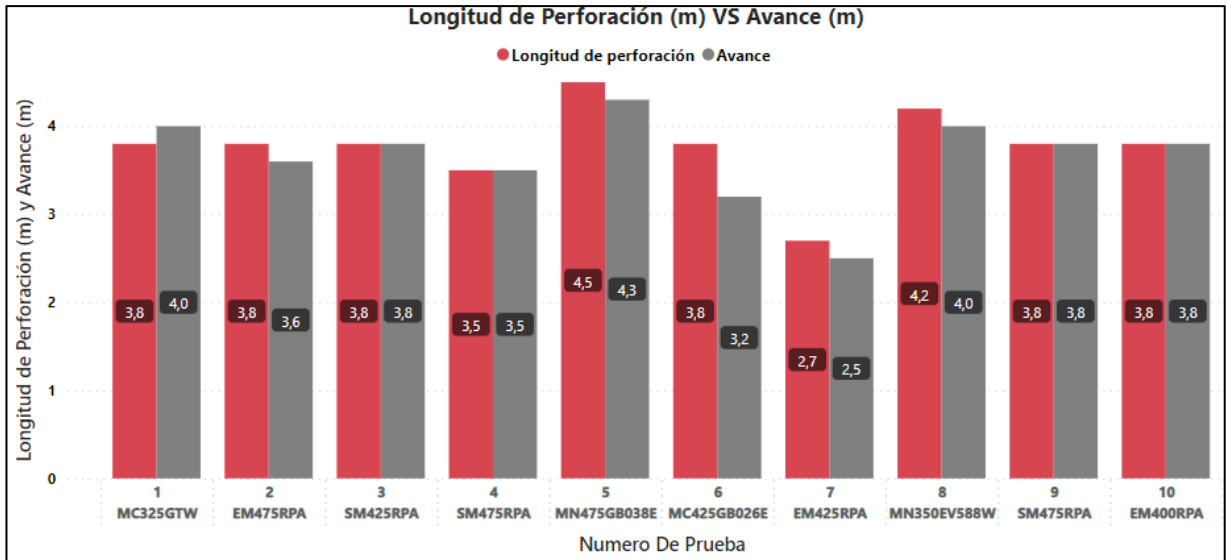


Figura 64. Longitud de Perforación y Avance medidos en análisis

La figura 64, muestra los rendimientos de avances obtenidos para las pruebas ejecutadas en el análisis con la implementación de tacos de arcilla en el arranque:

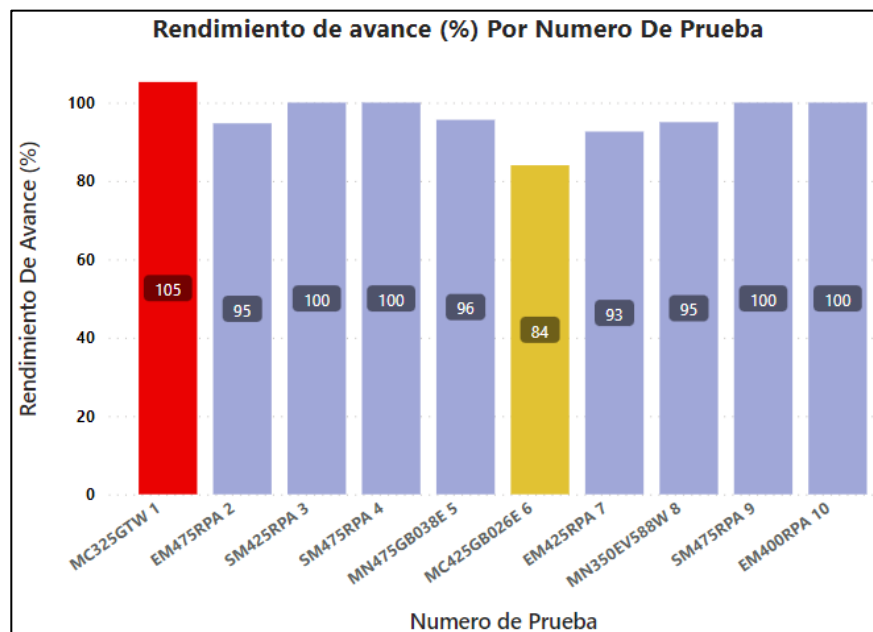


Figura 65. Rendimiento de Avance Por Prueba



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Comentarios:

- Para la prueba 1, se muestra un rendimiento de avance superior al 100%, según lo explicado en la metodología de trabajo, el avance de las voladuras es reportado por el área de topografía perteneciente al socio estratégico; este avance se debe al ajuste topográfico para cuadrar el avance real semanal/mensual de los sectores.
- Se expone un rendimiento de avance inferior a los demás para el caso de la prueba número 6, con 84%, donde se reportó la presencia de una falla estructural a 2 metros de longitud de perforación.
- Se alcanzaron buenos rendimientos de avance para las demás pruebas.
- Se mostró un valor promedio de rendimiento de avance del 96,72%. Superior al rendimiento de avance promedio previo al periodo de las pruebas y modificación del modelo de carga (91,54%).

Sobre Excavación en el análisis

Según lo explicado en el capítulo 3, la sobre excavación es reportada por el área de topografía perteneciente al socio estratégico por medio de una base de datos, para la cual, el valor promedio de sobre excavación para labores subterráneas de sección completa en el periodo previo al análisis fue de 23,41%.

El cuadro 26, muestra los valores de sobre excavación de las voladuras realizadas en Vetas Marianas para las pruebas correspondientes del análisis:

LABOR	MINA	Vreal (m3)	Avance (m)	Vdiseño (m3)	%SE	Objetivo de sobreexcavacion
MC325GTW	MC	224,19	4,00	212,981	5,64%	15,00%
EM475RPA	EM	201,77	3,60	207,376	3,70%	15,00%
MN475GB038E	MN	241,00	4,30	252,214	18,52%	15,00%
MC425GB026E	MC	179,35	3,20	209,618	16,71%	15,00%
EM425RPA	EM	140,12	2,50	218,585	9,24%	15,00%
MN350EV588W	MN	224,19	4,00	246,609	8,62%	15,00%
EM400RPA	EM	212,98	3,80	208,497	6,00%	15,00%

Cuadro 26. Sobre excavación en pruebas para Vetas Marianas



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Conforme lo descrito en la metodología de trabajo, no se lleva un control de la sobre excavación para el caso de Veta San Marcos. En la figura 66, se muestran los valores de sobre excavación generadas en las pruebas.

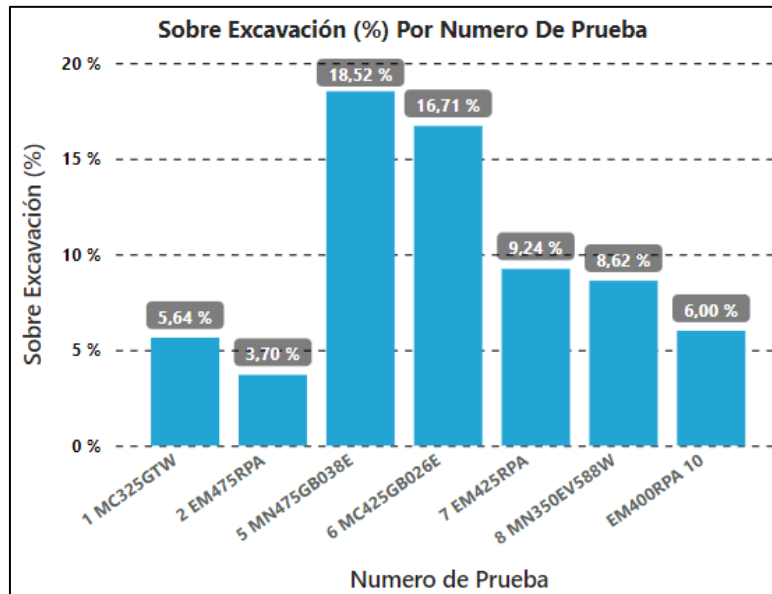


Figura 66. Sobre Excavación por prueba

Comentarios:

- Los valores de sobre excavación de las pruebas realizadas se encuentran por debajo del promedio registrado en la base de datos.
- Para el caso de las pruebas 5 y 6 se aprecian los valores de mayor magnitud de sobre excavación en el análisis, esto se debe a que corresponden a pruebas realizadas en labores basales, donde las condiciones estructurales suelen ser regulares u irregulares. Para el caso de la prueba 6, se reporta la presencia de una falla estructural a 2 metros de longitud.
- El resto de las pruebas muestra buenos resultados.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Adherencia al Diagrama de Perforación

La figura 67 muestra los valores de adherencia al diagrama de perforación teórico establecido para Veta Marianas expresados en porcentajes.

