



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de patrones de
barrenación y voladura con
PROMINE**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero de Minas y Metalurgista

P R E S E N T A

Naim Yael Ortiz Diaz

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. José Enrique Santos Jallath



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL**
(Titulación con trabajo escrito)



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado DISEÑO DE PATRONES DE BARRENACION Y VOLADURA CON PROMINE que presenté para obtener el título de INGENIERO DE MINAS Y METALURGISTA es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

NAIM YAEL ORTIZ DIAZ
Número de cuenta: 317346497

Resumen

Este trabajo resalta la importancia de que las y los alumnos empleen software especializado como herramienta para consolidar los conocimientos adquiridos en el diseño de voladuras. El objetivo principal es desarrollar patrones de barrenación utilizando Promine y analizar su comportamiento esperado, considerando desde las propiedades de la roca hasta un análisis económico básico que evalúe la viabilidad de diferentes plantillas.

Se describen las herramientas necesarias, los conceptos fundamentales y el procedimiento paso a paso para generar y evaluar una plantilla de barrenación. Finalmente, se destaca la facilidad con la que es posible diseñar, ajustar y analizar distintos patrones mediante el uso del software, así como la relevancia de contar con esta información para una mejor toma de decisiones en contextos reales.

Palabras clave: Barrenos, explosivos, análisis, bordo, espaciamiento.

Abstract

This work highlights the importance of students using specialized software as a tool to consolidate the knowledge acquired in blast design. The main objective is to develop drilling patterns using Promine and analyze their expected behavior, considering factors ranging from rock properties to a basic economic analysis that evaluates the feasibility of different patterns.

The necessary tools, fundamental concepts, and the step-by-step procedure for generating and evaluating a drilling pattern are described. Finally, the ease with which different patterns can be designed, adjusted, and analyzed through the use of software is highlighted, as well as the relevance of having this information to support better decision-making in real-world contexts.

Keywords: Drillholes, explosives, analysis, burden, spacing.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Objetivos	1
1.1.1 Objetivo general	1
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Justificación	2
2. Marco teórico	4
2.1 Explosivos	4
2.2 Tipos de explosivos	4
2.3 Propiedades de los explosivos que influyen en la voladura	6
2.4 Propiedades de la roca que influyen en la voladura	6
2.5 Mecanismo de rotura de la roca	8
2.6 Factores implicados en el éxito de la voladura	9
2.6.1 Factores geométricos	10
2.6.2 Carga del barreno	12
2.6.3 Secuencia de detonación.....	12
2.7 Función de los barrenos en una plantilla	13
2.8 Métodos de minado subterráneos	14
3. Generalidades software Promine	15
3.1. Módulo perforación y voladura subterránea	16
3.1.1 Línea de Pivote	16
3.1.2 Configurar parámetros e Insertar tiros.....	18
3.1.3 Insertar reporte	20
3.1.4 Otras herramientas.....	22
3.2 Módulo de perforación y voladura de galerías	22
3.2.1 Insertar barrenos	23
3.2.2 Cargado de barrenos	25
3.2.3 Reporte	25
3.2.4 Otras herramientas.....	26
4. Metodología	27
4.1 Generación de modelo de bloques	28
4.1.1 Datos de la exploración superficial.....	28
4.1.2 Modelado y arreglo	30
4.2. Cálculo de parámetros para las plantillas de barrenación y voladura	36
4.2.1 Módulo Perforación y Voladura de Galerías.....	36

4.2.2 Módulo Perforación y Voladura Subterránea.....	39
4.3 Diseño de la plantilla de barrenación.....	43
4.3.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías.....	43
4.3.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea.....	45
4.4. Modelado de la plantilla en PROMINE.....	47
4.4.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías.....	47
4.4.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea.....	51
4.5 Cargado de los barrenos.....	52
4.5.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías.....	52
4.5.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea.....	55
4.6 Análisis de la plantilla	57
4.6.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías.....	57
4.6.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea.....	61
4.7 Modificación de la plantilla	65
4.7.1 Generalidades.....	65
4.7.2 Otras herramientas para la modificación de la plantilla.....	66
5. Aplicación de la metodología del diseño	67
5.1 Obras de desarrollo	67
5.1.1 Selección de Equipo.....	68
5.1.2 Parámetros de la roca.....	69
5.1.3 Selección del tipo de explosivo.....	71
5.1.4 Diseño de la plantilla	72
5.1.5 Estimación de la carga de columna y la carga de fondo	78
5.2 Configuración de parámetros en Promine y diseño de la plantilla.....	80
5.2.1 Análisis de la plantilla	86
5.2.2 Ajuste de la plantilla	89
5.3 Obras de producción.....	100
5.3.1 Selección de equipo.....	100
5.3.2 Parámetros de la roca.....	102
5.3.3 Selección del explosivo	102
5.3.4 Diseño de la plantilla para el método de corte y relleno.....	103
5.3.5 Diseño de la plantilla para el método de tumbe por subniveles	112
5.3.6 Diseño de la plantilla para el método de salones y pilares.....	122
5.4 Análisis económico	132
6. Conclusiones	136
7. Recomendaciones	137
8. Referencias	138

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mecanismo de rotura de la roca (Bernaola. J, Castilla. J, Herrera. J, 2013).....	8
Ilustración 2. Parámetros que afectan en la selección del explosivo (Bernaola. J, Castilla. J, Herrera. J, 2013).....	10
Ilustración 3. Ejemplo de la distribución de barrenos en una plantilla de voladura.	14
Ilustración 4. Módulo de modelamiento de bloques (Promine,2024).....	15
Ilustración 5. Módulo de Diseño de Obras (Promine,2024).	15
Ilustración 6. Módulo de Sondajes Diamantados (Promine,2024).	16
Ilustración 7. Módulo de perforación y voladura subterránea (Promine,2024).	16
Ilustración 8. Herramienta para la generación de línea de pivote (Promine,2024).....	17
Ilustración 9. Especificaciones del equipo de barrenación (Promine,2024).	17
Ilustración 10. Especificaciones de la barrenadora para generar una línea de pivote en arco (Promine,2024).	18
Ilustración 11. Línea de pivote horizontal y en abanico.	18
Ilustración 12. Ejemplo de configuración de parámetros para insertar los tiros desde una vista de planta.	19
Ilustración 13. Ejemplo de tiros insertados sin carga explosiva desde una vista de planta.	19
Ilustración 14. Herramienta para la personalización de reportes (Promine,2024).....	21
Ilustración 15. Módulo de perforación y voladura de galerías (Promine,2024).....	22
Ilustración 16. Ejemplo de exportación de barrenos de cuña desde AutoCAD (Promine,2024).	23
Ilustración 17. Herramienta de generación de barrenos con configuraciones estándar (Promine,2024)...	24
Ilustración 18. Herramienta para insertar barrenos de contorno (Promine,2024).....	24
Ilustración 19. Ventana para el cargado de barrenos (Promine 2024).	25
Ilustración 20. Ventana de opciones disponibles para el reporte (Promine,2024).....	26
Ilustración 21. Metodología para la generación y análisis de las plantillas de barrenación y voladura.	27
Ilustración 22. Datos de campaña de barrenación (Candelaria Mining Corp, 2018).	28
Ilustración 23. Valores de contenidos para la generación de los compósitos.	29
Ilustración 24. Módulo de Sondajes Diamantados (Promine,2024).	30
Ilustración 25. Ventana para el cargado de la base de datos de los barrenos (Promine,2024).	30
Ilustración 26. Barrenos insertados vista lateral (Promine,2024).....	31
Ilustración 27. Adición de la ley con la que se creará los compósitos (Promine,2024).	31
Ilustración 28. Selección de ley generada y el tipo de ubicación para los compósitos (Promine,2024). ...	32
Ilustración 29. Compósitos generados vista lateral en 3D (Promine,2024).	32
Ilustración 30. Módulo de Modelización de Bloques (Promine,2024).	33
Ilustración 31. Ventana para el modelado de bloques (Promine,2024).	33
Ilustración 32. Modelo de bloques generado a partir de los datos del NI 43-101 vista lateral.	34
Ilustración 33. Arreglo vertical a partir del modelo de bloques vista lateral.	35
Ilustración 34. Arreglo horizontal a partir del modelo de bloques vista lateral.	35
Ilustración 35. Ventana de configuración de explosivo.	37
Ilustración 36. Ventana de configuración de diámetros de barrenación (Promine,2024).	37
Ilustración 37. Ventana de configuración de retardos (Promine,2024).	38
Ilustración 38. Ventana general donde se realiza la configuración de parámetros.	38
Ilustración 39. Ventana para la configuración de parámetros del módulo (Promine,2024).	39
Ilustración 40. Ventana para la personalización de los reportes (Promine,2024).....	40
Ilustración 41. Ventana para agregar perforadoras y editar las generadas (Promine,2024).....	40
Ilustración 42. Ventana para la configuración de explosivo, iniciadores y retardos (Promine,2024).....	41
Ilustración 43. Ventana para la configuración del explosivo (Promine,2024).	42

Ilustración 44. Ventana de configuración de retardos (Promine,2024).	42
Ilustración 45. Ventana para la configuración de diámetros de perforación (Promine,2024).	43
Ilustración 46. Marcaje de perfiles de obra en AutoCAD vista frontal.	43
Ilustración 47. Importación de perfiles de obra a PROMINE.	44
Ilustración 48. Marcaje de cuña en AutoCAD.	44
Ilustración 49. Marcaje de barrenos en AutoCAD	45
Ilustración 50. Barrenos de producción vista de planta.	46
Ilustración 51. Ventana de configuración de plantillas de barrenos de explotación.	46
Ilustración 52. Ventana de configuración de tapón de perforación (Cuñas) y tiros de galerías.	47
Ilustración 53. Ventana de configuración de la plantilla a insertar.	48
Ilustración 54. Ventana de configuración de barrenos de perímetro.	48
Ilustración 55. Barrenos insertados en un perfil de obra definido con Promine.	49
Ilustración 56. Llenado de herramienta para la generación de barrenos automáticos.	50
Ilustración 57. Generación de barrenos automáticos.	50
Ilustración 58. Ventana de selección de plantillas guardadas (Promine,2024).	51
Ilustración 59. Barrenos insertados con el módulo Insertar Plantillas vista lateral.	52
Ilustración 60. Ventana de configuración del cargado de los barrenos.	53
Ilustración 61. Vista lateral de barrenos cargados.	53
Ilustración 62. Vista lateral 3D de los barrenos cargados.	54
Ilustración 63. Ventana de configuración de retardos para barrenos.	54
Ilustración 64. Icono para el cargado de barrenos del módulo de Perforación y Voladura Subterránea (Promine,2024).	55
Ilustración 65. Ventana de cargado de barrenos (Promine, 2024).	55
Ilustración 66. Barrenos cargados con iniciador vista lateral.	56
Ilustración 67. Icono para edición de la carga presente en uno o varios barrenos (Promine,2024).	56
Ilustración 68. Ventana de edición de la carga de los barrenos seleccionados (Promine,2024).	57
Ilustración 69. Ventana de configuración de reporte (Promine, 2024).	57
Ilustración 70. Ejemplo de reporte generado.	58
Ilustración 71. Análisis de energía vista frontal.	59
Ilustración 72. Ventana de configuración de intervalo entre contornos.	59
Ilustración 73. Ventana de configuración de colores de contornos.	60
Ilustración 74. Ploteo generado en PROMINE con contorno de tiempos y reporte de la plantilla.	60
Ilustración 75. Ejemplo de reporte generado.	62
Ilustración 76. Ejemplo de resumen de reporte de una sección.	63
Ilustración 77. Ejemplo de resumen de costos de voladura.	63
Ilustración 78. Ejemplo de factor de carga.	64
Ilustración 79. Análisis de energía de barrenos de producción.	65
Ilustración 80. Iconos de herramientas de apoyo presentes para barrenos de producción (Promine,2024).	66
Ilustración 81. Equipo Bommer T1 (Epiroc,2025).	68
Ilustración 82. Selección del explosivo con base a las propiedades geomecánicas de la roca (IGME, 1994).	71
Ilustración 83. Cuña quemada (EXSA, 2008).	73
Ilustración 84. Configuración de parámetros módulo de perforación y voladura de galerías.	81
Ilustración 85. Modelamiento de obras de desarrollo vista lateral	81
Ilustración 86. Corte de secciones de los niveles.	82
Ilustración 87. Barrenos de cuña y primeros dos cuadrantes de barrenos auxiliares vista frontal.	83
Ilustración 88. Marcaje de plantillas para obras de desarrollo vista frontal.	84
Ilustración 89. Cargado de barrenos de la plantilla vista lateral 3D.	85

Ilustración 90. Secuencia de retardos vista frontal.	85
Ilustración 91. Contorno de tiempos vista frontal.	86
Ilustración 92. Análisis de energía vista frontal.	87
Ilustración 93. Reporte de la plantilla.	88
Ilustración 94. Redistribución de barrenos vista frontal.	89
Ilustración 95. Contorno de tiempos primera modificación vista frontal.	90
Ilustración 96. Análisis de energía primera modificación vista frontal.	91
Ilustración 97. Selección de barrenos a modificar las cargas explosivas vista frontal.	92
Ilustración 98. Contorno de tiempos segunda modificación vista frontal.	93
Ilustración 99. Análisis de energía segunda modificación vista frontal.	94
Ilustración 100. Reporte final segunda modificación.	94
Ilustración 101. Redistribución de los barrenos tercera modificación vista frontal.	96
Ilustración 102. Contorno de tiempos tercera modificación vista frontal.	97
Ilustración 103. Análisis de energía tercera modificación.	98
Ilustración 104. Reporte final tercera modificación.	98
Ilustración 105. Vista 3D de las plantillas generadas para obras de desarrollo.	99
Ilustración 106. Equipo de barrenación larga Simba E7 (Epiroc, 2025).	100
Ilustración 107. Arreglo de los barrenos de producción con los valores calculados vista frontal.	106
Ilustración 108. Análisis de energía de la plantilla de corte y relleno.	106
Ilustración 109. Reporte final de la plantilla de corte y relleno.	107
Ilustración 110. Primer ajuste de la plantilla vista frontal.	108
Ilustración 111. Análisis de energía del primer ajuste.	108
Ilustración 112. Reporte final del primer ajuste.	109
Ilustración 113. Segundo ajuste de la plantilla vista frontal.	109
Ilustración 114. Análisis de energía del segundo ajuste.	110
Ilustración 115. Reporte final del segundo ajuste.	111
Ilustración 116. Vista lateral de las 3 plantillas realizadas para corte y relleno.	111
Ilustración 117. Corte de sección lateral para realizar la barrenación larga.	114
Ilustración 118. Delimitación de la barrenación larga (cuadro blanco) vista lateral.	114
Ilustración 119. Longitud máxima desde el punto de pivote hasta el límite del banco.	115
Ilustración 120. Plantilla vista desde planta.	116
Ilustración 121. Barrenos vista lateral.	117
Ilustración 122. Análisis de energía de la plantilla en vista lateral 3D.	117
Ilustración 123. Resumen de la plantilla en abanico.	118
Ilustración 124. Plantilla de barrenos paralelos vista desde planta.	120
Ilustración 125. Barrenos vista lateral.	120
Ilustración 126. Análisis de energía de los barrenos paralelos en vista lateral 3D.	121
Ilustración 127. Resumen de la plantilla con barrenos paralelos.	122
Ilustración 128. Generación de pilares en el modelo de bloques vista de planta.	123
Ilustración 129. Generación de obras 3D para salones y pilares vista lateral.	124
Ilustración 130. Secciones de obra para salones y pilares vista frontal.	124
Ilustración 131. Plantilla generada con retardos para salones y pilares vista frontal.	126
Ilustración 132. Contorno de tiempos de la plantilla generada para salones y pilares.	126
Ilustración 133. Análisis de energía de la plantilla para salones y pilares.	127
Ilustración 134. Reporte final de la plantilla para salones y pilares.	127
Ilustración 135. Primer ajuste de la plantilla de salones y pilares vista frontal.	128
Ilustración 136. Análisis de energía ajustando el espaciamiento.	128
Ilustración 137. Plantilla rectangular para salones y pilares vista frontal.	129
Ilustración 138. Contorno de tiempo de la plantilla rectangular.	130

Ilustración 139. Análisis de energía del segundo ajuste de la plantilla.....	130
Ilustración 140. Reporte final del segundo ajuste.	131
Ilustración 141. Plantillas generadas para salones y pilares en vista lateral 3D.	132
Ilustración 142. Costo de perforación y cargado para plantillas de producción.....	133
Ilustración 143. Resumen de costos de la plantilla de abanico.	133
Ilustración 144. Resumen de costos de la plantilla de barrenos paralelos.	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diámetro de broca para el equipo Boomer T1 (Epiroc, 2025).	69
Tabla 2. Clasificación de la roca con base a su resistencia a la compresión simple (Ramírez p. Alejano, L. 2004).....	70
Tabla 3. Clasificación de la calidad de roca con base al RQD (Bongiorno, F. s.f.).	70
Tabla 4. Propiedades del explosivo Emulex 1 (Austin Powder, 2025)	71
Tabla 5. Propiedades del Emulex C (Austin Powder, 2025).	72
Tabla 6. Propiedades del ANFO (Austin Powder, 2025).....	72
Tabla 7. Transcripción del cuadrado para el cálculo simplificado de cuadrantes (Konya y Albarrán, 1998).	74
Tabla 8. Cálculo de cuadrantes para la plantilla de obras de desarrollo.	74
Tabla 9. Dimensiones del explosivo y peso por cartucho Emulex C (Austin Powder, 2025).	78
Tabla 10. Dimensiones del explosivo y peso por cartucho (Austin Powder, 2025).	79
Tabla 11. Catálogo de diámetros disponibles para el Simba E7 (Epiroc, 2025).....	101
Tabla 12. Propiedades del explosivo Senatel Magnafrac (Orica, 2025).....	103
Tabla 13. Propiedades de empaquetamiento Senatel Magnafrac (Orica, 2025).....	103
Tabla 14. Comparación entre plantillas generadas con base a tonelaje, explosivo, factor de carga y costo por tonelada.....	134

1. Introducción

La barrenación y voladura son parte medular del proceso operativo de una mina, dichas actividades requieren de estudios y análisis técnicos para el diseño y ejecución de una plantilla de barrenación y posteriormente su cargado y disparo.