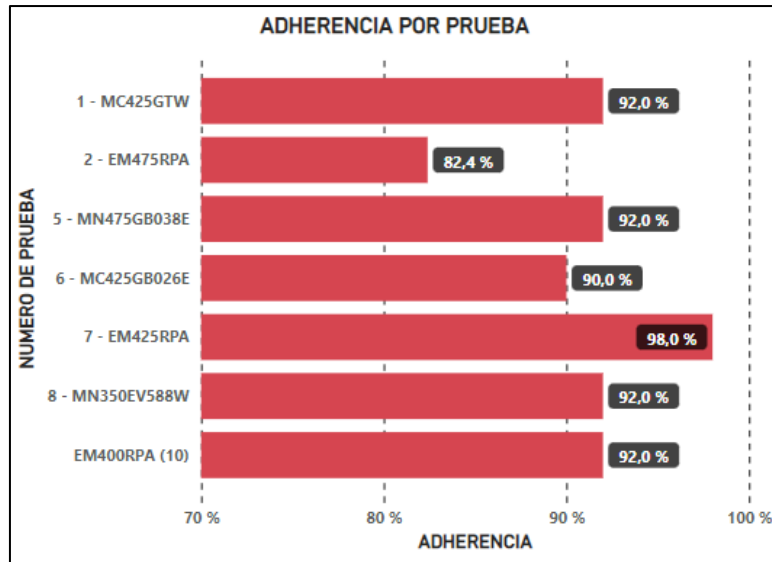


Figura 67. Adherencia Diagrama Teórico Por Prueba

Comentarios:

- Se observó una baja adherencia inferior a las demás pruebas para el caso de la prueba 2, debido a que el tamaño de la sección fue superior al teórico, supervisor de perforación realiza taladros adicionales no incluidos modelo teórico.
- Se obtuvo una adherencia de 98% para el caso de la prueba 7, sin embargo, el sector presentó una falla estructural, por lo que los taladros de la corona y hastiales no fueron cargados, debido a que su longitud fue descontinuada entre los 0,8 y 1 metro.
- Las demás pruebas presentan valores de adherencia similares.
- La adherencia promedio final fue del 91,2 % para el estudio.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Base de datos de Mediciones técnicas

Se utilizaron como referencia los valores de las mediciones técnicas (análisis granulométrico, velocidad de detonación y vibración en campo lejano) realizadas previamente al estudio y registradas en la base de datos.

Fecha de medición	Tipo de voladura	Tipo de explosivo	Densidad del explosivo (gr/cm ³)	Diámetro (mm)	Longitud de perforación (m)	Longitud de carga (m)	Taco (m)	Tipo de Taco	VOD (m/s)
21/2/2021	Desarrollo	Emulsion	1,16	51	3,8	3,3	0,5	Aire	4174
4/3/2021	Desarrollo	Emulsion	1,14	51	3,8	3	0,8	Aire	4151
12/3/2021	Desarrollo	Emulsion	1,08	45	3,8	3	0,8	Aire	4265
30/3/2021	Desarrollo	Emulsion	1,1	51	3,5	3	0,5	Aire	4052
1/4/2021	Desarrollo	Emulsion	1,18	45	3,8	3	0,8	Aire	4124
3/5/2021	Desarrollo	Emulsion	1,16	51	4,5	3,8	0,7	Aire	4319
5/5/2021	Desarrollo	Emulsion	1,18	51	2,1	1,4	0,7	Aire	4136
18/5/2021	Desarrollo	Emulsion	1,12	51	4,2	3,7	0,5	Aire	4281
28/5/2021	Desarrollo	Emulsion	0,98	51	4	3,2	0,8	Aire	4111
5/11/2021	Desarrollo	Emulsion	1,19	51	4	3,1	0,8	Aire	4188
11/11/2021	Desarrollo	Emulsion	1,04	51	4,5	3,6	0,9	Aire	4125
22/11/2021	Desarrollo	Emulsion	0,99	51	4	3,3	0,7	Aire	4327
26/11/2021	Desarrollo	Emulsion	0,99	51	3,8	3,1	0,7	Aire	4362

Figura 68. Base de datos de Velocidad de Detonación

A partir de dichos datos se calculó un valor promedio de velocidad de detonación para voladuras en las que no se empleó taco inerte.

$$VOD_{prom} = 4201 \frac{m}{s}$$



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Mediciones	Fecha de medición	Ubicación	Sector	Tipo de voladura	Material volado (Tn)	F. C (kg/tn)	P80 (mm)
Fragmentacion	12/3/2021	SM	450Rpa	Desarrollo	260	1,27	280
Fragmentacion	1/4/2021	SM	450Rpa	Desarrollo	321	1,27	1036
Fragmentacion	1/5/2021	SM	450RP	Desarrollo	265	1,69	303
Fragmentacion	3/5/2021	EM	355RP	Desarrollo	340	1,01	278
Fragmentacion	16/5/2021	SM	450RP	Desarrollo	255	0,91	624
Fragmentacion	20/5/2021	SM	450RP	Desarrollo	296,8	0,84	686
Fragmentacion	23/5/2021	MN	500XC021	Desarrollo	304	1,36	224,48
Fragmentacion	11/7/2021	MN	475GB038E_V1	Desarrollo	250	1,28	207,63
Fragmentacion	19/8/2021	MC	350EV588W	Desarrollo	243	1,38	245,01
Fragmentacion	20/8/2021	MC	350CX590	Desarrollo	239	1,15	204
Fragmentacion	19/9/2021	MN	550GTW	Desarrollo	274	1,24	380,72
Fragmentacion	9/12/2021	SM	450EG	Desarrollo	234	1,74	230,5

Figura 69. Base de datos de Fragmentación

La base datos de mediciones proporcionó un valor promedio de P_{80} de 298 milímetros.

Análisis de fragmentación del estudio

La figura 70 muestra los valores de P_{80} obtenidos en el análisis:

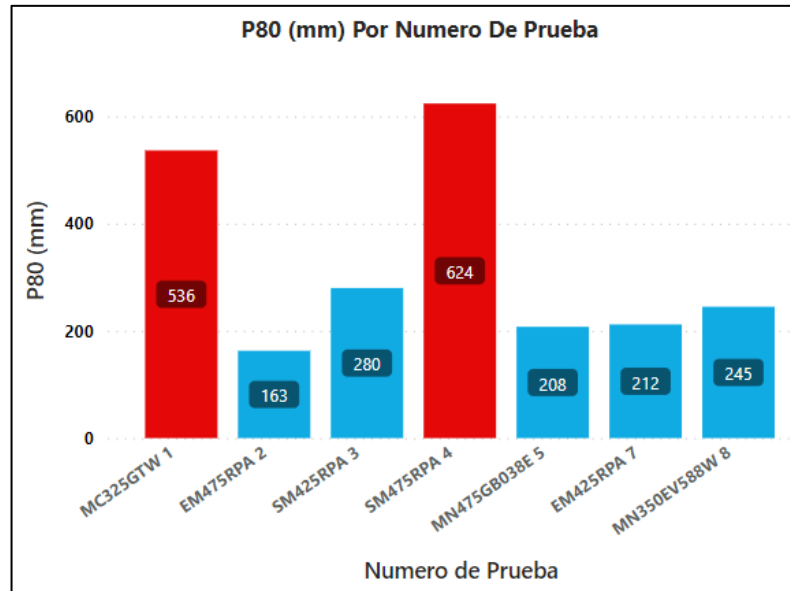


Figura 70. P_{80} Obtenido por Prueba

Comentarios:

- Se observó un valor de P_{80} elevado (respecto al promedio de la base de datos) para el caso de la prueba 1, con 536 milímetros, se reporto la presencia de una falla estructural en el frente.
- Para el caso de la prueba 4, se muestra un $P_{80} = 624 \text{ mm}$, el factor de carga para dicha prueba fue de $0,93 \text{ kg/tn}$, por lo que la baja carga explosiva influyo negativamente en la fragmentación, debido a que no se ajustó la cantidad de explosivo en base a las condiciones de perforación.
- Se observaron buenos valores de P_{80} para las demás pruebas (inferiores al promedio registrado en la base de datos).
- Se obtuvo un promedio de P_{80} de 324 milímetros para el análisis., por lo que la granulometría promedio obtenida en las pruebas es 8,7% mayor al promedio registrado en la base de datos.

Velocidades de detonación medidas en el análisis

La figura 71 muestra los resultados obtenidos en el análisis de las velocidades de detonación medidas.

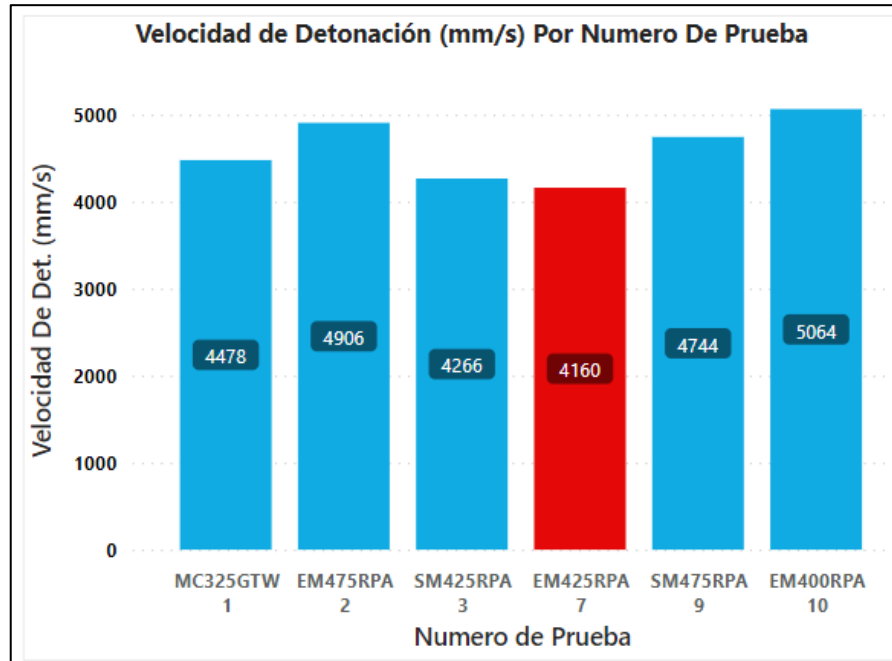


Figura 71. Velocidad de Detonación por Prueba

A continuación (figura 72), se muestra una comparación entre la velocidad de detonación y el rendimiento de avance registrados en la base de datos, respecto a los resultados promedio obtenidos en las pruebas:

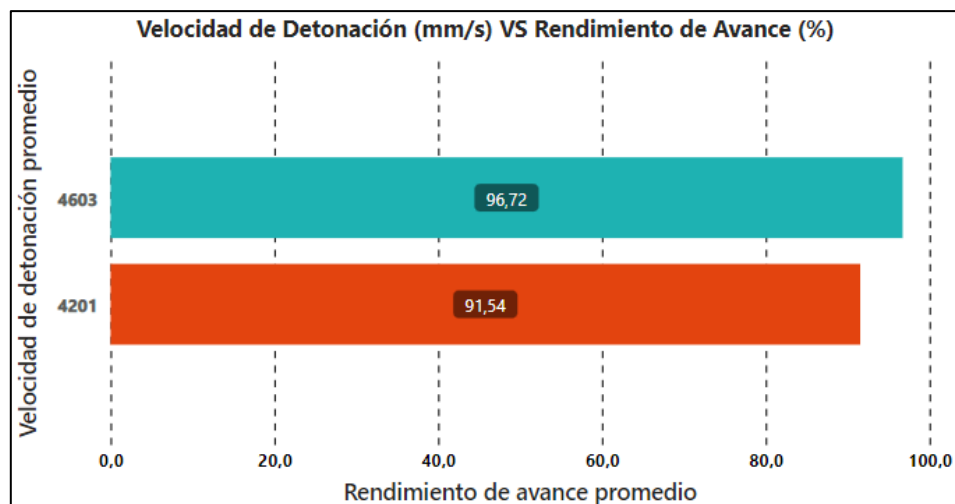


Figura 72. Velocidad de detonación VS Rendimiento de Avance



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Comentarios:

- Para el caso de la prueba 7, se observa una velocidad de detonación inferior al promedio obtenido de la base de datos de mediciones técnicas (4201 mm/s), se reporto la presencia de una falla estructural en el frente.
- El resto de las mediciones realizadas mostraron valores superiores al promedio mencionado anteriormente.
- Se emplearon tacos inertes de arcilla para los taladros del arranque, incluyendo en los que se realizaron las mediciones.
- Se estableció un valor promedio de velocidad de detonación para las mediciones del estudio de $4603 \frac{m}{s}$.

Vibraciones en campo lejano medidas en el análisis

La figura 73, muestra los valores de PPV de las vibraciones en campo lejano medidas durante el estudio.

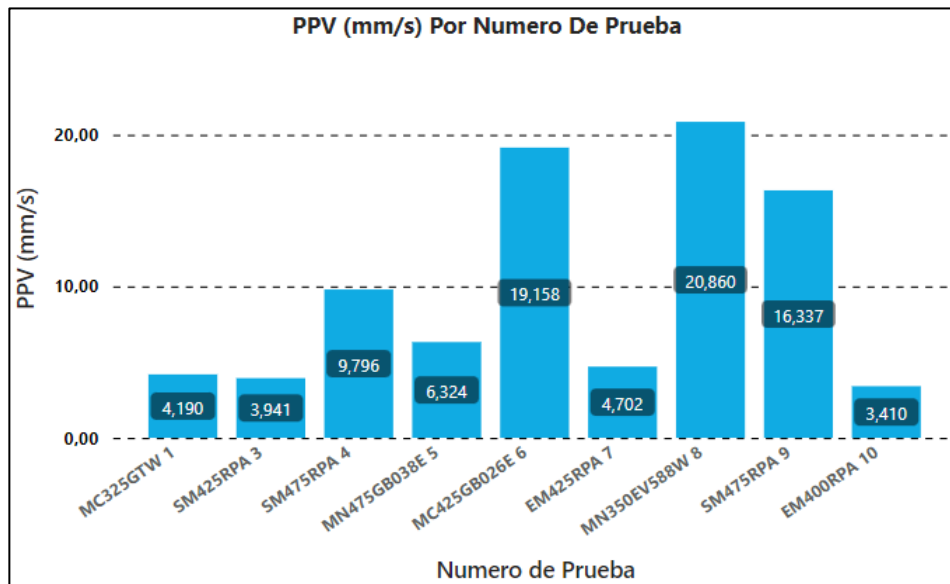


Figura 73. PPV por prueba

Comentarios:

- Las vibraciones registradas durante el estudio se ubicaron debajo de la línea 3, asociada al daño que generan las vibraciones sobre estructuras delicadas; según la norma internacional DIN 4150.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

CAPITULO 6

ANALISIS ECONOMICO

Se determinó el ahorro en función de la diferencia entre el valor del costo teórico de matriz asociado a las pruebas, (considerando el diagrama de perforación y modelo de carga empleados en el periodo previo al análisis) y el costo real de matriz del análisis para las pruebas correspondientes.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los valores obtenidos en las pruebas, realizadas en las voladuras de desarrollo y preparación para las cargas utilizadas.

Prueba	MINA	Carga Explosiva (kg)	Factor de carga (kg/tn)	Rendimiento De Avance (%)	Costo teórico Matriz Previo al Análisis (USD/Tn)	Costo Real Matriz Para Pruebas (USD/Tn)	Ahorro (USD/Tn)
1	MC	295,50	1,21	105,26	1,74	1,29	0,45
2	EM	394,00	1,67	94,70	1,42	1,57	-0,15
3	SM	330,00	1,27	100,00	1,53	1,19	0,34
4	SM	233,00	0,93	100,00	1,46	0,88	0,58
5	MN	319,60	1,34	95,60	1,42	1,26	0,16
6	MC	250,00	1,42	84,00	1,70	1,34	0,36
7	EM	165,00	1,38	92,60	1,96	1,30	0,66
8	MN	305,00	1,30	95,00	1,51	1,22	0,29
9	SM	371,00	1,30	100,00	1,39	1,22	0,17
10	EM	276,00	1,22	100,00	1,56	1,14	0,42
Total	EM	293,91	1,30	96,72	1,57	1,24	0,33

Cuadro 27. Resumen Costos Matriz en pruebas realizadas.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa“

Se calculó el ahorro promedio generado en las pruebas en $\frac{USD}{Tn}$, ya que, en tres (3) de las pruebas realizadas, se presentaron condiciones desfavorables del frente a volar, relacionado a la presencia de fallas estructurales, por lo que resulta más representativo expresar el ahorro por tonelada volada, para realizar una comparación respecto al valor teórico del diagrama de perforación antiguo.