Sin embargo, en la actualidad el entender estos datos de manera teórica y mediante gráficos y tablas, dificulta la adquisición de conocimientos para las y los estudiantes de nuevas generaciones, los cuales tienen un mayor acercamiento a la tecnología. Además, cada vez se cuenta con más herramientas como el software que permiten hacer un diseño y control óptimo de las voladuras, así como de otros aspectos operativos de la minería.

Fue así como se presentó la oportunidad del poder explicar a las y los estudiantes de ingeniería de minas y metalurgia mediante un software como Promine que fue introducido en la Facultad de Ingeniería de la UNAM como parte de un programa de servicio social proporcionado por el Departamento de Minas y Metalurgia.

Con este trabajo se pretende que las y los alumnos puedan entender de una mejor manera el funcionamiento del software para el modelamiento y ajuste de las plantillas de barrenación y la voladura, lo cual les proporcione habilidades a las y los alumnos para la resolución de problemas en la industria, consolidando sus conocimientos teóricos y logrando mejores resultados con ayuda del software, ya que este cuenta con diversos apartados desde la medición del factor de carga hasta la estimación de costos que se pueden visualizar en un reporte final generado por el mismo software.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar patrones de voladura en distintos tipos de obras que se ejecutan en una operación minera utilizando las herramientas de Promine que facilitan su generación y análisis. De esta manera las y los alumnos lograrán una mejor comprensión de los elementos necesarios para el diseño de una plantilla de barrenación incluyendo la selección de explosivo, el cargado, la interpretación de los análisis de energía y otros elementos relevantes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Diseñar patrones de voladura a partir de una base de datos para distintos tipos de obra, tales como obras de desarrollo y producción utilizando las herramientas de PROMINE.
- Analizar patrones de voladura en cada una de las obras propuestas.
- Analizar la efectividad de cada uno de los patrones propuestos con diferentes métodos de explotación subterráneos a partir de datos extraídos de un informe NI 43-101 para la generación del modelo de bloques.
- Analizar los datos obtenidos y realizar una comparación costo-beneficio que favorezca el implementar ciertos patrones empleando las herramientas de Promine para voladuras subterráneas.

1.2 Justificación

A lo largo de mi carrera universitaria, he identificado diversos aspectos que podrían mejorarse en el proceso de adquisición de conocimientos. En el caso específico de la voladura de rocas, he notado que en muchas ocasiones se recurre únicamente a diagramas extraídos de libros antiguos, así como de fórmulas que en la mayoría de los casos son empíricas como menciona Konya y Albarrán (1998) “Las fórmulas presentadas son empíricas y deben dar valores razonables para condiciones de trabajo generales. Sin embargo, condiciones geológicas poco comunes requerirán de ajustes a estos valores calculados” (p. 11). Dichos valores se obtienen a partir de una recopilación de datos de diversas operaciones, complicando su implementación en casos específicos, lo cual dificulta la comprensión por parte de las y los estudiantes.

Durante mi servicio social, tuve la oportunidad de familiarizarme con el uso de software especializado y descubrí una amplia gama de posibilidades para que las y los estudiantes, que no han tenido la oportunidad de visitar una mina o realizar una estancia, puedan visualizar de manera más clara las obras y operaciones mineras. Esto facilita un mejor entendimiento de los mecanismos que influyen en la ejecución de estas actividades.

Por ello, el uso de Promine para diseñar patrones de voladura, que pueden modificarse, rotarse y visualizarse en 3D, contribuirá significativamente a que las y los estudiantes consoliden sus conocimientos. Además, les permitirá analizar cada una de las variables que afectan la voladura de roca y tendrán un mejor entendimiento de la implementación de patrones de voladura.

2. Marco teórico

2.1 Explosivos

EXSA (2008.) define los explosivos como “compuestos o mezclas de sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, que mediante reacciones químicas de óxido-reducción son capaces de transformarse en un tiempo breve”. Estas reacciones generan grandes volúmenes de gases a presión y una onda de choque que se propaga a través de un medio, en este caso, rocas.

El tipo de reacción que ocurre con los explosivos se clasifican de la siguiente manera conforme EXSA (2008):

- **Combustión:** Es una reacción que libera energía en forma de calor, la cual puede o no ser percibida por los sentidos humanos. Su tiempo de reacción es relativamente lento.
- **Deflagración:** Se refiere a una combustión rápida en la que ocurre una descomposición a través de la conductividad térmica. Este proceso es observable y se considera un fenómeno superficial.
- **Detonación:** Es una reacción fisicoquímica de alta velocidad, que genera una gran cantidad de productos gaseosos a elevadas temperaturas, los cuales se expanden con gran fuerza.
- **Explosión:** Se define como una reacción prácticamente instantánea que libera una gran cantidad de energía en un breve lapso.

2.2 Tipos de explosivos

Para los explosivos empleados en minería se subdividen en dos tipos:

- **Altos explosivos.**
- **Bajos explosivos, también llamados agentes explosivos**

Dentro de la categoría de altos explosivos se encuentran los siguientes.

- **Dinamita:** Este tipo de explosivo se obtiene al mezclar nitroglicerina con nitrocelulosa. Dentro de su composición lleva el nitrato de amonio como componente principal (Bernaola et al.,2013).
- **Explosivos permisibles:** Son aquellos explosivos que poseen características especiales para la minería de carbón. Estos explosivos se caracterizan por la generación de una flama corta para evitar reacciones con el gas grisú (NOM-023-STPS-2003).
- **Emulsiones e hidrogeles:** Las emulsiones e hidrogeles se engloban dentro de la categoría de suspensiones, las cuales contienen grandes cantidades de nitrato de amonio y son resistentes al agua. Existen una gran variedad de suspensiones y estas pueden presentar diferentes características en el campo (Konya y Albarrán, 1998).
- **Explosivos especiales:** Entran dentro de esta categoría aquel grupo de explosivos que son fabricados para un uso específico o para uso bajo condiciones particulares. Se pueden componer tanto de dinamita, hidrogeles, nitrato de amonio o una mezcla con algún otro tipo de reactivo (EXSA, 2008).

Para el caso de los bajos explosivos o agentes de voladura se encuentran los siguientes:

- **ANFO:** Es un tipo de explosivo compuesto por un 94% aproximadamente de nitrato de amonio que actúa como oxidante y alrededor de un 6% de Diesel que actúa como combustible (Bernaola et al., 2013)
- **Agentes explosivos acuosos; hidrogeles, emulsiones y mixtos:** Dada la gran variedad de suspensiones, existen algunas que entran en la categoría de agentes explosivos, debido a sus características (Konya y Albarrán, 1998).

Los explosivos de alto poder se inician con facilidad y generan una onda de choque. La energía liberada durante este proceso actúa como detonante para los explosivos de bajo poder, desencadenando una reacción en cadena que culmina en una explosión y, finalmente, en la fragmentación de la roca.

2.3 Propiedades de los explosivos que influyen en la voladura

Cada tipo de explosivo presenta características específicas que determinan su eficacia en función del tipo de roca y las condiciones en las que se utiliza. Entre las propiedades más importantes a considerar se encuentran:

- **Presión de detonación:** Es la energía liberada en forma de gas durante la explosión, responsable de gran parte de la fragmentación de la roca. A mayor temperatura, mayor será la presión del gas (EXSA, 2008).
- **Poder rompedor:** Es una característica del explosivo relacionada con la onda de choque, y se refiere a la capacidad del explosivo para fracturar la roca (Bernaola et al., 2013).
- **Velocidad de detonación:** Es la velocidad con la que la carga explosiva se transforma en gases. Se selecciona un explosivo de detonación lenta para rocas blandas y cuando se busca una fragmentación gruesa. En contraste, para lograr una fragmentación más intensa en rocas duras, se optará por un explosivo que detone rápidamente (Bernaola et al., 2013).
- **Densidad del explosivo:** La International Society of Explosives Engineers (ISEE, 2008) menciona que “La densidad se define como la masa por unidad de volumen y normalmente se expresa en términos de gramos por centímetro cúbico”. A mayor densidad del explosivo, mayor será la concentración de la carga.

2.4 Propiedades de la roca que influyen en la voladura

Los materiales que componen a un macizo rocoso son minerales que poseen características particulares, las cuales deben ser consideradas al diseñar la plantilla de voladura, ajustándola a las características específicas de cada lugar. Algunas de las propiedades de las rocas que proporcionan información relevante para la voladura son las siguientes:

- **Densidad:** La densidad es una de las propiedades más importantes de la roca, ya que su resistencia está correlacionada con ella. Las rocas menos densas se deforman con mayor facilidad y requieren menos energía para fragmentarse, mientras que las rocas con alta densidad necesitan grandes cantidades de energía para deformarse y fragmentarse (EXSA, 2008).
- **Resistencias dinámicas de las rocas:** Las resistencias dinámicas se utilizan para calcular y estimar el tipo de explosivo y la cantidad necesaria, ya que estos valores pueden ser de 5 a 13 veces superiores a las resistencias estáticas obtenidas en ensayos de laboratorio bajo condiciones controladas (López Jimeno, 1982).
- **Porosidad:** Perniá Llera et al. (1987) explican que existen dos tipos de porosidad: la intergranular y la de disolución. La porosidad intergranular está distribuida de manera uniforme en la roca, mientras que la porosidad de disolución se forma debido al desgaste de la roca por acción del agua, creando cavidades irregulares. Ambos tipos de porosidad amortiguan la onda de choque y disminuyen la resistencia dinámica a la compresión de la roca.
- **Fricción interna:** La fricción interna es la característica de las rocas que convierte la energía en calor, dado que las rocas no constituyen un medio elástico. Esta propiedad varía dependiendo del tipo de roca. Perniá Llera et al. (1987) indican que: “la intensidad de la fracturación debida a la onda de tensión aumenta conforme disminuye la fricción interna”.
- **Impedancia:** La impedancia de la roca se define como una propiedad física que detalla la resistencia de un material rocoso al paso de ondas sísmicas o acústicas. Se describe como el producto de la densidad de la roca y la velocidad de la onda sísmica.

2.5 Mecanismo de rotura de la roca

Cuando el explosivo se encuentra confinado dentro de un barreno y detona, se produce una onda que se propaga a través de la roca circundante. Inicialmente, genera un efecto de compresión, que luego se transforma en un esfuerzo de tracción, facilitando la formación de grietas en la roca debido a este esfuerzo (Bernaola et al., 2013).

Este es el mecanismo general que explica el funcionamiento de los explosivos en las rocas. Una vez generadas las grietas, el explosivo, dependiendo de sus características, produce una mayor o menor cantidad de gases que se infiltran a través de las fisuras creadas inicialmente, expandiéndose y culminando en la fragmentación de la roca.

De esta manera, se puede estimar el mecanismo de fractura de la roca utilizando diagramas y cálculos que determinan el radio de influencia del explosivo (Ilustración 1). Esto permite definir el límite máximo para la generación de fisuras en la roca. Sin embargo, si se busca aplicar el procedimiento en un tipo específico de roca, se realiza la carga y detonación de un único barreno para estimar *in situ* el rango máximo de fisuramiento en el macizo debido al explosivo utilizado. Con esta información, se pueden realizar los ajustes necesarios en la plantilla previamente establecida.

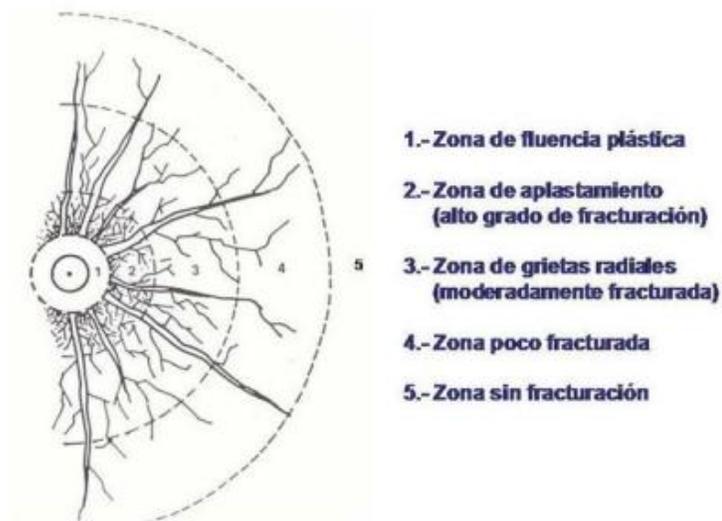


Ilustración 1. Mecanismo de rotura de la roca (Bernaola. J, Castilla. J, Herrera. J, 2013).

2.6 Factores implicados en el éxito de la voladura

El éxito de una voladura depende de dos factores fundamentales: los factores intrínsecos de la roca y las características del explosivo utilizado.

El primer factor, que se abordó en un apartado anterior, incluye los aspectos intrínsecos del macizo rocoso. Estos factores no son modificables ni seleccionables a voluntad, ya que las características del macizo rocoso son inherentemente fijas. Aunque los estudios en campo y en laboratorio sobre núcleos extraídos de las zonas donde se realizarán las voladuras proporcionan datos importantes para el cálculo y diseño de las plantillas, estas muestras no siempre representan de manera completa el comportamiento del macizo rocoso. Por lo tanto, no se puede prever con total precisión el comportamiento del macizo, sin embargo, se puede estimar con un grado de precisión aceptable la ubicación de zonas de fallas, pliegues u otros componentes geológicos significativos a partir del modelamiento geológico.

El segundo factor es la selección adecuada del explosivo en relación con el tipo de roca a fragmentar. Por ejemplo, las rocas extremadamente duras pero frágiles responden mejor a explosivos que generan ondas de alta energía, mientras que las rocas blandas y elásticas son más difíciles de fragmentar y requieren explosivos que produzcan una mayor cantidad de gases (Bernaola et al., 2013). Esta clasificación general ayuda a determinar el tipo de explosivo más adecuado en función de los resultados deseados y el costo del explosivo. Sin embargo, es fundamental realizar estudios y simulaciones para seleccionar el explosivo óptimo.

En resumen, la elección de un buen explosivo está influenciada por tres conceptos interrelacionados: las características intrínsecas de la roca, las propiedades del explosivo y los resultados esperados. La deficiencia en cualquiera de estos aspectos puede impactar negativamente en el resultado deseado (ver Ilustración 2).



Ilustración 2. Parámetros que afectan en la selección del explosivo (Bernaola. J, Castilla. J, Herrera. J, 2013).

Asimismo, la configuración del macizo rocoso puede influir en la facilidad o dificultad de la rotura de la roca, tales como: litología, fracturas preexistentes, tensiones y la temperatura del macizo rocoso.

Es importante destacar que, para evaluar si el resultado de una voladura fue satisfactorio, es necesario comparar los resultados obtenidos con los objetivos previamente establecidos. El objetivo general es lograr una fragmentación y desplazamiento del material adecuados, sin afectar elementos no relacionados con la voladura.

2.6.1 Factores geométricos

Los factores geométricos pueden ser controlados al momento de diseñar la plantilla de voladura, considerando los siguientes aspectos como los más relevantes:

- **Diámetro del barreno y carga:** En obras subterráneas, como rebajes, túneles y contrapozos, se suelen emplear diámetros de barrenación pequeños, inferiores a 100 mm, debido a las dimensiones reducidas de estas obras (Perniá Llera et al., 1987). En consecuencia, algunos explosivos están diseñados para coincidir con ciertos diámetros de broca. Existen dos clasificaciones para el acoplamiento de las dimensiones de la carga a las del barreno:
 - **Carga acoplada:** Se ajusta a presión a las dimensiones del barreno, sin dejar espacio entre las paredes del barreno y el explosivo.

- **Carga no acoplada:** No se ajusta a las dimensiones del barreno, dejando un espacio de aire entre las paredes del barreno y la carga.

Ambas clasificaciones tienen ventajas y desventajas que se abordarán en un apartado posterior.

- **Dimensiones de la obra:** Las dimensiones de la obra determinan la cantidad de explosivo y el número de barrenos necesarios para alcanzar las dimensiones deseadas.
- **Longitud del barreno:** La longitud del barreno influye en el avance obtenido de la voladura y proporciona la base para calcular la cantidad de explosivo a utilizar.
- **Inclinación del barreno:** La inclinación de los barrenos afecta la propagación de la energía de la voladura, el grado de fragmentación y la uniformidad de los tamaños. Generalmente, se emplea el paralelismo entre barrenos para asegurar una distribución homogénea de la energía de la voladura y, por ende, una fragmentación uniforme del material.
- **Número y distribución de los barrenos:** Un cálculo adecuado del número y la distribución de los barrenos puede reducir costos en la barrenación y la cantidad de explosivo empleado, minimizar las vibraciones, mejorar la calidad de la obra y lograr el grado de fragmentación deseado.
- **Bordo:** El bordo es la distancia existente entre la línea de barrenos y el área de alivio más próxima, ya sea la cara libre generada en un inicio o una cara interna generada por una línea de barrenos que fueron detonados previamente con un retardo menor (Konya y Albarrán, 1998.).
- **Espaciamiento:** “Es la distancia entre barrenos de una misma línea” (Pérez y Barral, s.f.).