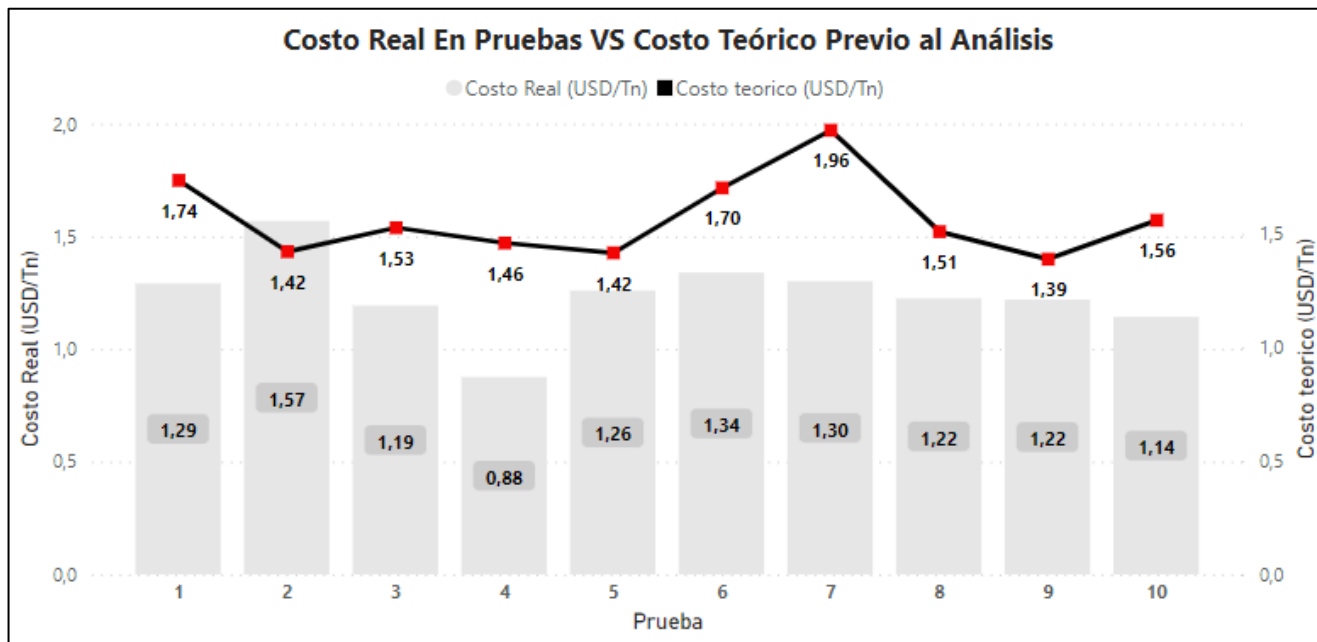


Figura 74. Comparación Costos Diagrama antiguo VS empleado en pruebas

El costo teórico de matriz mostrado en el cuadro 27, fue calculado a partir del consumo teórico de explosivo en el diagrama de perforación empleado anterior a las pruebas, donde se disminuyeron la cantidad de taladros. Se empleó también un rendimiento de avance promedio de voladuras de sección completa en desarrollo y preparación realizadas previo al estudio:



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Rendimiento de avance promedio = 95,4%

$$\text{Costo Matriz} = 0,94 \frac{\text{USD}}{\text{kg}}$$

El costo de matriz fue obtenido a partir de los registros pertenecientes a la empresa subcontratista especialista en explosivos.

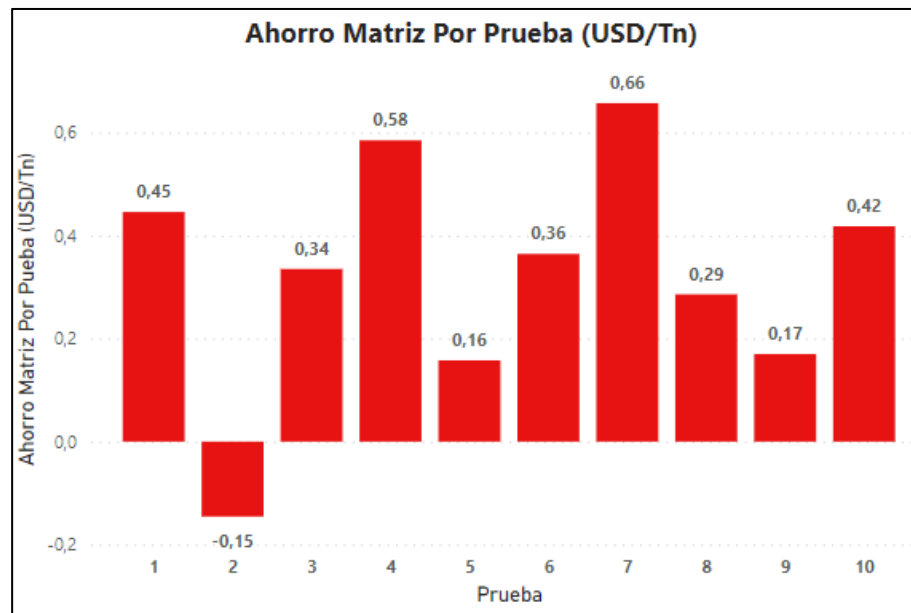


Figura 75. Ahorro por prueba

Se observó un ahorro del costo de matriz en todas las pruebas a excepción de la prueba número 2, donde la carga explosiva empleada, fue elevada respecto al modelo de carga planteado.

Dos de los ahorros de mayor magnitud corresponden a las pruebas 6 y 7, donde existían fallas en los frentes, por ello la carga explosiva empleada fue menor a la establecida en el modelo teórico de carga.

El número promedio de voladuras de sección completa realizadas desde enero a julio del corriente año según la base de datos corresponde a 15 voladuras diarias, de las cuales 7 consistieron en voladuras de sección completa, aproximadamente 98 voladuras por campaña (14 días). Con un tonelaje promedio de 251,2 toneladas por voladura.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

A partir del valor real de ahorro en matriz calculado para las pruebas, es posible determinar el ahorro en las voladuras de sección completa:

$$\text{Ahorro promedio matriz por voladura} = 85,9 \text{ USD}$$

$$\text{Ahorro promedio matriz por campaña} = 8418,2 \text{ USD}$$

$$\text{Ahorro promedio matriz por año} = 202.036 \text{ USD}$$

Adicionalmente se calcula el costo del ahorro generado por el incremento del rendimiento de avance, donde el costo de avance por metro (sin considerar el costo del explosivo) está dado por (proporcionado por el socio estratégico):

$$\text{Costo por metro de avance} = 526 \text{ USD/m}$$

$$\text{Rendimiento de avance promedio previo al analisis (\%)} = 91,54$$

$$\text{Rendimiento de avance del analisis (\%)} = 96,72$$

Considerando la misma cantidad de voladuras diarias de sección completa empleados anteriormente (7 voladuras diarias), y una longitud de perforación teórica de 3,8 metros:

$$\text{Avance teorico diario (m)} = 26,6$$

$$\text{Avance teorico diario real (previo al analisis)} = 26,6 \text{ m} * 0,9154 = 24,35 \text{ m}$$

$$\text{Avance teorico diario real (del analisis)} = 26,6 \text{ m} * 0,9672 = 25,73 \text{ (m)}$$

Por lo la mejora de avance expresada en metros es:

$$\text{mejora de avance teorica diario para analisis} = 25,73 \text{ m} - 24,35 \text{ m} = 1,38 \text{ m}$$

$$\text{mejora de avance teorica anual para el analisis} = 463,7 \text{ m}$$

$$\text{Ahorro anual estimado (analisis)} = 463,7 \text{ m} * 526 \frac{\text{USD}}{\text{m}} = 243.895,7 \text{ USD}$$



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Adicionalmente, es necesario calcular el ahorro en detonadores.

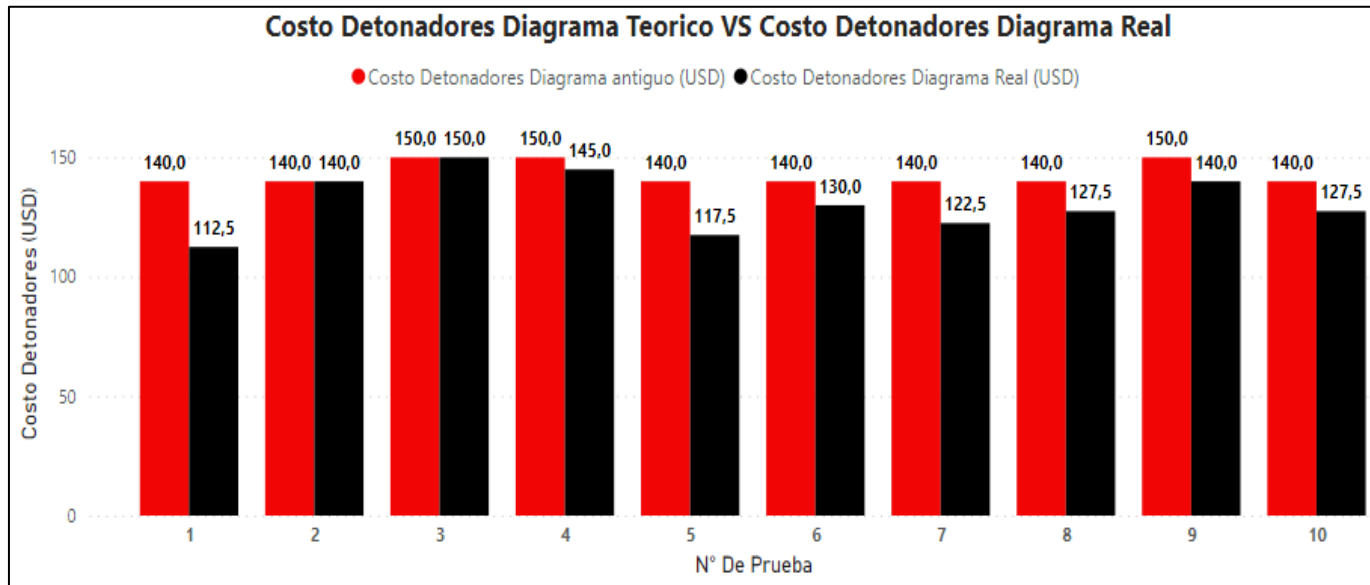


Figura 76. Costo teórico de detonadores VS Costo Real

Se observó un ahorro en el consumo de detonadores ante la disminución de los taladros en el diagrama de perforación, a excepción de las pruebas 2 y 3 donde se empleó el antiguo diagrama.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

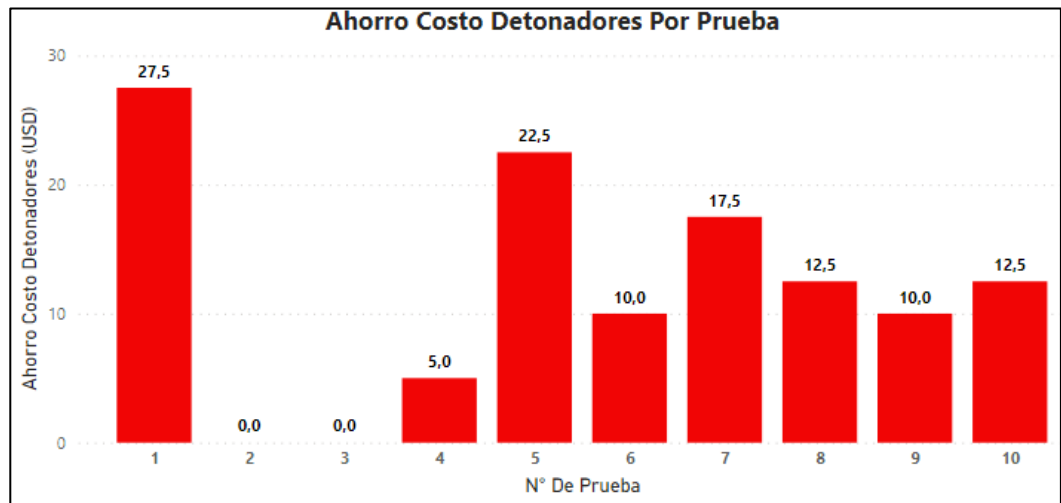


Figura 77. Ahorro costo de detonadores en prueba

N° De Prueba	Promedio de Costo Teorico Detonadores (USD)	Costo Detonadores Diagrama Real (USD)	Promedio de Ahorro Costo Detonadores (USD)
1	140,0	112,5	27,5
2	140,0	140,0	0,0
3	150,0	150,0	0,0
4	150,0	145,0	5,0
5	140,0	117,5	22,5
6	140,0	130,0	10,0
7	140,0	122,5	17,5
8	140,0	127,5	12,5
9	150,0	140,0	10,0
10	140,0	127,5	12,5
Total	143,0	131,3	11,8

Cuadro 28. Costo teórico de detonadores VS Costo Real

$$\text{Costo Detonador no electrico (unid)} = 2,5 \text{ USD}$$

Tomando los mismos valores respecto la cantidad de voladuras promedio realizadas por campaña para el cálculo del ahorro de matriz, se puede calcular el ahorro en el consumo de detonadores. El costo del tipo de detonador empleado es obtenido a partir del catálogo de la empresa especialista.

$$\text{Ahorro consumo de detonadores por campaña} = 1156,4 \text{ USD}$$

$$\text{Ahorro consumo de detonadores por año} = 27.753,6 \text{ USD}$$

Por lo que el ahorro total estimado es:

$$\text{Ahorro total estimado por campaña} = 19.736,9 \text{ USD}$$

$$\text{Ahorro total estimado anual} = 473.686 \text{ USD}$$



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

CAPITULO 7

CONCLUSIONES

- Se realizaron 10 pruebas de voladuras en diferentes sectores de desarrollo y producción, ejecutadas en un periodo de 6 meses, donde se modificaron los diagramas de perforación y modelos de carga de explosivos, obteniéndose los datos cualitativos y cuantitativos relacionados a la eficiencia las voladuras.
- Se obtuvo factor de carga real promedio en las 10 pruebas realizadas de $1,30 \text{ kg/tn}$, el cual es inferior al valor promedio registrado en la base de datos para las labores de desarrollo y preparación horizontal subterráneas previo al estudio ($1,675 \text{ kg/tn}$), representando una disminución del 22,4%.
- Mediante el análisis de las longitudes de perforación y el avance real logrado por las voladuras, se obtuvo un rendimiento de avance promedio del 96,72%, con un incremento del 5,7% respecto al valor promedio registrado del 91,54%; favorecido por la implementación de tacos de arcilla en el arranque.
- Se identificaron desvíos en el diagrama de perforación recomendado para el estudio, obteniéndose una adherencia para las pruebas del 91,2%.
- La sobre excavación promedio registrada para las pruebas fue del 9,78%, mientras que el valor promedio previo al análisis fue de 23,41%, reduciéndose un 13,63% producto de la disminución de la carga explosiva empleada.
- Las mediciones de fragmentación de las pruebas mostraron un valor promedio del P_{80} de 324 milímetros; 8,7% superior al promedio registrado en la base de datos (298 milímetros), esto debido a la disminución de la carga explosiva.
- La velocidad de detonación registrada en las pruebas con emulsión explosiva fue de 4603 mm/s , respecto al promedio en la base de datos



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

con 4201 *mm/s*, incrementándose un 9,6% debido a la utilización de tacos inertes de arcilla en el arranque.