2.6.2 Carga del barreno

Un cargado inadecuado de los barrenos es una de las razones por las que, en ocasiones, el resultado de la voladura no es el esperado. El cálculo para determinar la carga de los barrenos debe considerar cada uno de los puntos previamente mencionados, ya que, una vez seleccionado el tipo de explosivo y su influencia, se determinará la cantidad a emplear para obtener el resultado deseado.

Cuando los barrenos son de una longitud menor a 4 m se recomienda usar columnas continuas de explosivo, en caso de que la longitud sea mayor a 6 m se recomiendan cargas espaciadas. Sin embargo, el emplear cargas espaciadas presenta la problemática de la reducción en el rendimiento de los equipos de cargado (Pernía Llera et al., 1987).

2.6.3 Secuencia de detonación

La variación en la secuencia de detonación de los barrenos permite controlar la dirección de la salida de la voladura y el movimiento del material fragmentado, así como los desfases temporales. Esto facilita una mayor fragmentación, reduce las proyecciones indeseadas, y minimiza los problemas asociados con sobreexcavaciones y subexcavaciones. Asimismo, uno de los objetivos de establecer una secuencia de detonación es reducir la intensidad de las vibraciones transmitidas al macizo rocoso, así como obtener una granulometría adecuada que previamente se haya establecido y reduzca los costos en maquinaria para la reducción de sobretamaños, reducir el riesgo de alguna proyección de roca proveniente de la voladura que genere algún tipo de daño humano o material, evitar la generación de barrenos quedados y en general obtener un resultado adecuado de la voladura.

El intervalo de tiempo de detonaciones entre filas se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$TRF = k * TRB \quad (2)$$

Donde:

TRF: Tiempo de retardo entre filas

k: Es una constante que puede ir de 2 a 3 dependiendo el tipo de acomodo del material que se desea

TRB: Tiempo de retardo entre barreno

2.7 Función de los barrenos en una plantilla

En las plantillas de barrenación utilizadas en obras de avance en la minería subterránea, los barrenos tienen una función específica y pueden agruparse por zonas (Ilustración 3). Estas son:

- **Barrenos de cuña:** Estos barrenos generan una zona libre por la cual el material puede ser expulsado, permitiendo que la energía aplicada se distribuya hacia las demás zonas sin causar un confinamiento excesivo (recuadro rojo). Pueden tener el mismo diámetro que los otros barrenos o ser de mayor tamaño, dependiendo de las características del macizo rocoso y los datos obtenidos.
- **Barrenos auxiliares:** Su función es mantener la continuidad de la secuencia inicial de detonación y facilitar la fragmentación de la roca (área amarilla). Una mala distribución de estos barrenos puede resultar en fragmentos de roca de tamaño excesivo y en una menor eficiencia de la voladura.
- **Barrenos de contorno (tablas y cielo):** Estos barrenos definen el límite de la obra, evitando la sobreexcavación y el daño al macizo rocoso que podría crear condiciones inseguras y requerir fortificación adicional (línea naranja y rectángulos verdes).
- **Barrenos de piso:** Generalmente se detonan al final con el propósito de levantar el material fragmentado y establecer las líneas del piso que servirán de referencia para el operador del cargador; esto ayuda a evitar irregularidades en el piso y contorno de la obra que pueden reducir la eficiencia de los equipos de rezagado y acarreo (rectángulo lila). Además de no emplear técnicas adicionales como el “despate” para ajustar el piso debido a una voladura deficiente.

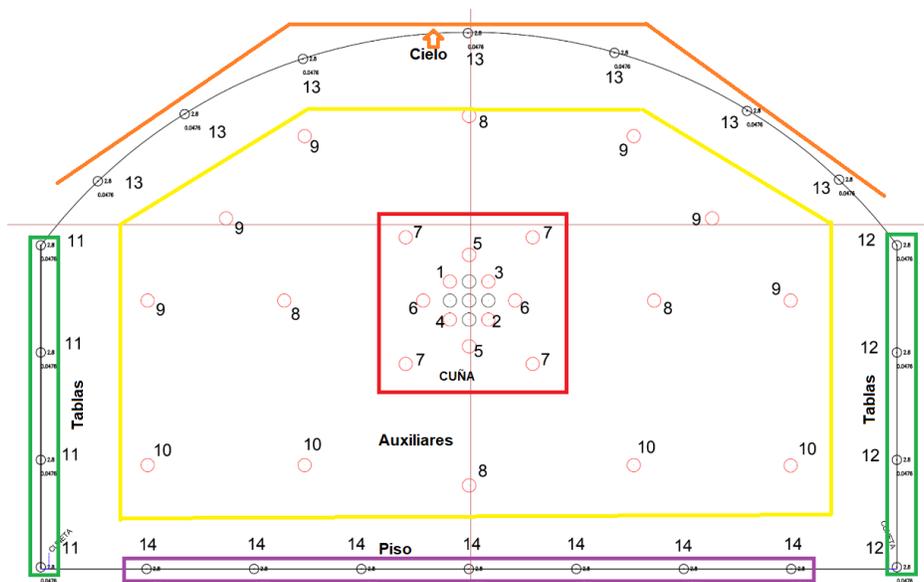


Ilustración 3. Ejemplo de la distribución de barrenos en una plantilla de voladura.

2.8 Métodos de minado subterráneos

Como uno de los objetivos de esta tesis es proponer plantillas para distintos métodos de minado, se calcularán plantillas que se puedan realizar con diferentes equipos para los siguientes métodos, los cuales son los más utilizados en México.

- **Método de salones y pilares:** Es un método con gran simpleza ya que a medida que se va avanzando en la extracción del mineral se van dejando pilares, los cuales preparan las siguientes zonas de explotación y además dan soporte a las zonas ya explotadas, proporcionando seguridad y estabilidad. Se suele emplear en mantos (Reyes C, 2005).
- **Método de corte y relleno:** Es un método ascendente que consiste en extraer el mineral por medio de cortes horizontales y posteriormente reemplazarlo por material estéril que sirve de piso de trabajo para los equipos y el personal de la operación. Al mismo tiempo permite la estabilidad de las obras. Se suele emplear en cuerpos con buzamiento superior a los 50° (Reyes C, 2005).
- **Método de tumbe por subniveles:** Es un método que consiste en tumbar el mineral a partir de subniveles empleando disparos realizados de manera vertical a los subniveles, ya sea utilizando barrenos en abanico o paralelos. Se suele usar en vetas o cuerpos masivos (Reyes C, 2005).

3. Generalidades software Promine

Promine es un software que añade elementos a AutoCAD y BricsCAD aplicados en el diseño de obras mineras, planeación, topografía y geología, además permite el manejo de un gran volumen de información y cuenta con diversos módulos para poder operar un proyecto minero. Sus funciones principales se centran en minería subterránea, aunque de igual manera dispone de un módulo para minería a cielo abierto (Promine, 2024).

Cuenta actualmente con seis módulos principales, los cuales son:

- Esenciales
- Modelización
- Ingeniería 1
- Ingeniería 2
- Live Survey
- Progeox

Dentro de sus complementos más destacados se encuentra el cálculo de recursos, geoestadística, modelo de bloques, planificación, diseño de minas, perforación y voladura, entre otros (Ilustración 4, 5 y 6).

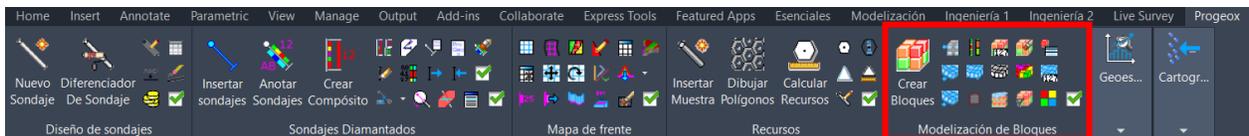


Ilustración 4. Módulo de modelamiento de bloques (Promine,2024).



Ilustración 5. Módulo de Diseño de Obras (Promine,2024).

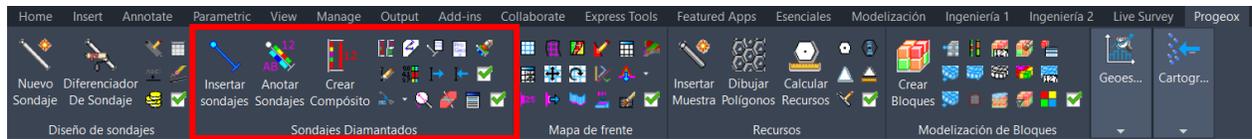


Ilustración 6. Módulo de Sondajes Diamantados (Promine,2024).

En los subapartados siguientes del apartado 3 se describirán de manera general los aspectos fundamentales de los módulos con los que cuenta Promine para la barrenación y voladura subterránea, estos se dividen en dos, los cuales son:

- Módulo perforación y voladura subterránea: Este módulo se enfoca en la generación y análisis de las plantillas para obras de producción.
- Módulo perforación y voladura de galerías: Este módulo se enfoca en la generación y análisis de las plantillas para obras de desarrollo.

3.1. Módulo perforación y voladura subterránea

Dentro de los múltiples módulos con los cuales cuenta Promine, existe en el apartado de Ingeniería 1 el módulo correspondiente a la perforación y voladura subterránea, dicho módulo se enfoca específicamente en la generación y análisis de las plantillas para obras de producción (Ilustración 7).



Ilustración 7. Módulo de perforación y voladura subterránea (Promine,2024).

3.1.1 Línea de Pivote

La línea de pivote es una referencia topográfica sobre la cual se colocará la perforadora y desde donde se empezará a realizar la barrenación de la obra, la configuración de este parámetro es relevante, ya que otorga la orientación de la obra y Promine cuenta con una opción para su ajuste (Ilustración 8).

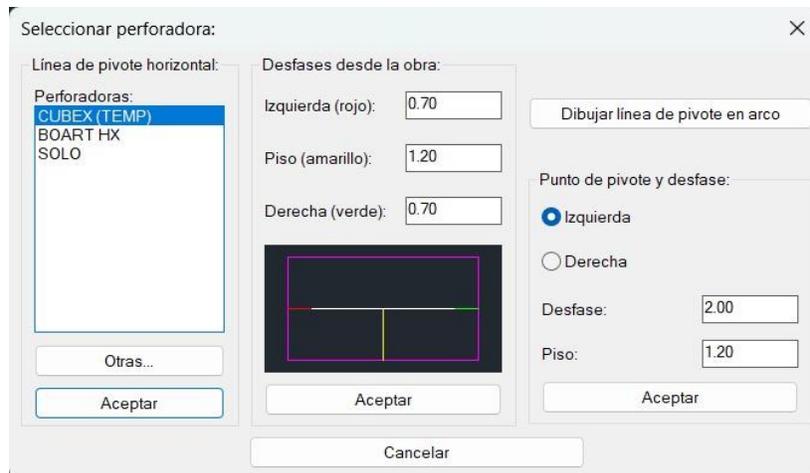


Ilustración 8. Herramienta para la generación de línea de pivote (Promine,2024).

Dentro de Promine existen varias formas de marcar esta línea de pivote, las cuales son:

Línea de pivote horizontal: Se genera ingresando o seleccionando un equipo de barrenación con ciertas dimensiones específicas, las cuales generaran la línea en donde se colocará el equipo (Ilustración 9 y 11).

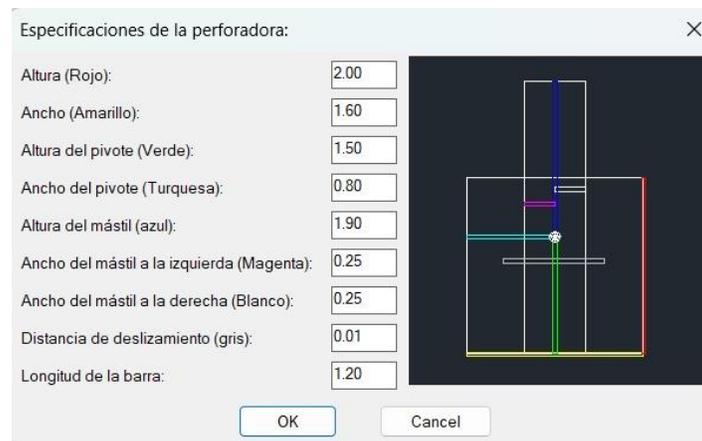


Ilustración 9. Especificaciones del equipo de barrenación (Promine,2024).

Desfase desde la obra: Al establecer la separación entre las paredes de la obra y su piso, se coloca la línea de pivote como referencia (Ilustración 11).

Dibujar línea de pivote en arco: Esta se genera al ingresar o seleccionar un equipo de barrenación con dimensiones específicas (Ilustración 10 y 11), las cuales determinan el tamaño de la línea de pivote, formando un ligero arco de referencia.

Línea de pivote en arco:

Perforadoras: 1060

Ancho de la perforadora: 7.35

Altura de la perforadora: 13.10

Altura del pivote: 1.80

Semi-ángulo: 40.00

Radio: 5.65

Brazo:

Longitud total: 11.50

Longitud de la izquierda: 2.50

Longitud a la derecha: 2.50

Altura del pivote: 5.10

OK Cancel

Ilustración 10. Especificaciones de la barrenadora para generar una línea de pivote en arco (Promine,2024).



Ilustración 11. Línea de pivote horizontal y en abanico.

3.1.2 Configurar parámetros e Insertar tiros

La herramienta de configurar parámetros es fundamental, ya que define los límites dentro de los cuales se ejecutará la voladura (Ilustración 12). Para esto, es necesario contar con la línea de pivote, el contorno de la obra y el contorno de la voladura. Posteriormente, se utilizará la herramienta de inserción de tiros para definir la longitud y la dirección de los barrenos (Ilustración 13). Los ejemplos presentados son a partir de una sección cortada y con una vista de planta de esta.

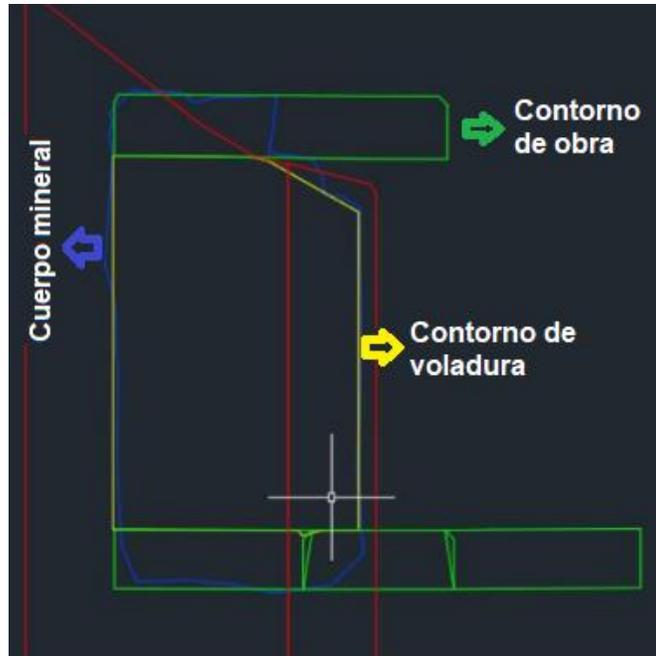


Ilustración 12. Ejemplo de configuración de parámetros para insertar los tiros desde una vista de planta.

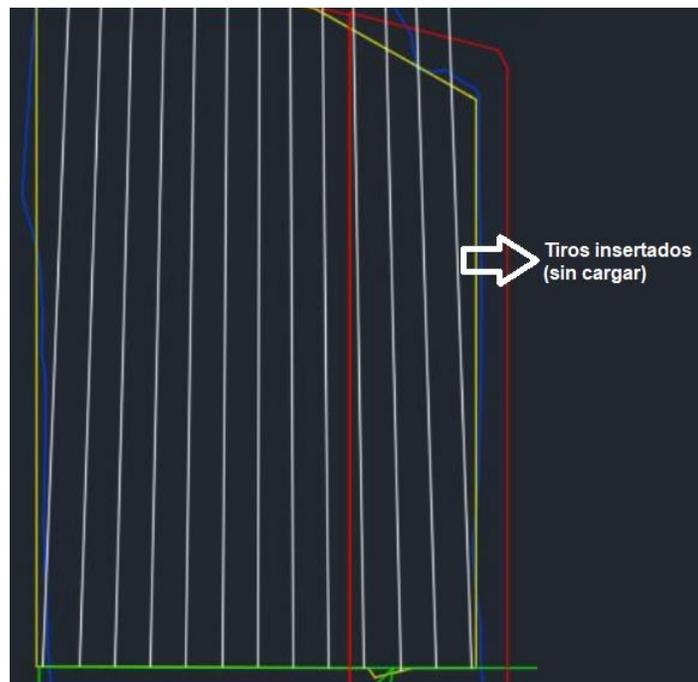


Ilustración 13. Ejemplo de tiros insertados sin carga explosiva desde una vista de planta.

3.1.3 Insertar reporte

Es posible generar múltiples reportes que contengan datos específicos según las necesidades de la operación. En el caso de la voladura, si se desea conocer el número de retardos, el tiempo de retardos, los detonadores, los explosivos, el peso del explosivo, las cargas, entre otros, estos parámetros pueden modificarse dentro del mismo módulo. Posteriormente, se genera el reporte con los datos obtenidos, estos datos pueden ser personalizables en el reporte y mostrar solo los de interés que se encuentren dentro de las siguientes categorías:

- Detalles de tiro (en Promine a los barrenos se les denomina tiros)
- Ángulo
- Longitud
- Línea de referencia
- Explosivo
- Retardo
- Personalizado
- Otros

Lo que permite realizar una medición o generar indicadores para determinar si lo planificado en el software coincidió con los resultados de la operación. En caso de discrepancias, se pueden hacer los ajustes pertinentes o identificar la causa raíz del problema.

Por ello, los reportes se consolidan como una herramienta de gran relevancia, y Promine permite personalizarlos y guardar distintos formatos, ajustándose a las necesidades del usuario (Ilustración 14).

Dentro de la ventana para la personalización de los reportes, se muestran otras, las cuales se detallará a continuación su funcionalidad.

- **Categoría:** Se selecciona la categoría de la cual se desplegará un listado de objetos que se pueden añadir al reporte para el análisis de la voladura.
- **Objetos disponibles:** Listado de opciones que se pueden mostrar en el reporte; ruptura, diámetro, explosivo, longitud del explosivo, peso del explosivo, cantidad de iniciador, entre otros.
- **Reporte:** Se muestra el listado de las opciones seleccionadas para el reporte que se generará.

El resto de las opciones propiamente son para la modificación del estilo del formato como; posición, color, escala, grosor de línea, etc.

Ilustración 14. Herramienta para la personalización de reportes (Promine,2024).

3.1.4 Otras herramientas

El módulo de perforación y voladura subterránea cuenta con otras herramientas útiles, tales como:

- Generar retardos
- Prolongar/Recortar tiros
- Factor de carga
- Profundidad del tiro
- Editar tiros
- Análisis de energía

Entre otras, estas herramientas permiten modificar, eliminar o ajustar elementos de la voladura, así como obtener un análisis más detallado de su comportamiento.

3.2 Módulo de perforación y voladura de galerías

Promine dispone de otro módulo para realizar barrenación y voladura, enfocado principalmente en las obras de desarrollo. Debido a este enfoque, cuenta con menos herramientas que el módulo anteriormente mencionado. Sin embargo, incluye opciones como la inserción de barrenos, la carga de barrenos y la generación de reportes, además de otras funciones complementarias que permiten obtener un análisis más detallado de la voladura que se está diseñando (Ilustración 15).



Ilustración 15. Módulo de perforación y voladura de galerías (Promine, 2024).

3.2.1 Insertar barrenos

Para insertar los barrenos con este módulo, se pueden emplear dos métodos:

- **Generación de una plantilla en AutoCAD:** Esta opción permite exportar los barrenos y proporciona mayor flexibilidad para definir las zonas específicas donde se desean colocar (Ilustración 16).
- **Uso de herramientas del módulo:** Este método incluye una función para definir la forma de la plantilla directamente en el módulo, ya sea en disposición tresbolillo o rectangular, estableciendo parámetros como el borde, el espaciamiento y la dirección para la generación de los barrenos (Ilustración 17).

Adicionalmente, este módulo incluye una función específica para la generación de barrenos en piso, cielo y tablas (Ilustración 18)

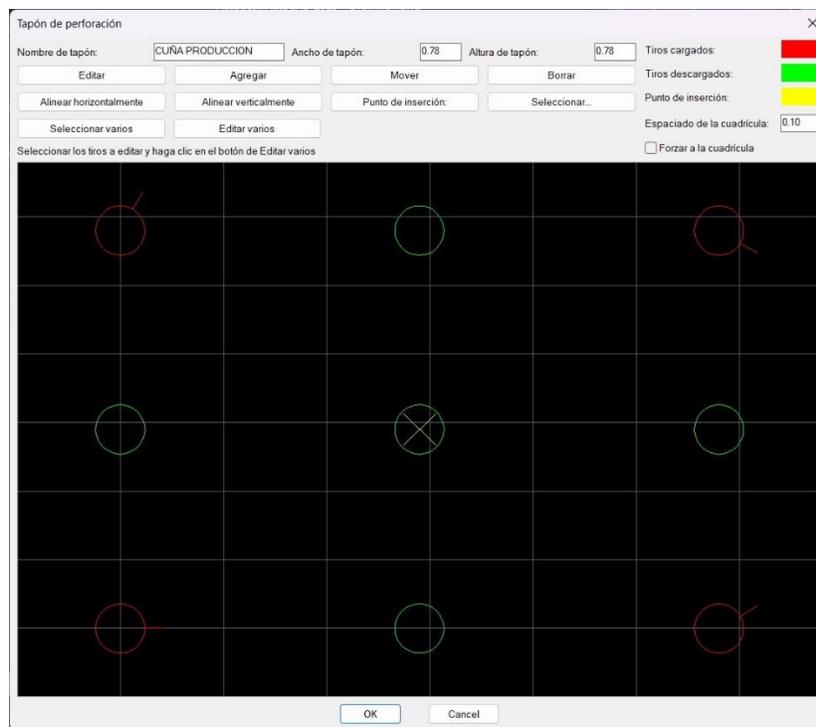


Ilustración 16. Ejemplo de exportación de barrenos de cuña desde AutoCAD (Promine,2024).

Introducir perforación

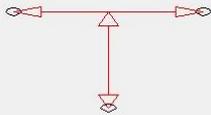
Patrón:

Cuadrado

Tresbolillo

Espaciamiento horizontal:

Espaciamiento vertical:



Diámetro:

Bloque:

Utilizar el diámetro para la escala

Escala:

Inclinación:

Ángulo horizontal:

Longitud:

Elegir la dirección del tiro

Velocidad media de perforación (m/h)

Costo de perforación (\$/m)

Insertar polilínea del tiro

Agregar una zona neutral

OK Cancel

Ilustración 17. Herramienta de generación de barrenos con configuraciones estándar (Promine,2024).

Tiros de perímetro

Diámetro:

Longitud:

Inclinación:

Ángulo horizontal:

Utilizar el diámetro para la escala

Escala de bloque

Velocidad media de perforación (m/h)

Costo de perforación (\$/m)

Insertar polilínea del tiro

Elegir la dirección del tiro

OK Cancel

Ilustración 18. Herramienta para insertar barrenos de contorno (Promine,2024).

3.2.2 Cargado de barrenos

Para el proceso de cargado de barrenos, primero se seleccionan aquellos que se cargarán. Posteriormente, el software Promine abre una ventana (Ilustración 19) en la que se enlistan los barrenos seleccionados. Junto a cada uno de ellos se muestra el tipo de explosivo y el porcentaje de carga, el cual puede estar indicado en porcentaje, cartuchos o longitud.

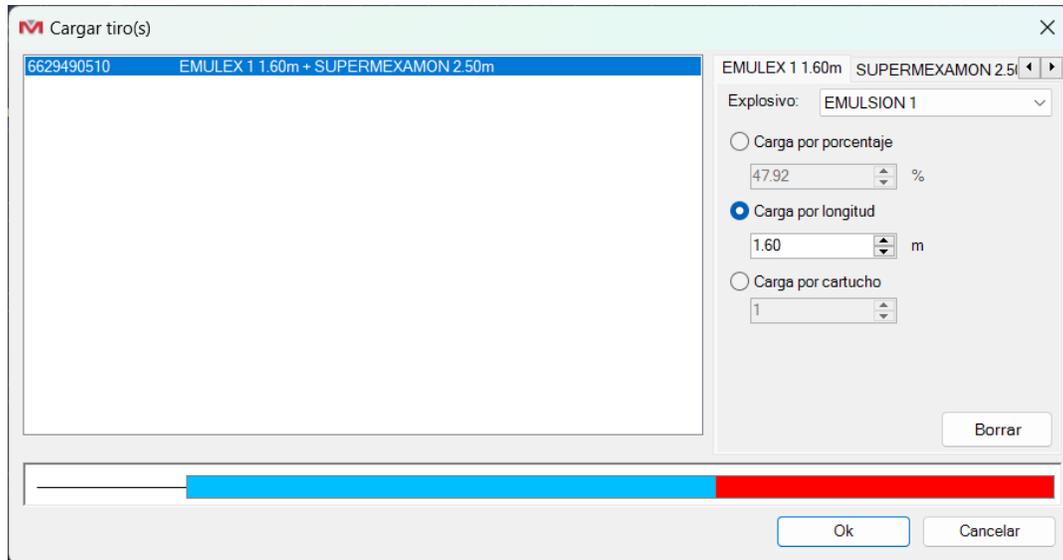


Ilustración 19. Ventana para el cargado de barrenos (Promine 2024).

3.2.3 Reporte

De igual forma, dentro del módulo de perforación y voladura en galerías, es posible generar reportes personalizados a partir de las plantillas creadas, adaptándolos a las necesidades específicas y a los parámetros disponibles en el software (Ilustración 20). Esto permite llevar un control detallado de los indicadores operativos relacionados con las obras de desarrollo, tales como la eficiencia de disparo, el factor de carga, el cumplimiento del plan de minado y los resultados esperados de la plantilla generada.

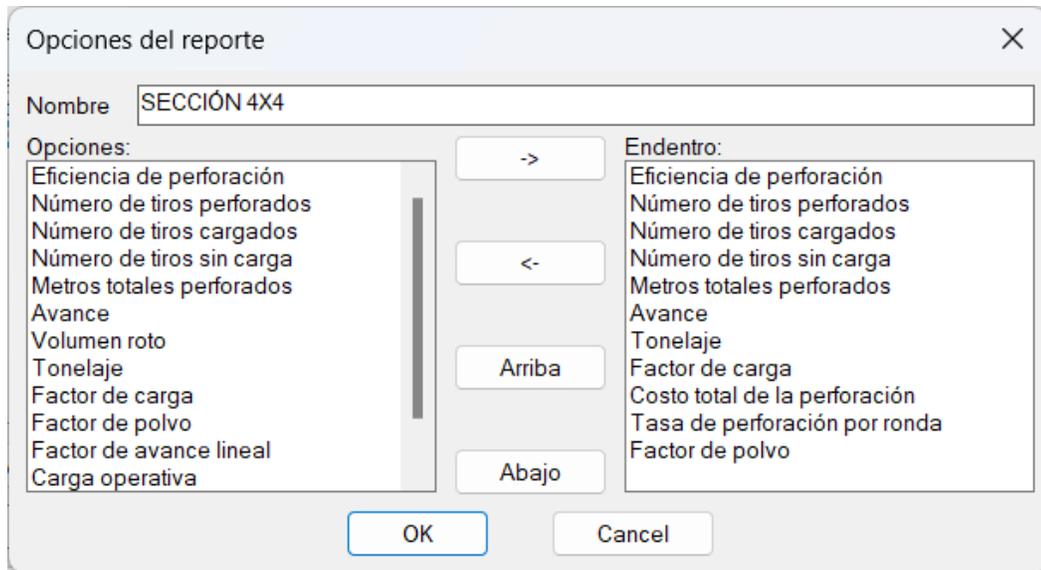


Ilustración 20. Ventana de opciones disponibles para el reporte (Promine,2024).

3.2.4 Otras herramientas

Por otra parte, este módulo incluye herramientas adicionales que permiten modificar y enriquecer las plantillas realizadas. Estas herramientas son:

- Nombrar tiros
- Borrar
- Retardos
- Contorno de tiempos
- Anotaciones
- Análisis de energía
- Borrar análisis

Aunque este módulo no cuenta con un amplio número de herramientas disponibles en comparación con el anterior, las mencionadas son de gran utilidad, ya que permiten agregar elementos que brindan información más detallada sobre las plantillas, mejorando su funcionalidad y adaptabilidad a las necesidades específicas de cada operación.

4. Metodología

La metodología presentada en la Ilustración 21 consiste en un diagrama que describe la secuencia necesaria para diseñar las distintas plantillas, modelarlas y ejecutar el análisis correspondiente. Este diagrama ofrece una visión general del procedimiento a seguir; a continuación, se hace una breve descripción de cada paso.

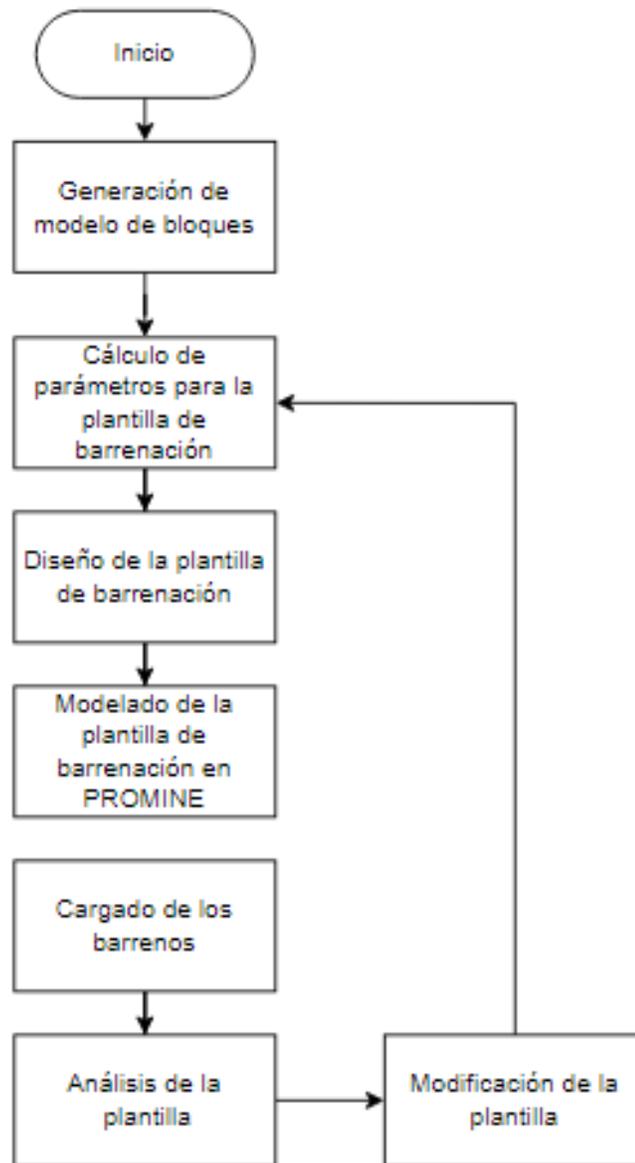


Ilustración 21. Metodología para la generación y análisis de las plantillas de barrenación y voladura.

4.1 Generación de modelo de bloques

Se desarrollará un modelo de bloques basado en los datos de la campaña de barrenación presentados en el informe NI 43-101 del proyecto "Los Pinos" generado por Candelaria Mining Corp en el año de 2018, así como en los parámetros necesarios para su construcción. A partir de este modelo, se propondrán diferentes configuraciones con el objetivo de generar escenarios que permitan aplicar los métodos de minado establecidos en los objetivos de esta tesis. Esto facilitará la propuesta de plantillas de barrenación y voladura más adecuadas para las obras de desarrollo y producción, considerando las características del cuerpo mineralizado y el método de extracción empleado. Finalmente, los resultados obtenidos serán analizados utilizando el software Promine.

4.1.1 Datos de la exploración superficial

La información geológica empleada para el modelado del yacimiento se obtuvo a partir de los datos recopilados durante la campaña de barrenación reportada en el informe NI 43-101 (Ilustración 22)

TDH_Hole	DH_East	DH_North	DH_RL	DH_Dip	DH_Azimuth	DH_Bottom
CA16PI001	232998.0	2469429.5	2479.90	-50.5	305.0	134.20
CA16PI002	232998.4	2469429.1	2479.90	-77.0	307.0	80.30
CA16PI003	233011.7	2469443.0	2480.68	-66.0	312.0	82.40
CA16PI004	233023.5	2469459.5	2481.34	-75.0	312.0	103.70
CA16PI005	233034.2	2469476.0	2481.94	-65.0	302.0	67.10
CA16PI006	233043.7	2469493.7	2482.59	-80.0	303.0	125.05
CA16PI007	233052.7	2469512.7	2482.78	-56.0	300.0	53.85
CA16PI008	232790.1	2469329.1	2470.50	-80.0	117.0	164.70
CA16PI009	232805.2	2469367.5	2474.10	-66.0	110.0	134.20
CA16PI010	232827.4	2469400.2	2477.79	-86.0	138.0	186.05
CA16PI011	232851.3	2469432.9	2482.08	-71.0	120.0	164.70
CA16PI012	232940.3	2469614.4	2500.68	-82.0	124.0	250.10
CA16PI013	232983.1	2469658.0	2494.64	-66.0	118.0	143.35
CA16PI014	232983.2	2469657.8	2494.62	-81.0	126.0	158.60
CA16PI015	233047.6	2469663.2	2485.73	-63.0	117.0	115.90
CA16PI016	233051.4	2469708.1	2483.22	-66.0	115.0	128.10
CA16PI017	233087.1	2469781.1	2484.03	-70.0	117.0	132.15
CA16PI018	232357.4	2468562.2	2431.96	-77.0	98.0	295.85
CA16PI019	232351.1	2468683.4	2434.37	-65.0	99.0	176.90
CA16PI020	232216.8	2468411.6	2425.02	-70.0	101.0	196.75
CA16PI021	232167.9	2468298.0	2424.67	-66.0	119.0	159.75
CA16PI022	232115.2	2468190.8	2422.95	-76.0	120.0	118.95
CA16PI023	232512.2	2468985.7	2447.34	-71.0	118.0	126.60
CA16PI024	232539.5	2469040.8	2449.45	-74.0	128.0	158.60
CA16PI025	232592.9	2469100.6	2453.33	-68.0	119.0	137.25
CA16PI026	232553.7	2469081.7	2451.15	-75.0	120.0	157.05
CA16PI027	232981.6	2469405.3	2478.48	-53.0	305.0	54.90
CA16PI028	232032.7	2467955.6	2416.46	-70.0	118.5	152.55
CA16PI029	232509.6	2468935.2	2445.58	-81.0	126.0	117.40
CA16PI030	232531.4	2469020.4	2448.60	-81.0	123.0	175.25
CA16PI031	232562.2	2469123.3	2452.71	-75.0	119.0	167.70
CA16PI032	232331.5	2468600.5	2431.45	-76.0	120.0	161.65
CA16PI033	232179.3	2468265.2	2423.80	-79.0	118.0	147.90
					Total (m)	4729.50

Ilustración 22. Datos de campaña de barrenación (Candelaria Mining Corp, 2018).