- Las vibraciones registradas durante el estudio se ubicaron debajo de la línea 3, asociada al daño que generan las vibraciones sobre estructuras delicadas; según la norma internacional DIN 4150. Se concluye que las vibraciones ocasionadas por voladuras de desarrollo y preparación no representan un riesgo para las estructuras aledañas al sector de medición, según los modelos de carga y secuencias de detonación empleados en el análisis.
- En cuanto al análisis económico de los resultados obtenidos en las pruebas, se estima un ahorro anual de 473.686 *USD*, relacionado al menor consumo de emulsión explosiva y detonadores no eléctricos.
- Se concluye que la disminución de taladros en el nuevo diagrama implementado, así como la modificación de los modelos de carga, presentan resultados favorables desde el punto de vista de eficiencia y costos.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el diagrama de perforación con reducción de taladros utilizado en las pruebas como estándar para las voladuras de preparación y desarrollo de sección completa, ya que ha mostrado resultados de avance, consumo de explosivo, sobre excavación y vibraciones favorables respecto al periodo previo al estudio.
- Llevar a cabo controles del diagrama de perforación empleado en voladuras de sección completa e informar al socio estratégico para tomar acciones y evitar los desvíos observados en las pruebas
- Realizar seguimiento de los resultados de fragmentación, vibración, velocidad de detonación en voladuras de sección completa y desquinche, ya que cuentan con una mayor carga explosiva. Sin embargo, no se cuenta con un estándar de carga para los taladros de desquinche, por lo que estos en la actualidad son cargados como un taladro de arranque (los cuales emplean una mayor proporción de carga respecto a los taladros auxiliares y de contorno).
- Continuar con capacitaciones a los empleados en aspectos técnicos relacionados al proceso de carguío, como por ejemplo dosificación de material gasificante, lo que les permitirá desenvolverse de forma más eficiente.
- Seguimiento del rendimiento de avance en labores que empleen explosivo encartuchado, el cual da lugar a un nuevo análisis de eficiencia y modificación del factor de carga.
- Seguimiento del rendimiento de avance mediante la implementación de tacos de arcilla en toda la sección del frente, y el análisis de los tiempos de colocación de los mismos.
- Implementación de estructuras de medición de vibración fijas en interior de mina, lo que permitirá la creación de modelos matemáticos, los cuales pueden emplearse para evaluar las vibraciones generadas por una



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

voladura en una estructura específica y también para generar modelos predictivos de los efectos que producirán las voladuras a diferentes tipos de estructuras.

- Estandarizar el control de los frentes, especialmente en la verificación del paralelismo de los taladros, dado que este es un aspecto fundamental desde el punto de vista de distribución energética de la carga explosiva empleada. Teniendo en cuenta que se llevó a cabo un ajuste de la cantidad de emulsión explosiva para los diferentes taladros del frente, y si éstos presentan mucha desviación la distribución energética no se producirá en forma eficiente y producirá resultados desfavorables.
- Incrementar el número de mediciones técnicas que se llevan a cabo por campaña, lo que permitirá establecer valores más representativos de la calidad del explosivo.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

BIBLIOGRAFIA

- López Jimeno, E. López Jimeno, J.M. Pernía Llera y F. Pla Ortiz de Urbina (1.994). Manual de perforación y voladura de rocas; Instituto Tecnológico Geológico minero de España.
- Explosivos industriales, Universidad católica Del Perú, 2014.
- Exsa S.A. (2.014). Manual práctico de voladura; edición especial.
- Dirección general de fabricaciones militares (2.007). Curso inicial de explosivos.
- Trabajo final, Ing. Carreño Moya Paola Roxana, Ing. Correa Luis Humberto (2015). Implementación de precorte en un diagrama de voladura en minería subterránea.
- Trabajo final, Ing. Vallejos Veronica; Ing. Campagnale' Franco (2017). Análisis para la implementación de emulsión explosiva encartuchada en mina Farallón Negro
- Trabajo final, Ing. Argañanaz Gabriel Alejandro, Ing. Luna Martin Exequiel (2015). Optimización de las voladuras de producción en mina Farallón Negro.
- Langefors y Kihlström (1.968). Técnica moderna de voladura de roca, URMO, S.A. de ediciones.
- Trabajo final, Ing. Almaraz Carlos Daniel, Ing. Ledesma Julia Antonela Estudio de prefactibilidad para la aplicación de un método alternativo AVOCA para la recuperación del mineral considerado marginal.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

ANEXO I: TEORIA DE

VIBRACIONES

INDUCIDAS POR

VOLADURA



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Teoría de Vibraciones inducidas por voladura

Factores que tienen efecto sobre la vibración

Existen diversos factores de diferentes naturalezas que influyen directamente en las vibraciones generadas a raíz de una voladura, entre ellas:

- Burden¹⁶.
- Material y Longitud del taco¹⁷.
- Geometría de la carga.
- Longitud de la columna de explosivo.
- Tipo de roca.
- Propiedades físicas de la roca.
- Energía del explosivo.
- Energía real aportada a la voladura.
- Composición del detonador.
- Características del Booster.
- Factores geológicos.
- Cantidad de taladros totales.
- Retardos.
- Precisión del iniciador.

El período de la persistencia de la vibración de un pozo está controlado por la masa rocosa. A medida que el módulo de la roca aumenta, el período de la persistencia disminuye. Tipos de rocas muy competentes, por lo tanto, requieren intervalos de retardos más cortos que las rocas blandas y altamente fracturadas. Dicho periodo también es fuertemente influenciado por la distancia desde la voladura al punto de medición. El período de la persistencia aumenta con la lejanía de la distancia desde la voladura. El intervalo de retardo óptimo se determina fácilmente por monitoreo.

¹⁶ Distancia del eje del taladro a la cara libre.

¹⁷ Material empleado para confinar los pozos.

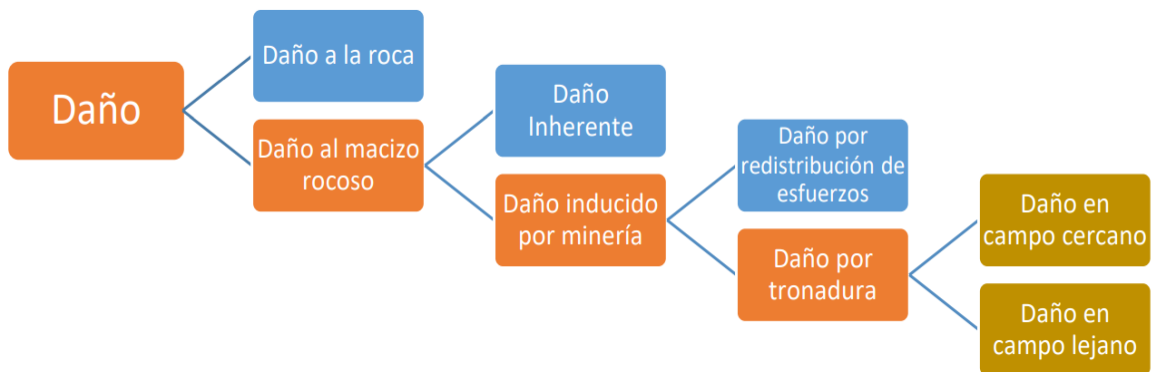


“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Daño inducido por voladura

Modelos de vibraciones

Actualmente se considera a la velocidad peak de partícula (PPV¹⁸) como un indicador del potencial daño asociado a una vibración sísmica. Es por esto por lo que se han creado modelos que estiman el comportamiento del PPV bajo ciertas condiciones de voladura. Dependiendo de la ubicación de los instrumentos de medición, se tienen 2 posibles formas de modelar el daño en función de las vibraciones generadas por tronadura¹⁹.



Cuadro 29. tipos de daños inducidos por tronadura

Para este caso de estudio se analiza concretamente el daño generado por las vibraciones de una voladura en campo lejano.

Influencia de las vibraciones en campo lejano

Criterios de daño en campo lejano

El análisis de la velocidad de partícula tiene la cualidad de ser un adecuado método para estimar el grado de fracturamiento inducido por tronadura. McKenzie a partir de la Ley de Hooke, relaciona la velocidad de partícula con la deformación dinámica inducida por tronadura como:

$$\varepsilon = \frac{PPV}{V_p} = \frac{\sigma_t}{E}$$

¹⁸ Velocidad pico de la articula.

¹⁹ Voladura.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

En donde:

- ε = *deformación lineal inducida (mm)*.
- V_p = *Velocidad de la onda de compresión P (mm/s)*.
- PPV = *Velocidad de partícula crítica (mm/s)*.
- σ_t = *Resistencia a la tracción (MPa)*.
- E = *Módulo de Young (Gpa)*.

En base a esto y asumiendo que la Ley de Hooke se cumple en el macizo rocoso, donde todas las ondas son de tipo monodimensionales, se tiene:

$$PPV_c = \frac{\sigma_t * V_p}{E}$$

La relación anterior asume una elasticidad lineal del material a través del cual se propaga la onda, utilizando parámetros obtenidos a través de ensayos de laboratorio de roca intacta. La estimación difiere al valor real (terreno). Sin embargo, es una estimación razonable y es ampliamente utilizada en la industria.

Del conocimiento de las características de propagación de vibración de la masa rocosa y de la relación entre la vibración y la deformación, es posible establecer contornos de fracturamiento alrededor de un pozo o halo de daño.