Los datos presentados en la ilustración anterior corresponden a las coordenadas de los barrenos de exploración realizados durante la campaña. Esta información, junto con los datos mostrados en la ilustración 23, que incluyen los contenidos metálicos presentes en dichos barrenos y el intervalo en el que se encuentran, constituye la base para la generación de los compósitos necesarios para el desarrollo del modelo de bloques. Cabe destacar que los contenidos fueron modificados para la elaboración de esta tesis; no obstante, todos los demás datos fueron extraídos del informe NI-43-101 elaborado por Candelaria Mining Corp en 2018.

TDH_Hole	DH_East	DH_North	DH_RL	DH_Dip	DH_Azimuth	DH_Bottom	Interval From (m)	Interval To (m)	Au g/t	Ag g/t	Lenght (m)
CA16PIO01	232998	2469430	2479.9	-50.5	305	134.2	37.03	38.6	3.5	100	1.57
CA16PIO02	232998	2469429	2479.9	-77	307	80.3	53	61.85	3.8	110	8.85
CA16PIO03	233012	2469443	2480.7	-66	312	82.4	53.25	53.85	4.1	89	0.6
CA16PIO04	233024	2469460	2481.3	-75	312	103.7	54.9	78.95	3	114	24.05
CA16PIO05	233034	2469476	2481.9	-65	302	67.1	47.2	47.85	2.6	113	0.65
CA16PIO06	233044	2469494	2482.6	-80	303	125.05	36.1	40.8	3.1	110	4.7
CA16PIO07	233053	2469513	2482.8	-56	300	53.85	31.2	32.65	2.8	89	1.45
CA16PIO08	232790	2469329	2470.5	-80	117	164.7	102.65	104.3	4	98	1.65
CA16PIO09	232805	2469368	2474.1	-66	110	134.2	103.8	104.4	4.3	97	0.6
CA16PIO10	232827	2469400	2477.8	-86	138	186.05	159.66	165.9	2.7	87	6.24
CA16PIO11	232851	2469433	2482.1	-71	120	164.7	107.79	108.38	2	88	0.59
CA16PIO12	232940	2469614	2500.7	-82	124	250.1	128.2	129.1	3.5	60	0.9
CA16PIO13	232983	2469658	2494.6	-66	118	143.35	121.4	122.2	2.7	75	0.8
CA16PIO14	232983	2469658	2494.6	-81	126	158.6	96.7	97.9	3.8	101	1.2
CA16PIO15	233048	2469663	2485.7	-63	117	115.9	71.1	72.2	4.1	102	1.1
CA16PIO16	233051	2469708	2483.2	-66	115	128.1	97.6	100.15	4.1	120	2.55
CA16PIO17	233087	2469781	2484	-70	117	132.15	123.32	124.02	3.2	89	0.7
CA16PIO18	232357	2468562	2432	-77	98	295.85	92.91	94.11	3	88	1.2
CA16PIO19	232351	2468683	2434.4	-65	99	176.9	154.29	156	1	67	1.71
CA16PIO20	232217	2468412	2425	-70	101	196.75	181.7	184.35	1.7	75	2.65
CA16PIO21	232168	2468298	2424.7	-66	119	159.75	121	123.58	3.2	68	2.58
CA16PIO22	232115	2468191	2423	-76	120	118.95	94.72	96.19	3.3	98	1.47
CA16PIO23	232512	2468986	2447.3	-71	118	126.6	108.15	109.8	3.4	101	1.65
CA16PIO24	232540	2469041	2449.5	-74	128	158.6	70.15	74.75	4.3	56	4.6
CA16PIO25	232593	2469101	2453.3	-68	119	137.25	106.5	113.4	2	87	6.9
CA16PIO26	232554	2469082	2451.2	-75	120	157.05	36.68	37.04	1.8	88	0.36
CA16PIO27	232982	2469405	2478.5	-53	305	54.9	42.24	42.6	4.5	50	0.36
CA16PIO28	232033	2467956	2416.5	-70	118.5	152.55	93.07	96.1	3.2	90	3.03
CA16PIO29	232510	2468935	2445.6	-81	126	117.4	91.99	93.5	3.8	100	1.51
CA16PIO30	232531	2469020	2448.6	-81	123	175.25	157.96	159.78	3.6	87	1.82
CA16PIO31	232562	2469123	2452.7	-75	119	167.7	36.6	40.85	2	69	4.25
CA16PIO32	232332	2468601	2431.5	-76	120	161.65	146.4	146.87	2.2	76	0.47
CA16PIO33	232179	2468265	2423.8	-79	118	147.9	115.35	115.7	1.7	88	0.35

Ilustración 23. Valores de contenidos para la generación de los compósitos.

4.1.2 Modelado y arreglo

A partir de los datos previamente mencionados y utilizando el programa Access, incluido en la paquetería de Windows, se migraron los datos de barrenación para generar una base de datos que puede ser importada al software PROMINE mediante el módulo correspondiente (Ilustración 24).



Ilustración 24. Módulo de Sondajes Diamantados (Promine,2024).

Con el módulo de Sondajes Diamantados y utilizando la herramienta "Insertar sondajes", se generan los barrenos de los cuales se crearán los compósitos necesarios para el modelado. Es necesario seleccionar la base de datos creada en Access y completar los parámetros solicitados por el software (Ilustración 25)

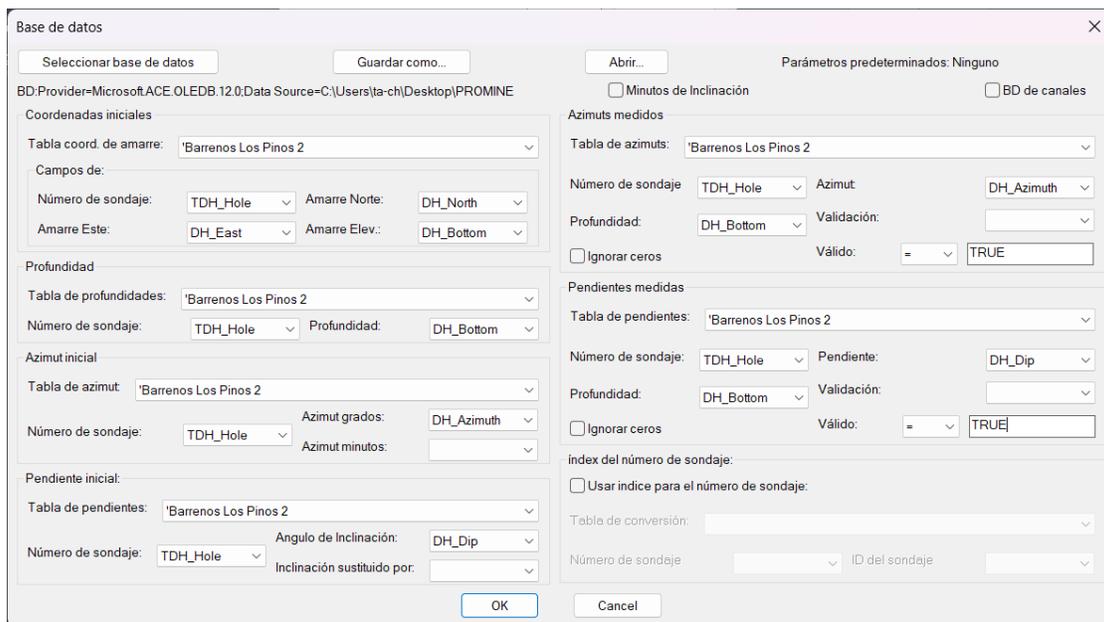


Ilustración 25. Ventana para el cargado de la base de datos de los barrenos (Promine,2024).

Una vez que se han cargado los parámetros de los barrenos, estos se insertan en el software. Finalmente, los barrenos se visualizan como se muestra en la Ilustración 26.



Ilustración 26. Barrenos insertados vista lateral (Promine.2024).

Posteriormente, utilizando la herramienta “Crear compósitos”, se selecciona nuevamente la base de datos creada en Access y se completan los campos solicitados por el software. En este caso, se trabajó específicamente con los valores de oro, dado que este es el elemento de interés (Ilustración 27). Al momento de llenar los datos en la ventana general, es necesario seleccionar el método que se empleará para la ubicación de los compósitos a generar (Ilustración 28). Finalmente, se seleccionan los sondajes previamente cargados y el software genera los compósitos correspondientes (Ilustración 29).

A screenshot of a software dialog box titled "Agregar/Editar Ley". The dialog has a close button (X) in the top right corner. It contains several fields: "Tipo de ley:" with a dropdown menu showing "Au"; a button labeled "Seleccionar BD..."; "BD:Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data"; "Tabla:" with a dropdown menu showing "'Barrenos Los Pinos 2"; "Valor:" with a dropdown menu showing "Au g/t"; "Número de sondaje:" with a dropdown menu showing "TDH_Hole"; "Desde:" with a dropdown menu showing "Interval From (m)"; and "Hasta:" with a dropdown menu showing "Interval To (m)". At the bottom, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Ilustración 27. Adición de la ley con la que se creará los compósitos (Promine,2024).

Compósitos [X]

Seleccionar leyes

Leyes:

 Cortar valores

Cilindros de los Compósitos

Insertar los cilindros de los compósitos

Diámetro:

En capa:

Colorear según:

Ley de fondo

Insertar texto

Anotar ley

Anotar ángulo

Insertar sólido

Altura del texto:
 Longitud máxima:
 Porcentaje de faltante tolerable:
 Porcentaje de tolerancia en longitud:
 En capa:
 Colorear según:

Ubicación

Señalar muestras

Señalar intervalo en el sondaje

Seleccionar sondajes

Limitar sondajes por selección de malla

Sondajes seleccionados con limite en base de datos

Profundidades desde BD

Base de datos

BD: Provider=Microsoft.ACE.OLEDB.12.0;Data

Tabla:

Valor:

Número de sondaje:

Desde:

Hasta:

Ilustración 28. Selección de ley generada y el tipo de ubicación para los compósitos (Promine,2024).

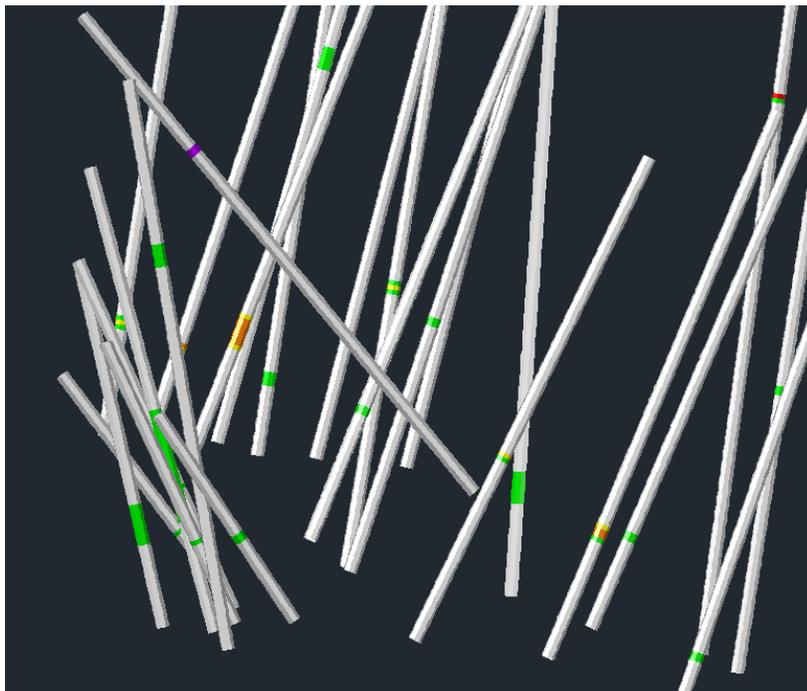


Ilustración 29. Compósitos generados vista lateral en 3D (Promine,2024).

Posteriormente, utilizando el módulo de generación de modelos de bloques (Ilustración 30), se desarrolla el modelo a partir de los compósitos creados llenando los parámetros que solicita el software como se observa en la Ilustración 31, los parámetros principales que se deben de ajustar son:

- Dimensiones de bloques
- Límite de modelización
- Método de modelización
- Distancia máxima de búsqueda



Ilustración 30. Módulo de Modelización de Bloques (Promine,2024).

Ilustración 31. Ventana para el modelado de bloques (Promine,2024).

A partir del modelo generado (Ilustración 32), se propusieron dos arreglos que permiten una definición visual más clara de la forma del cuerpo mineralizado. El código de colores que se observa en las ilustraciones representa la ley contenida en cada uno de los bloques, y su distribución se organiza de acuerdo con la siguiente escala.

- **Color verde: 0 a 1 g/t**
- **Color amarillo: 1 a 2 g/t**
- **Color naranja: 2 a 3 g/t**
- **Color rojo: 3 a 4 g/t**
- **Color morado: mayor a 4 g/t**

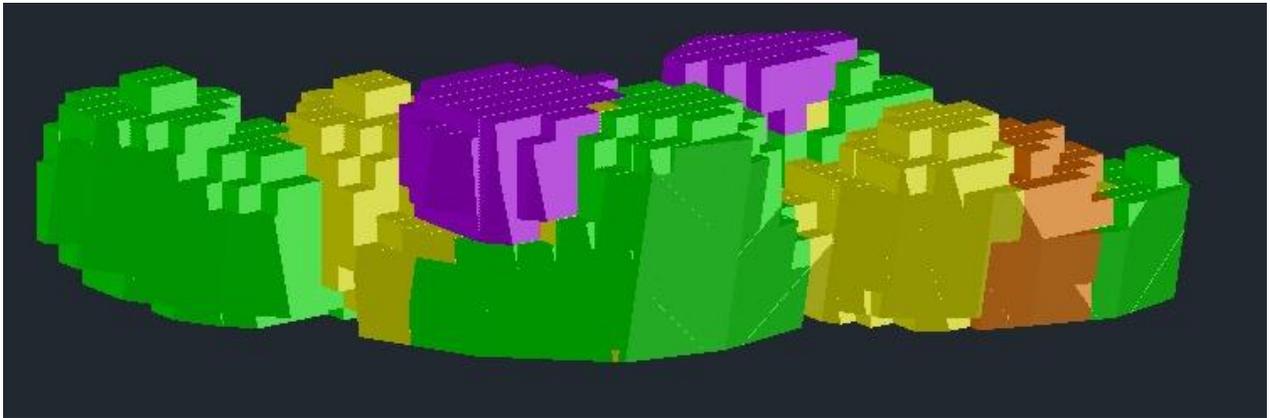


Ilustración 32. Modelo de bloques generado a partir de los datos del NI 43-101 vista lateral.

El primer arreglo se generó a partir de la delimitación del modelo de bloques mostrado en la Ilustración 32. Este arreglo representa un cuerpo vertical de gran potencia, el cual simula una veta (Ilustración 33).

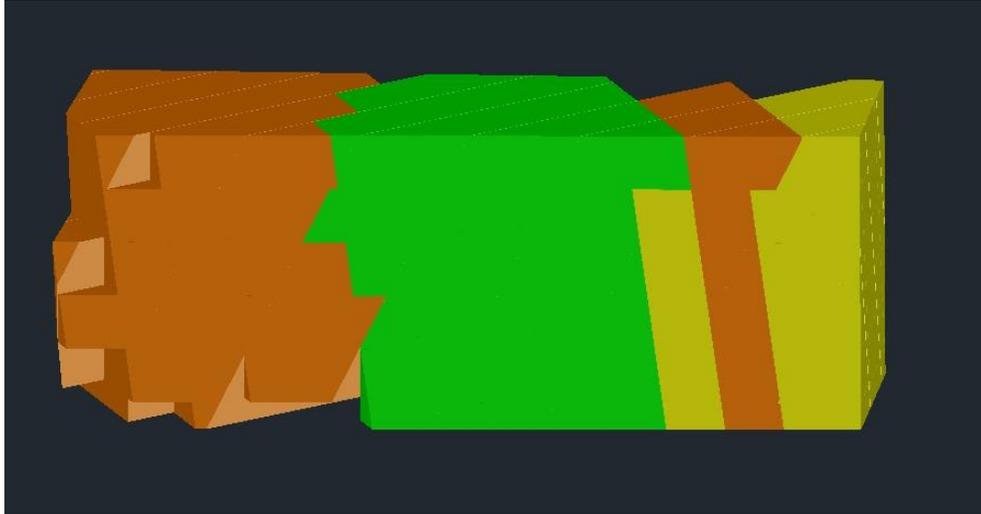


Ilustración 33. Arreglo vertical a partir del modelo de bloques vista lateral.

El segundo arreglo mostrado corresponde a un cuerpo horizontal y tabular que simula un manto (Ilustración 34). Este arreglo utiliza el mismo código de colores descrito anteriormente.

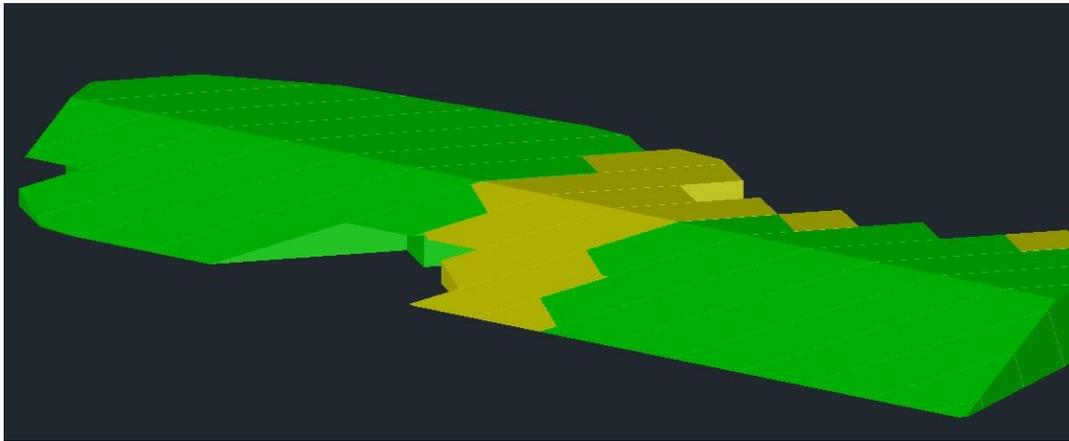


Ilustración 34. Arreglo horizontal a partir del modelo de bloques vista lateral.

Los arreglos del modelo de bloques mencionados anteriormente se utilizarán como base para la generación de las obras. A partir de estas obras se diseñarán las plantillas de barrenación, las cuales servirán para la elaboración de los reportes correspondientes.

4.2. Cálculo de parámetros para las plantillas de barrenación y voladura

4.2.1 Módulo Perforación y Voladura de Galerías

Para el diseño de las plantillas en PROMINE, se requiere partir de una base, es decir calcular los parámetros básicos manualmente para generar la plantilla, por lo que se utilizarán las fórmulas extraídas del **Konya** y del **Manual práctico de voladura de EXSA** para calcular los siguientes parámetros.:

- Bordo
- Espaciamiento
- Número de barrenos
- Carga de columna
- Carga de fondo
- Taco

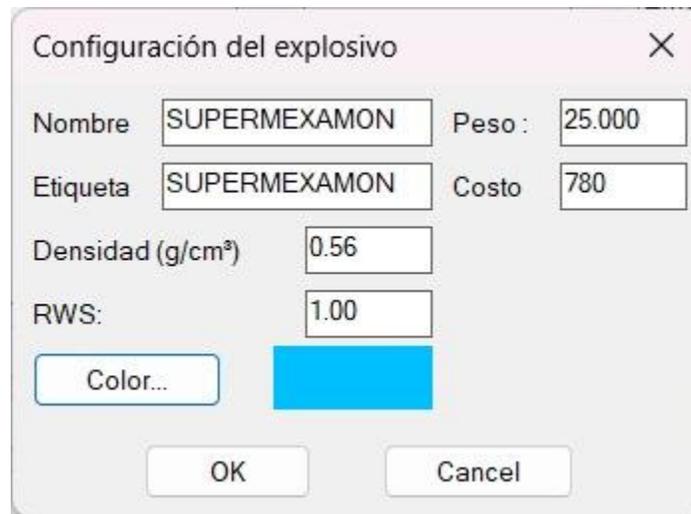
Lo anterior se llevará a cabo para cada uno de los casos propuestos en un apartado posterior. Cabe mencionar que existen múltiples fórmulas desarrolladas por distintos autores para este tipo de análisis; sin embargo, en este trabajo se utilizarán las fórmulas de **Konya**, por ser de las más utilizadas, y las del **Manual Práctico de Voladura de EXSA**, seleccionadas bajo criterio propio.

Como se mencionó anteriormente, estas fórmulas son de carácter empírico y, por lo tanto, sirven únicamente como guía para el diseño inicial de las plantillas. Estos parámetros pueden ser ajustados por el responsable en función de los resultados observados en campo.

Asimismo, es fundamental contar con las especificaciones técnicas de los explosivos a emplear. El software Promine requiere que se ingresen los siguientes parámetros técnicos (Ilustración 35) para registrar correctamente el explosivo que se utilizará en el cargado de los barrenos. Los parámetros por registrar son los siguientes:

- Densidad del explosivo
- Peso
- Costo

- AWS (Energía Absoluta por Unidad de Peso): Es un valor que suele incluirse en las fichas técnicas de los explosivos, con una comparativa respecto al ANFO.



Configuración del explosivo

Nombre: SUPERMEXAMON Peso: 25.000

Etiqueta: SUPERMEXAMON Costo: 780

Densidad (g/cm³): 0.56

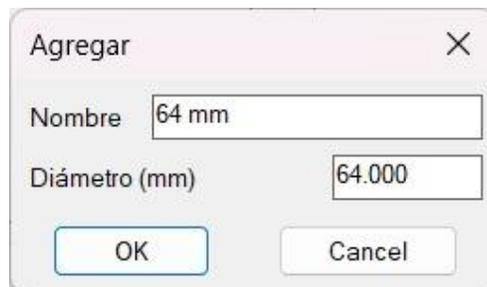
RWS: 1.00

Color...

OK Cancel

Ilustración 35. Ventana de configuración de explosivo.

Además, es imprescindible definir los diámetros de barrenación que se utilizarán (Ilustración 36) y los retardos que se aplicarán (Ilustración 37).



Agregar

Nombre: 64 mm

Diámetro (mm): 64.000

OK Cancel

Ilustración 36. Ventana de configuración de diámetros de barrenación (Promine,2024).

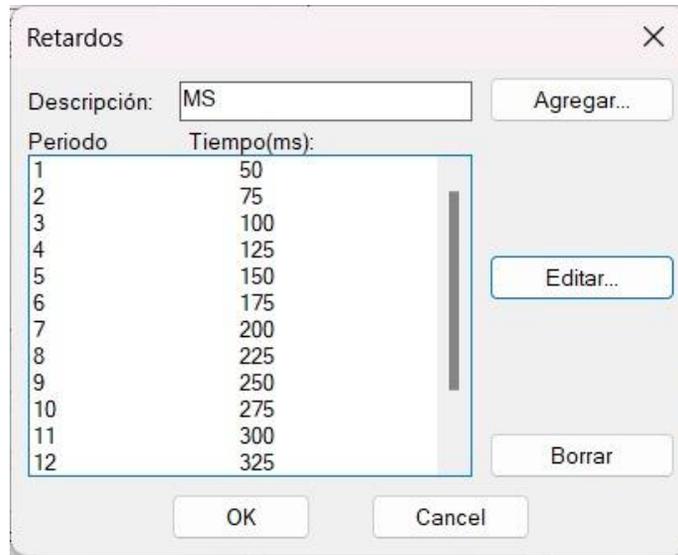


Ilustración 37. Ventana de configuración de retardos (Promine.2024).

Una vez configurados todos los parámetros básicos en Promine, estos se visualizan en una ventana general que facilita la revisión (Ilustración 38).

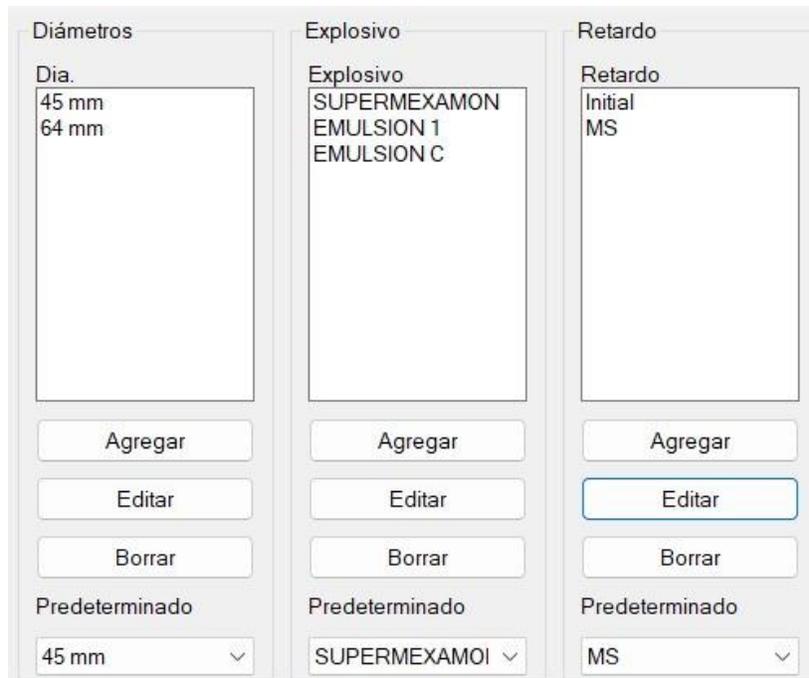


Ilustración 38. Ventana general donde se realiza la configuración de parámetros.

4.2.2 Módulo Perforación y Voladura Subterránea

En el caso del módulo enfocado en las plantillas de producción, es necesario configurar los mismos parámetros básicos que en el módulo destinado a las plantillas de desarrollo. Esto incluye realizar los cálculos necesarios para determinar el espaciamiento, bordo, carga de fondo, carga de columna, taco, entre otros.

Para facilitar este proceso, el módulo dispone de una herramienta específica para la configuración de parámetros (Ilustración 39). Esta herramienta incluye opciones para definir el tipo de perforación predeterminada, ajustar las dimensiones del texto, establecer colores predeterminados para los elementos de perforación y acceder a otras funcionalidades, como perforadoras, diámetros, reportes, explosivos y contrapozos. Además, permite añadir tantos datos como lo permita el software. Finalmente, incorpora opciones enfocadas en el diseño y la presentación de los reportes, las cuales pueden ser personalizadas directamente desde la opción "Personalizar reportes" (Ilustración 40).

Opciones - Perforación y voladura subterránea

Perforación

Opción predeterminada

Distancia desde línea de referencia

Paralelo

Distribuir

Abanico

Manual

Seguir

Desde la boca

Desde punto del pivote

Texto

Altura general del texto: 0.700

Altura de texto - Dirección de la vista: 1.000

Altura de texto - Proyectar boca/fondo: 1.000

Tolerancia de ruptura: 0.100

Espaciamiento (radio del cursor): 1.600

Sobre-perforación: 0.000

Profundidad: 5.000

Costo de perforación/longitud: 7.000

Costo de carga/longitud: 1.000

Colores para las funciones de perforación

Color...

Color para marcar tiro en vista en planta

Tiro abierto

Tiros no abiertos

Anotar tiro

Anotar tiro

Estilo

Personalizar reporte...

Perforadoras...

Diámetros...

Explosivos...

Contrapozos...

Guardar como...

Cargar...

OK

Cancel

Ilustración 39. Ventana para la configuración de parámetros del módulo (Promine,2024).

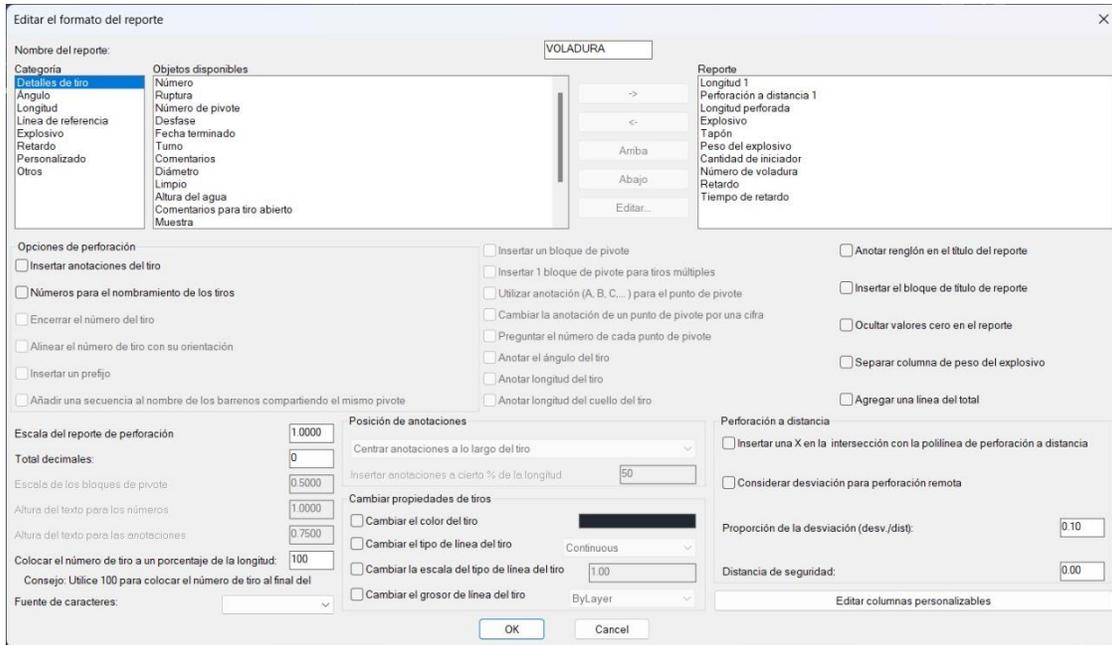


Ilustración 40. Ventana para la personalización de los reportes (Promine,2024).

Dentro de la configuración de parámetros, también se encuentra la opción de **perforadoras**, que permite añadir y configurar equipos de perforación, como se explicó en un apartado anterior (Ilustración 41).

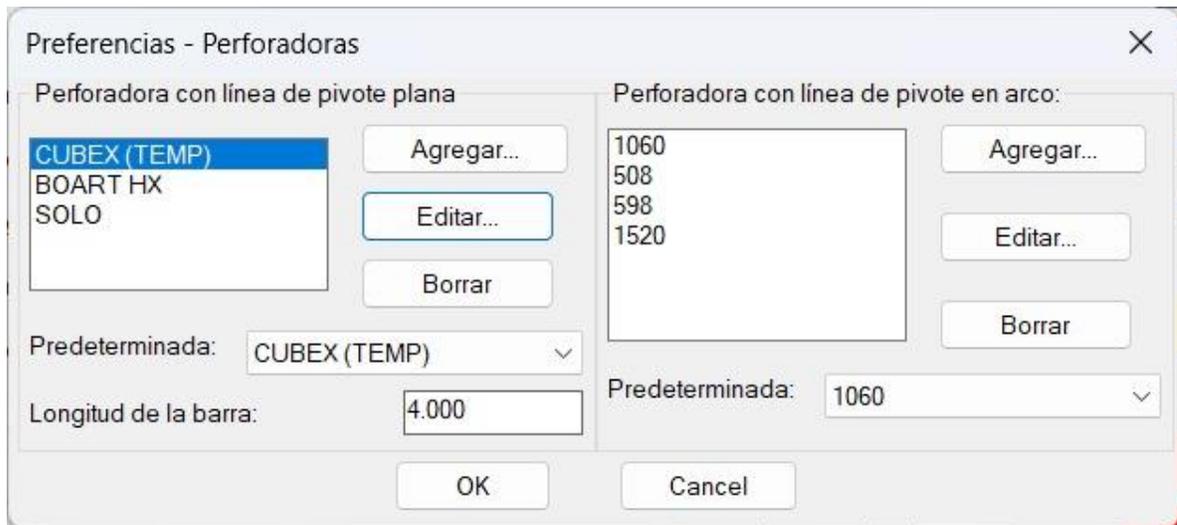


Ilustración 41. Ventana para agregar perforadoras y editar las generadas (Promine,2024).

Asimismo, el módulo incluye herramientas para la configuración de explosivos (Ilustraciones 42 y 43), donde se pueden ajustar los retardos, iniciadores, densidad del mineral, bordo, espaciamiento, y otros parámetros esenciales, adaptándolos a las necesidades específicas de la operación (Ilustración 44).

Ilustración 42. Ventana para la configuración de explosivo, iniciadores y retardos (Promine,2024).

Nombre: APEX ULTRA Densidad: 1.20
 Etiqueta: APEX UL Peso: 25.0
 Colores... Costo: 1.00
 Tipo de línea: [dropdown] RWS: 0.85
 Escala: [input]
 Ancho: [input]

OK Cancel

Ilustración 43. Ventana para la configuración del explosivo (Promine,2024).

Nombre: LONG
 Retardos: [list: 0, 250, 500, 750, 1000]
 Valor: [input]
 Agregar...
 Borrar

OK Cancel

Ilustración 44. Ventana de configuración de retardos (Promine,2024).

Por último, al igual que en el módulo para obras de desarrollo, es posible agregar y editar los diámetros de barrenación (Ilustración 35), proporcionando mayor flexibilidad en el diseño de las plantillas de explotación.

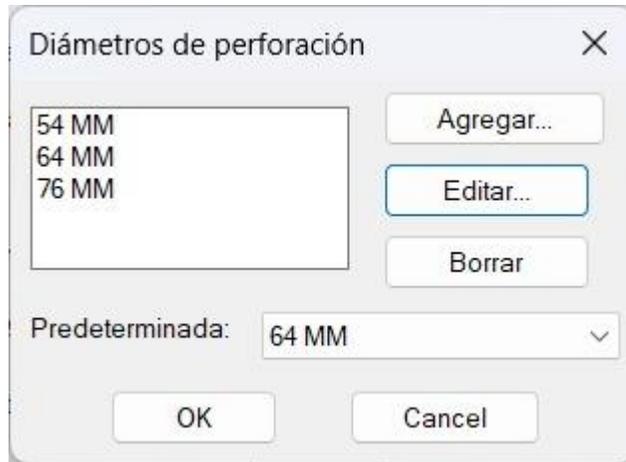


Ilustración 45. Ventana para la configuración de diámetros de perforación (Promine,2024).