Estos halos representan la zona alrededor de un pozo en que el fracturamiento fresco ocurrirá como resultado directo de la vibración desde el explosivo que detona en el pozo. Tal diagrama de contorno²⁰ proporciona una buena indicación del grado de fragmentación detrás de una tronadura.

²⁰ Perímetro de la labor.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

ANEXO II:

PROCEDIMIENTOS

DE MEDICIONES

TECNICAS



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

Medición de la velocidad de detonación del explosivo

Se deberá conocer todo lo referente al sector de la voladura con anticipación por las diferentes áreas de la mina (planificación, geología, geomecánica).

Recursos

- Equipo de medición de la velocidad de detonación.
- Fichas adaptadoras para la conexión entre el equipo y el cable coaxial.
- Cable coaxial.
- Conector de compresión, pinza de presión, alicate y stripper para cable coaxial.
- Cinta aisladora.
- Computadora.
- Equipo de comunicación radial.

Preparación de cable coaxil para uso de equipo shottrack vod 305

El equipo ShotTrack es muy simple de utilizar, se debe revisar el estado de la batería antes de ser utilizado, la batería completa dura aproximadamente 10 horas.

1. Utilizando el coax stripper, se debe colocar el cable dejándolo sobresalir 5-10 milímetros.



Figura 78. Ubicación del coax strip sobre el cable coaxil

2. Rotar varias veces hasta retirar envoltorio.

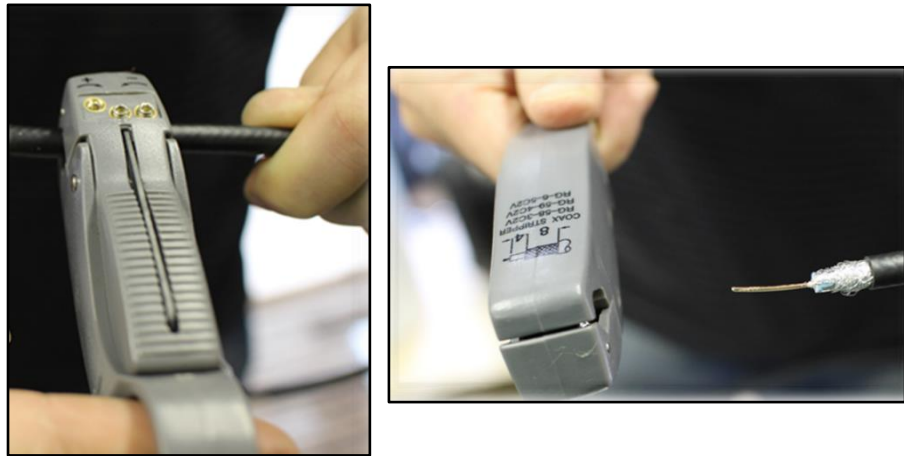


Figura 79. Corte del cable coaxil

3. El conductor interno debe ser cortado a 8 milímetros de largo.



Figura 80. Corte del conductor interno

4. Se debe remover 5 mm de la lámina dieléctrica.

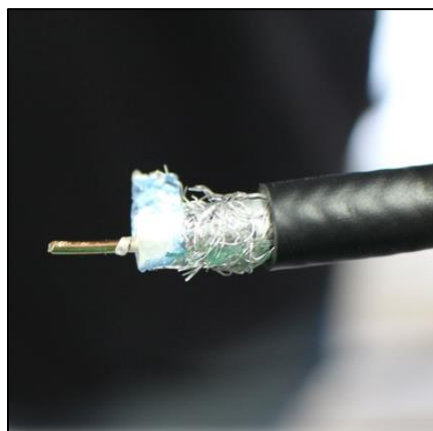


Figura 81. Corte de la lámina dieléctrica

5. Insertar el cable a la ficha firmemente.

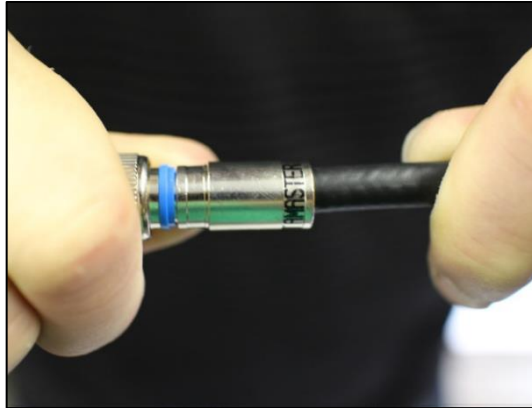


Figura 82. Colocación de ficha conectora

6. Introducir el conector en la herramienta de compresión.



Figura 83. Sujeción de ficha

Instalación del cable y equipo en terreno

- a. La medición debe realizarse en el taladro que inicie primero para evitar el corte del cable por detonación del resto de los taladros.
- b. Disponer de una longitud de cable del extremo libre de aproximadamente 3 metros adicionales respecto a la longitud del pozo perforado. Luego conectar el extremo libre del cable al cebo iniciador mediante el uso de cinta aislante, la conexión se debe realizar de tal manera que el detonador introducido en el Booster se encuentre ubicado en el punto opuesto del Booster que es introducido en la manguera de carguío del explosivo como muestra la figura 84.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”



Figura 84. Conexión del cable coaxil al cebado

- c. El extremo del cable debe quedar abierto. Se debe prestar atención de que no se realice la carga del taladro, en donde se colocara el cable coaxil y a su vez para no retrasar a los operarios.

En primera instancia se introduce el cable junto con el cebo, y luego se realiza el carguío del pozo (figura 86). Una vez concluido el carguío del frente se debe desplazar el carrete del cable hasta la labor de acceso del frente. Una vez que los equipos se retiren de la labor se debe desplazar el carrete hasta el punto en el cual se colocara el equipo de medición; este debe ser un lugar en el cual la onda de choque de la voladura no dañe el equipo.

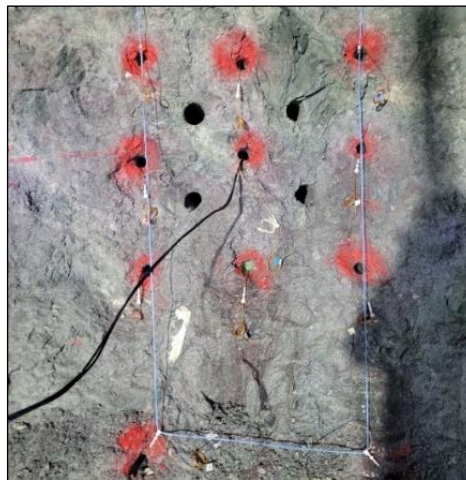


Figura 85. Colocación del cable coaxil en el pozo

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

- d. La unidad debe colocarse en el lugar provisto para el disparo.
- e. La unidad se enciende presionando el botón ON/OFF por un segundo.



Figura 86. Encendido del equipo

- f. Conectar ficha de cable coaxial.



Figura 87. Conexión del cable al equipo

- g. La unidad mostrará el estado de la capacidad restante de la batería de 10 a 100% durante unos segundos.



Figura 88. Nivel de batería del equipo

- h. La unidad comenzara a medir la longitud del cable y la mostrara en la pantalla.



Figura 89. Medición de longitud del cable

- i. Después de unos minutos si se detecta una longitud de cable valida, la unidad se configurará por sí misma.



Figura 90. Autoconfiguración del equipo/Modo espera

- j. El botón ON/OFF se iluminará en rojo para indicar que la unidad está configurada.
- k. La pantalla se apagará y el equipo estará en modo de espera hasta detonación.
- l. El botón parpadeará de color rojo si se efectuó la medición.
- m. Se debe apagar la unidad presionando el botón ON/OFF durante un tiempo prolongado (3 segundos). Cuando el botón se ponga azul, suelte el botón y la unidad se apagará. La unidad se desconectará de los estados de pantalla, configuración o espera después de la voladura.
- n. Por último, se debe cortar el cable coaxil tratando de recuperar la mayor longitud posible de este, de tal manera que pueda ser empleada en



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

mediciones posteriores. Siempre se debe apagar el equipo antes de cortar el cable.

- o. Se desacopla el equipo del rollo de cable y se emplea el software para verificar la medición.

Verificación de la medición

Al conectar el equipo a la computadora, se puede analizar mediante software si el equipo realizó la medición sin inconvenientes. Esta verificación se lleva a cabo observando las fechas en las que el equipo llevó a cabo mediciones, donde se indican además la hora en las que fueron tomadas.