4.3 Diseño de la plantilla de barrenación

4.3.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías

Una vez configurados los parámetros básicos y hechos previamente los cálculos manuales mediante las fórmulas de Konya, EXSA u otro método, se procede al diseño de la plantilla de barrenación en AutoCAD. Este diseño puede realizarse manualmente o utilizando las herramientas mencionadas en apartados anteriores.

El primer paso consiste en definir un perfil de la obra, específicamente para el caso de las obras de avance (Ilustración 46). Este perfil será agregado a la lista de perfiles de obra predeterminados que incluye el software (Ilustración 47).

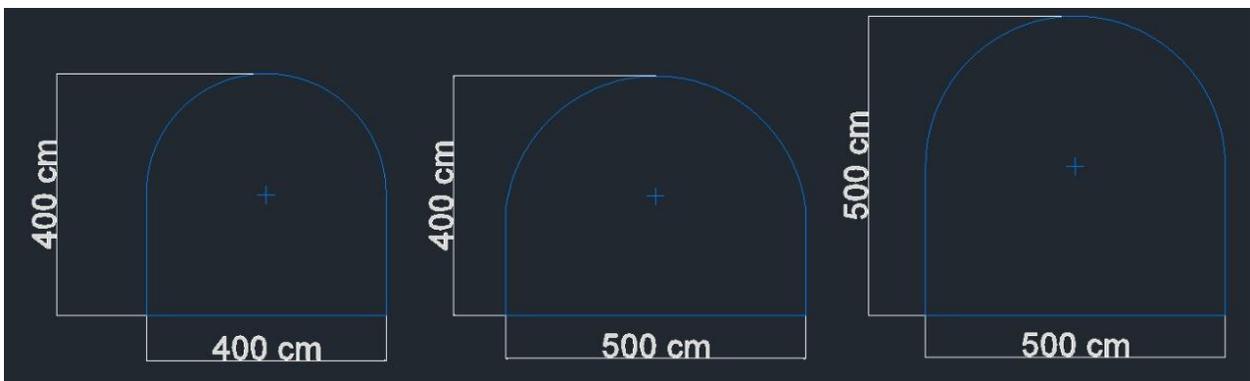


Ilustración 46. Marcaje de perfiles de obra en AutoCAD vista frontal.

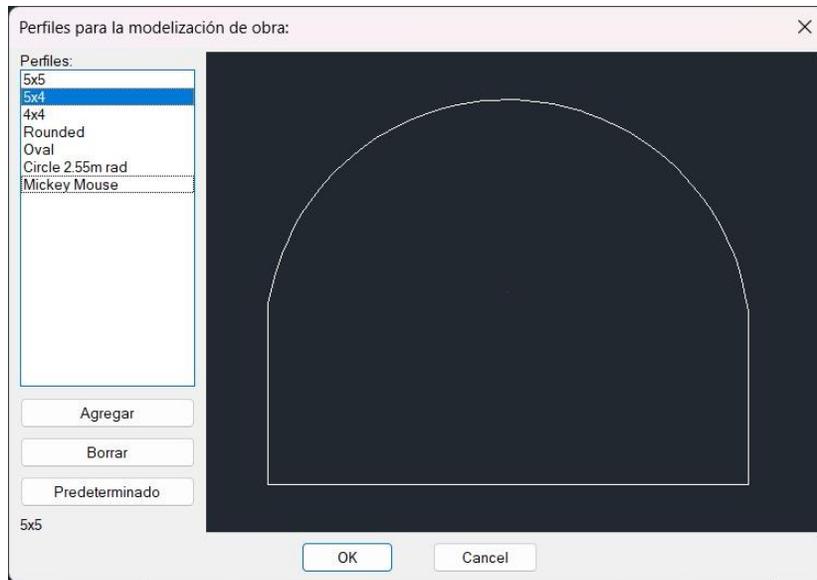


Ilustración 47. Importación de perfiles de obra a PROMINE.

Una vez definidos los perfiles, se procede a marcar los barrenos correspondientes según los cálculos previos. En primer lugar, se indican las posiciones correspondientes. El marcaje de los barrenos puede realizarse mediante dos métodos principales. La primera opción es utilizar la herramienta “Insertar tiros”, la cual permite insertar barrenos con un arreglo rectangular y tres bolillos. La segunda opción consiste en realizar el marcaje manual de la plantilla (Ilustración 48), y los barrenos, para luego guardar la plantilla en el software e insertarla en las obras correspondientes.

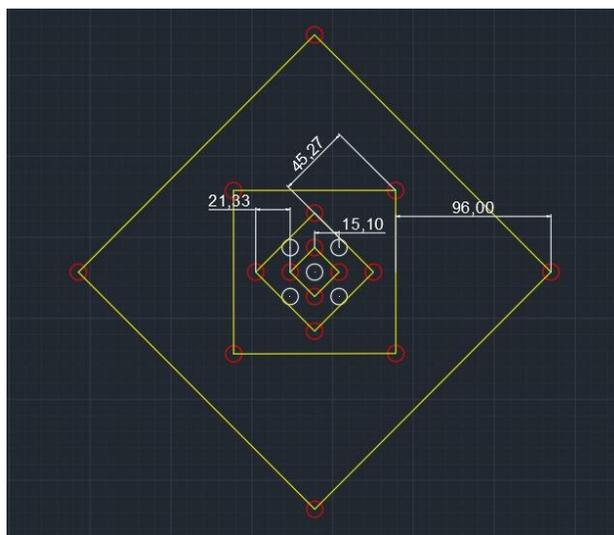


Ilustración 48. Marcaje de cuña en AutoCAD.

Dado que los cálculos no son completamente precisos, existen áreas en las que es probable que se generen sobre tamaños debido al espaciamiento amplio entre barrenos. Por esta razón, se decide colocar barrenos adicionales en dichas zonas. Los barrenos calculados se marcan en colores rojo y blanco (para barrenos de carga y alivio, respectivamente), mientras que los barrenos añadidos por criterio se indican en color verde (Ilustración 49).



Ilustración 49. Marcaje de barrenos en AutoCAD

4.3.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea

El diseño de las plantillas para este módulo puede llevarse a cabo directamente utilizando las herramientas disponibles, a través de dos métodos distintos. El primero consiste en configurar los parámetros necesarios para la voladura, tales como la línea de pivote, el contorno de obra y el contorno de voladura. Luego, se insertan los barrenos, ya sea en disposición de abanico, paralelos o de forma manual, especificando la cantidad de barrenos o el espaciamiento entre ellos (Ilustración 50).

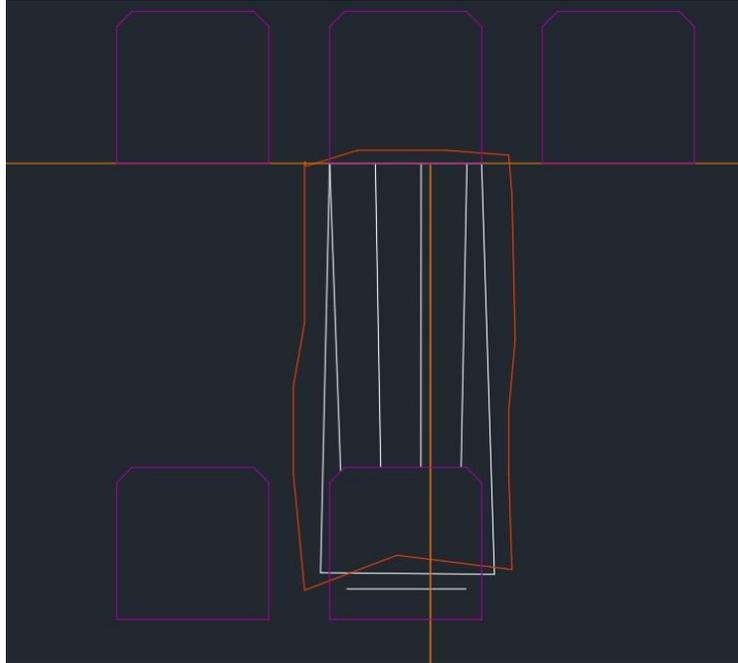


Ilustración 50. Barrenos de producción vista de planta.

El segundo método implica diseñar la plantilla en AutoCAD y exportarla mediante la herramienta "Insertar Plantilla". En este caso, se seleccionan los barrenos y se configuran parámetros como desfase, ángulo y longitud de los barrenos. Una vez guardada la plantilla, se podrá insertar cuantas veces sea necesario (Ilustración 51).

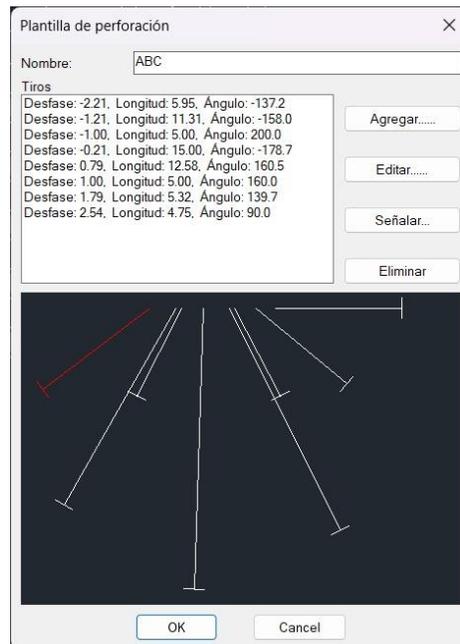


Ilustración 51. Ventana de configuración de plantillas de barrenos de explotación.

Además, este procedimiento puede aplicarse también a los barrenos insertados según el tipo de barrenación seleccionada (horizontal, vertical o abanico). Cualquiera de los dos métodos es igualmente válido.

4.4. Modelado de la plantilla en PROMINE

4.4.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías

Una vez realizados los marcajes, estos se importan utilizando dos opciones disponibles, las cuales se encuentran en la sección donde se configuraron los parámetros de explosivo, diámetro y retardos (Ilustración 52).

Tapón	Plantilla de tiros de galería
Tapón	Plantilla de tiros de galería
Cuña	BARRENOS 4X4
	Barrenos 4x4 Cargados
Agregar	Agregar
Editar	Editar
Borrar	Borrar
Predeterminado	Predeterminado
Cuña	BARRENOS 4X4

Ilustración 52. Ventana de configuración de tapón de perforación (Cuñas) y tiros de galerías.

Si se desea dividir en dos secciones los barrenos de cuña y los auxiliares, es posible hacerlo mediante estas opciones. Alternativamente, se puede cargar toda la plantilla, incluyendo barrenos de tablas, cielo y piso. Ambas opciones son igualmente válidas.

Cada una de estas opciones presenta una ventana para la importación de los barrenos, similar a la observada en el apartado 3.2. Al momento de insertar los barrenos utilizando las herramientas del módulo de Perforación y Voladura de Galerías, solo es necesario ajustar los parámetros correspondientes y proceder con la inserción (Ilustración 53).

Propiedades de tapón

Tapón: BARRENOS 4X4

Inclinación:(%) 0.0

Azimut 0.0

Escala según diámetro

Escala de bloque: 35.00

Velocidad media de perforacion (m/h): 3.00

Costo de perforación (\$/m) 100

OK Cancel

Ilustración 53. Ventana de configuración de la plantilla a insertar.

Una vez insertados los barrenos de perímetro, estos pueden ser ajustados utilizando las herramientas previamente mencionadas o bien con una herramienta específica para este fin (Ilustración 54), en la que solo se deben ingresar los parámetros básicos solicitados por el software. En ambos casos, el resultado final es idéntico (Ilustración 55).

Tiros de perímetro

Diámetro: 45 mm

Longitud: 4.80

Inclinación: 0.00

Ángulo horizontal: 0.00

Utilizar el diámetro para la escala

Escala de bloque 10

Velocidad media de perforacion (m/h) 3

Costo de perforación (\$/m) 100

Insertar polilínea del tiro

Elegir la dirección del tiro

OK Cancel

Ilustración 54. Ventana de configuración de barrenos de perímetro.

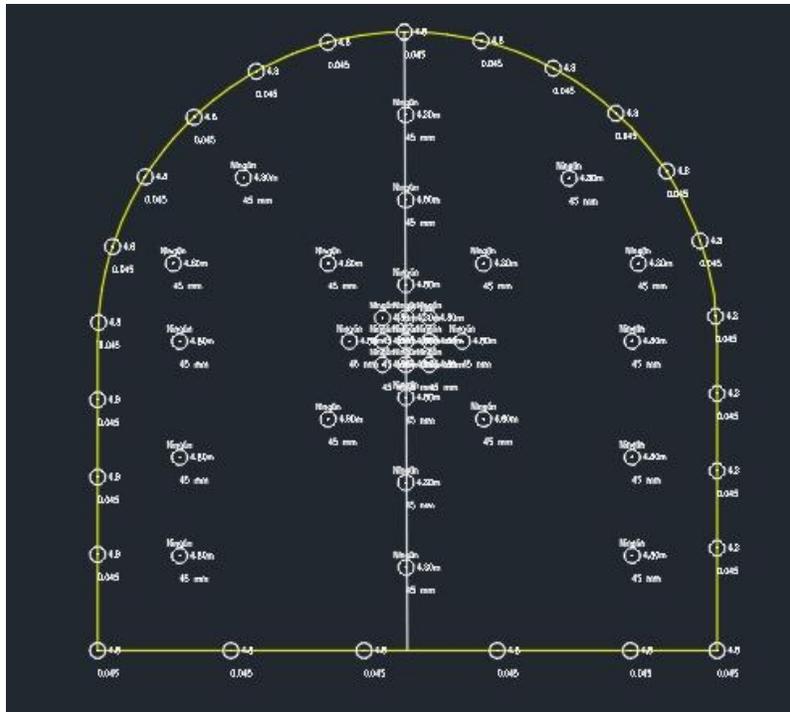


Ilustración 55. Barrenos insertados en un perfil de obra definido con Promine

Si se desea utilizar la herramienta de “Insertar tiros” para la generación de los barrenos únicamente es necesario colocar el tipo de arreglo; tresbolillo o rectangular, su espaciado y su bordo (Ilustración 56). De igual forma es necesario ajustar el diámetro y las dimensiones del barreno. Finalmente, seleccionar el límite de la obra y la dirección de los barrenos y el software generara los barrenos correspondientes (Ilustración 57).

Introducir perforación

Patrón:

Cuadrado

Tresbolillo

Espaciamiento horizontal: 60.00

Espaciamiento vertical: 65.00

Diámetro: 45 mm

Bloque: Círculo

Utilizar el diámetro para la escala

Escala: 10.00

Inclinación: 0.00

Ángulo horizontal: 0.00

Longitud: 4.800

Elegir la dirección del tiro

Velocidad media de perforación (m/h) 1.00

Costo de perforación (\$/m) 0.00

Insertar polilínea del tiro

Agregar una zona neutral

OK Cancel

Ilustración 56. Llenado de herramienta para la generación de barrenos automáticos.

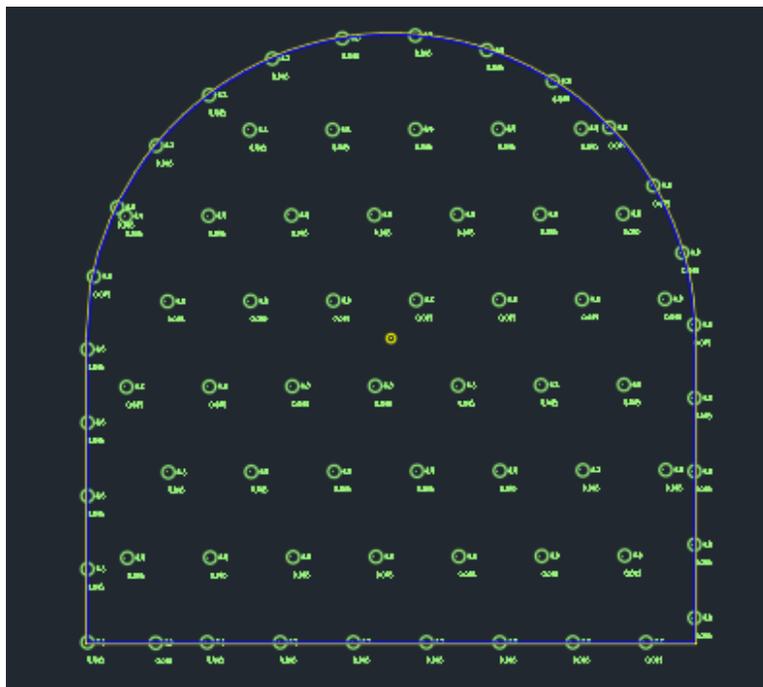


Ilustración 57. Generación de barrenos automáticos.

4.4.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea

El modelado de los barrenos se lleva a cabo de manera similar al diseño de la plantilla, al menos en este módulo. La única diferencia radica en el uso de la herramienta "Insertar Plantilla", en la cual, primero, se define la plantilla a emplear, tal como se describió en el apartado anterior. Luego, se selecciona la plantilla, se guarda y se inserta (Ilustración 58).

Por lo tanto, la inserción de los barrenos de producción puede realizarse tanto de manera manual como automática, quedando esta decisión a consideración de la persona encargada del diseño.

Al igual que en la opción anterior, es necesario configurar los parámetros correspondientes, tales como la línea de pivote, el contorno de la obra y el contorno de la voladura.

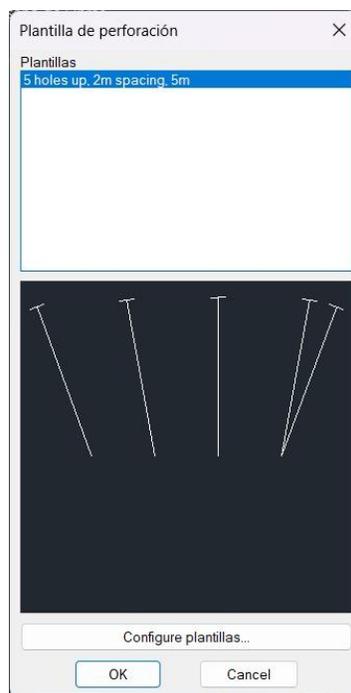


Ilustración 58. Ventana de selección de plantillas guardadas (Promine,2024).