Medición de vibración en campo lejano

Procedimiento: Consideraciones generales

- La zona de ubicación de los equipos de monitoreo debe ser planificada con anterioridad, a fin de evitar riesgos asociados a trabajos cercanos y proyección post-voladura.
- Asegurarse que el equipo de monitoreo no se ubique cerca de una inestabilidad potencial del tipo cuña o falla, bajo cargas suspendidas.
- Chequear con anticipación el nivel de carga de las baterías y la memoria interna del equipo.
- Cargar el equipo apagado y durante el día.
- Realizar una prueba de registro previo a la actividad.

Metodología

Instalación del equipo y geófono

Ubicar el equipo (figura 92) a una distancia no inferior a los 50 metros desde la voladura y fuera de riesgos. Conectar el geófono (figura 93) al Minimate Pro, siempre se debe conectar de forma suave evitando dañar el equipo y que se ensucie. Se debe prestar atención a la entrada en la cual el geófono debe ir conectado (detección de vibración).

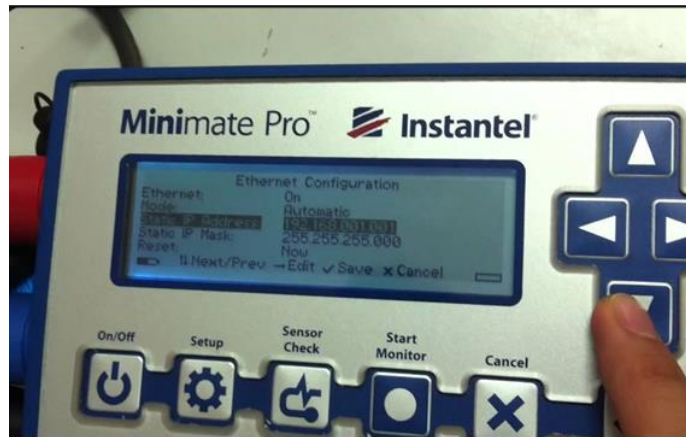


Figura 91. Minimate Pro 4.



Figura 92. Geófono

La flecha en la superficie del geófono debe estar apuntando en la dirección del evento para asegurarse de que los sensores del geófono permanezcan en sus ejes naturales.

El Minimate Plus y el geófono deben estar seguramente acoplado a la superficie circundante. La superficie debe ser compacta sin material suave o suelto. El acoplamiento es crítico para resultados de monitoreo confiables y exactos. Un acoplamiento insuficiente permite que los geófonos se muevan en forma independiente de la superficie circundante.

Presionar y mantener la tecla “Enter”, ubicada en el panel frontal del MiniMate Plus, hasta que escuche un sonido audible. Se exhibe una ventana de inicio por tres segundos seguida por la ventana de exhibición principal La ventana Principal informara que el Minimate Plus está listo para monitorear.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

En este punto, se puede comenzar a registrar eventos. Se debe presionar la tecla Start Monitor para comenzar a monitorear. Para ver un evento que ha sido registrado, el MiniMate Plus luego regresará al modo monitoreo y estará listo para registrar otro evento.

Verificación de la medición

Se pueden observar los eventos que acaban de ser registrados. Desde la ventana principal, se debe presionar la tecla “Up Arrow” para exhibir la ventana de vista de eventos. Luego presionar la tecla “Enter” para ver el evento más recientemente registrado.

Una vez que se ha terminado de utilizar el MiniMate Plus, así que este debe ser apagado. Para ello, se presiona la tecla Cancel para regresar a la Ventana principal. Luego se requiere presionar y mantener la tecla “Enter” hasta que la exhibición desaparezca.

Al momento de llegar a la oficina donde se encuentra la computadora con el software, se debe traspasar la información detallando la fecha, secuencia de carga, secuencia de salida y parámetros de perforación, para realizar el posterior análisis de resultados.

Procedimiento de medición de fragmentación

Información disponible antes de toma de fotografías:

- Cantidad de pozos.
- Profundidad del pozo.
- Altura de carga.
- Profundidad del taco.
- Densidad del explosivo.
- Tiempo de iniciación.

Recursos

- Cámara Fotográfica.
- Varilla de longitud Patrón.



“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

- Cinta Métrica.
- Computadora.

Toma fotográfica en muestreo granulométrico

Para lograr un análisis granulométrico representativo del sector analizado se recomienda que:

- El muestreo deberá ser en la parte media-baja del material derramado en forma natural de la pila con el fin de no exponer a nadie a algún tipo de riesgo.
- La cantidad de fotos tomadas dependerá de la extensión del sector y lo cuán homogénea se encuentre la pila. La cantidad de fotos deberá ser lo suficiente para lograr un buen análisis. (se recomienda tomar un mínimo de 6 fotografías cada vez que se realice el procedimiento).

Cada vez que se tome una foto esta debe ser registrada del sector de muestreo.



Figura 93. Toma de fotografías

Una vez efectuadas las tomas fotográficas respectivas el ingeniero de terreno avisará al palero que ha finalizado y que se retira del sector.

Finalizada la toma de fotos con sus respectivos registros de muestreo, y estando en la oficina de trabajo se procede a descargar la totalidad de las fotografías e introducirlas al software, donde se marcarán manualmente el tamaño de todos los fragmentos observables imagen a imagen.

“Análisis técnico - económico de la disminución del factor de carga en voladuras de labores subterráneas horizontales de sección completa”

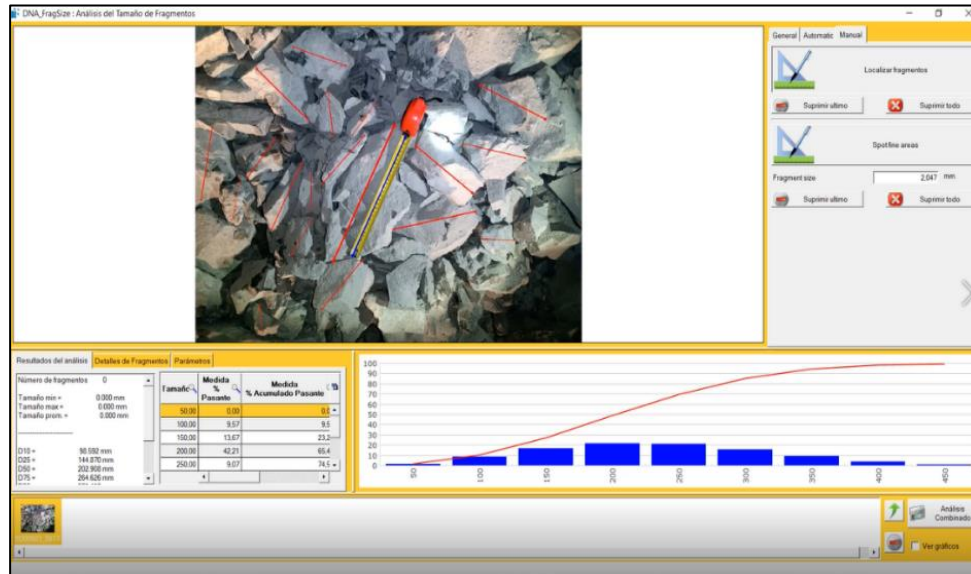


Figura 94. Análisis granulométrico mediante software

Una vez guardada la distribución granulométrica (figura 95), se debe seleccionar una nueva imagen y repetir el procedimiento hasta que se complete para todas las fotos tomadas. Si se abre el archivo guardado se podrá observar la distribución granulométrica calculada por el software (cuadro 29).

	A	B	C	D	E
	Tamaño	Medida % Pasante	Medida % Acumulado Pasante	Rosin Rammler % Pasante	Rosin Rammler % Acumulado Pasante
1					
2	50,00	0,51	0,51	0,79	0,79
3	100,00	11,33	11,84	6,51	7,30
4	150,00	17,08	28,92	17,38	24,69
5	200,00	33,98	62,90	26,77	51,45
6	250,00	12,24	75,14	26,08	77,53
7	300,00	5,69	80,83	15,76	93,29
8	350,00	19,17	100,00	5,55	98,84
9	350,00	0,00	100,00	5,55	104,40
10	400,00	0,00	100,00	1,05	105,45

Cuadro 30. Análisis granulométrico por software en formato xls (Excel).

Como paso final resta graficar la distribución granulométrica y calcular el valor del P_{80} mediante una interpolación de los datos mostrados en el cuadro 29 para los porcentajes de acumulado de interés. Se emplea la siguiente ecuación:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0)$$