Una vez seleccionada la plantilla a insertar y definidos los parámetros, los barrenos se posicionarán conforme a la configuración previamente establecida, la cual incluye la longitud, el ángulo y el espaciamiento determinados durante el diseño (Ilustración 59). En caso de no contar con una plantilla predefinida y optar por el método automático, se selecciona únicamente la línea de pivote y se especifican el tipo de barrenación (paralela, simétrica o en abanico), la dirección, el ángulo inicial y final, así como si la inserción se realizará mediante espaciamiento o número de barrenos. Es importante destacar que cualquiera de los métodos es completamente válido.



Ilustración 59. Barrenos insertados con el módulo Insertar Plantillas vista lateral.

4.5 Cargado de los barrenos

4.5.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías

El cargado de los barrenos se realiza mediante la herramienta "Cargar Tiros", que se encuentra en el módulo de Perforación y Voladura de Galerías. Para llevar a cabo este proceso, se seleccionan los barrenos que se desean cargar y, en la ventana que abre el programa, se configura el tipo de explosivo y la cantidad, ya sea por peso, cartuchos o metros lineales (Ilustración 60).

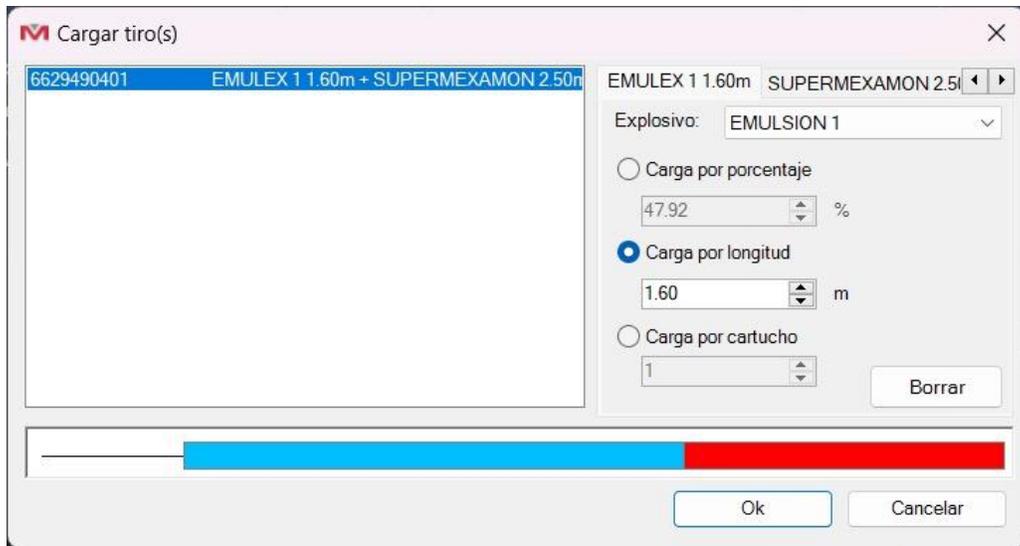


Ilustración 60. Ventana de configuración del cargado de los barrenos.

Una vez cargados todos los barrenos correspondientes, se pueden visualizar modificando la vista, con el fin de observarlos de manera más clara. Asimismo, es posible revisar las cargas de explosivo asignadas a cada barreno (Ilustración 61 y 62).

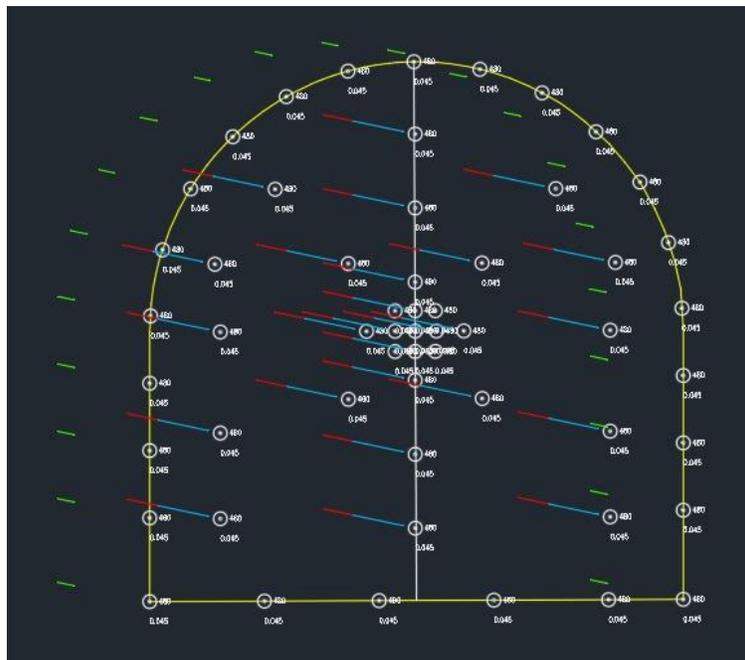


Ilustración 61. Vista lateral de barrenos cargados.

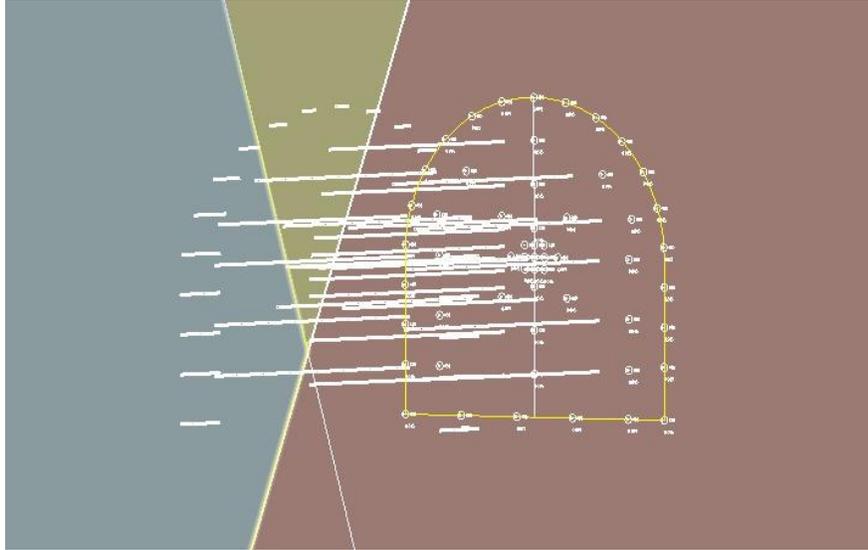


Ilustración 62. Vista lateral 3D de los barrenos cargados.

Finalmente, una vez realizados los cargados, se asigna un retardo a cada barreno mediante la herramienta "Retardos", ya que este módulo permite únicamente la asignación de un único retardo. Para ello, se seleccionan los barrenos a los que se aplicará el retardo correspondiente (Ilustración 63).



Ilustración 63. Ventana de configuración de retardos para barrenos.

4.5.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea

Una vez generados los barrenos correspondientes, se dispone de una herramienta para el cargado de los barrenos dentro de este módulo (Ilustración 64 y 65). Esta herramienta permite seleccionar y configurar los siguientes parámetros:

- Diámetro del barreno
- Longitud del barreno (si se desea modificar)
- Longitud del cuello
- Taco y su longitud
- Explosivos escalonados (si se requieren)
- Explosivo (carga de fondo)
- Iniciadores (posición del iniciador)

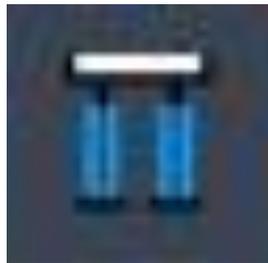


Ilustración 64. Icono para el cargado de barrenos del módulo de Perforación y Voladura Subterránea (Promine,2024).

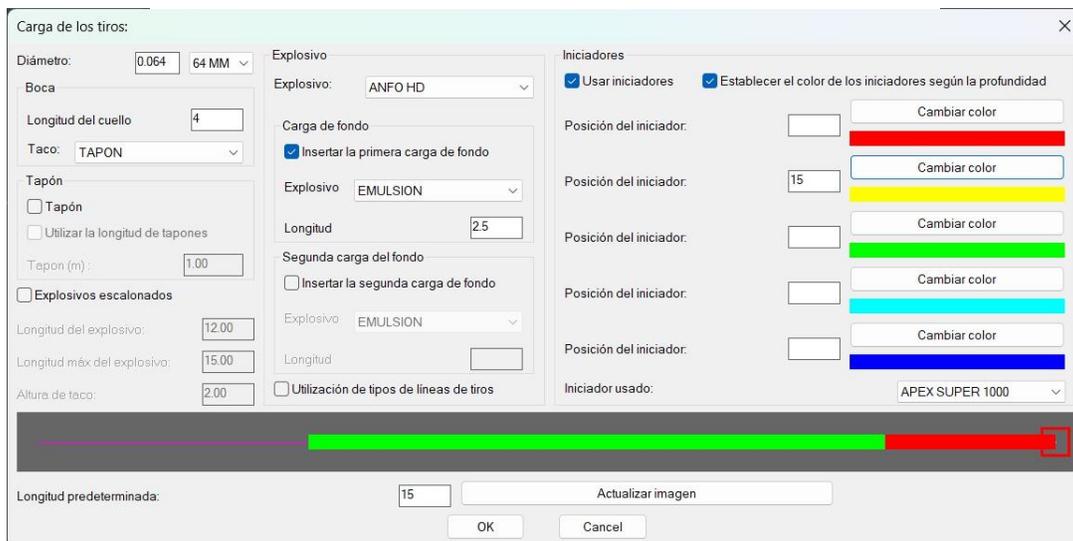
A screenshot of a software window titled "Carga de los tiros:". The window is divided into several sections. On the left, under "Carga de los tiros:", there are fields for "Diámetro:" (0.064, 64 MM), "Boca", "Longitud del cuello" (4), "Taco:" (TAPON), "Tapón" (with checkboxes for "Tapón" and "Utilizar la longitud de tapones"), "Tapon (m):" (1.00), and "Explosivos escalonados" (with checkboxes for "Longitud del explosivo:" (12.00), "Longitud máx del explosivo:" (15.00), and "Altura de taco:" (2.00)). The middle section, "Explosivo", has a dropdown for "Explosivo:" (ANFO HD), a "Carga de fondo" section with a checked "Insertar la primera carga de fondo" and a dropdown for "Explosivo:" (EMULSION) and "Longitud" (25), and a "Segunda carga del fondo" section with an unchecked "Insertar la segunda carga de fondo" and a dropdown for "Explosivo:" (EMULSION) and "Longitud". The right section, "Iniciadores", has checkboxes for "Usar iniciadores" and "Establecer el color de los iniciadores según la profundidad", followed by five rows of "Posición del iniciador:" fields with corresponding "Cambiar color" buttons and colored bars (red, yellow, green, cyan, blue). At the bottom, there is a "Longitud predeterminada:" field (15), an "Actualizar imagen" button, and "OK" and "Cancel" buttons. A preview bar at the bottom shows a green bar followed by a red bar.

Ilustración 65. Ventana de cargado de barrenos (Promine, 2024).

Al configurar estos parámetros, las modificaciones se aplicarán a todos los barrenos generados (Ilustración 66). En caso de que sea necesario modificar un barreno en particular, también existe una herramienta específica para ello dentro del módulo (Ilustración 67), que mostrará la configuración del barreno seleccionado (Ilustración 68).

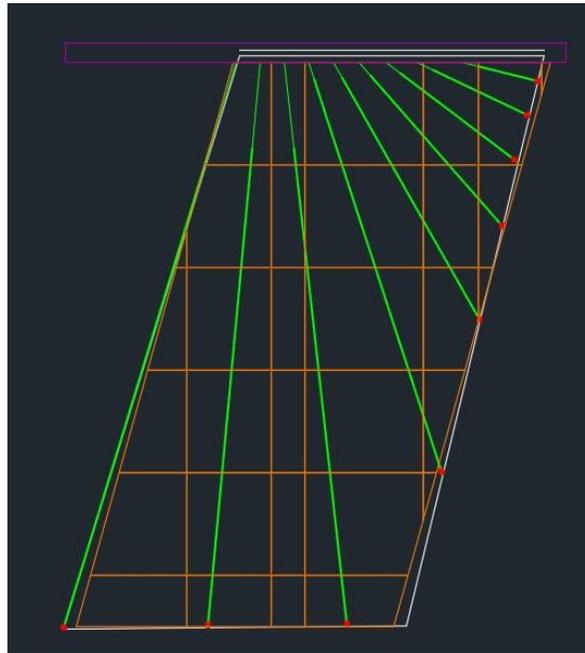


Ilustración 66. Barrenos cargados con iniciador vista lateral.



Ilustración 67. Icono para edición de la carga presente en uno o varios barrenos (Promine,2024).

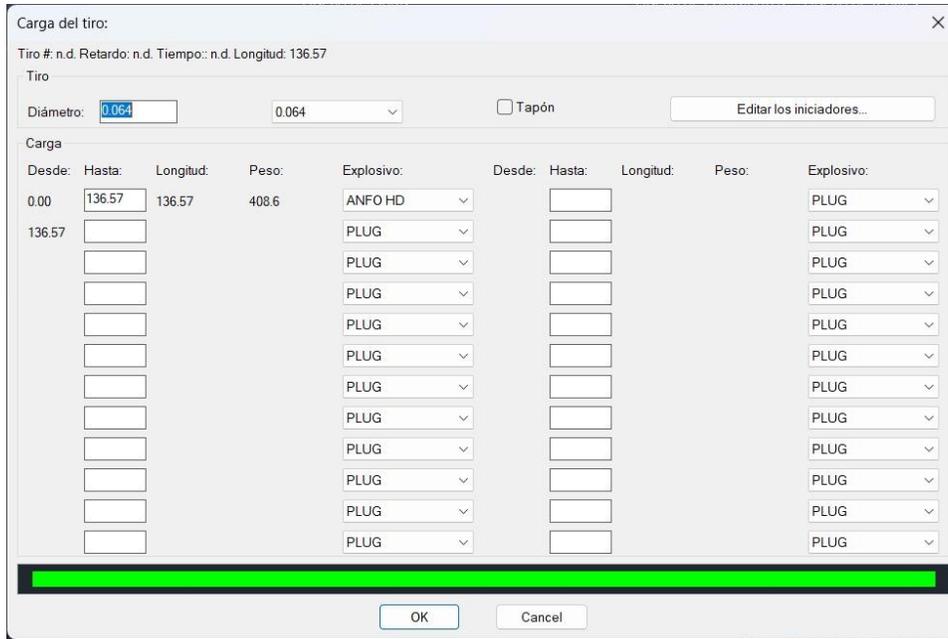


Ilustración 68. Ventana de edición de la carga de los barrenos seleccionados (Promine,2024).

4.6 Análisis de la plantilla

4.6.1 Módulo de Perforación y Voladura en Galerías

Una vez generada la plantilla, es posible obtener distintos tipos de datos, siendo el principal la generación del reporte. Este reporte puede modificarse añadiendo o eliminando parámetros disponibles dentro del software (Ilustración 69).

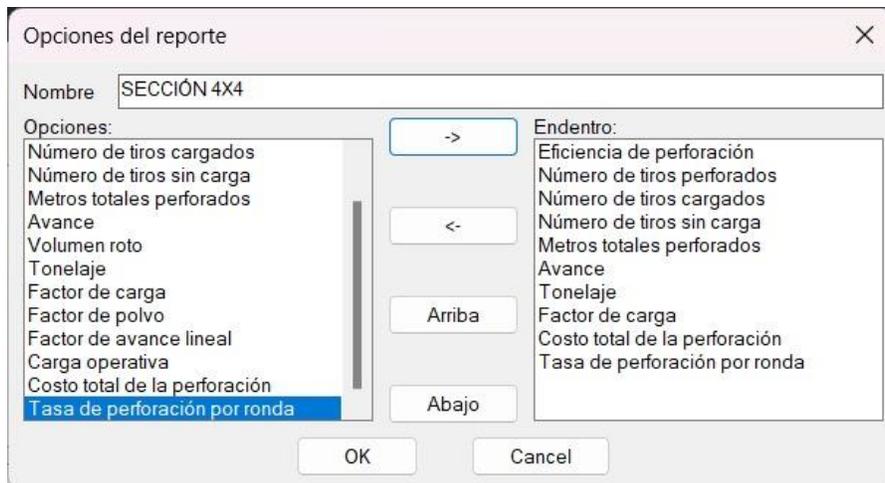


Ilustración 69. Ventana de configuración de reporte (Promine, 2024).

Para insertar el reporte, se utiliza la herramienta "Reporte", se selecciona el reporte previamente configurado y luego se eligen los barrenos correspondientes. Finalmente, se coloca el reporte en la zona deseada (Ilustración 70).

SECCIÓN 4X4		
Eficiencia de perforación (%)	%	81.3
Número de tiros perforados	Unidades	57
Número de tiros cargados	Unidades	52
Número de tiros sin carga	Unidades	5
Metros totales perforados	m	273.60
Avance	m	370.50
Tonelaje	tons	131.04
Factor de potencia	kg/t	0.44
Costo total de la perforación	\$	27360.00
Tasa de perforación por ronda	horas	91.20

Ilustración 70. Ejemplo de reporte generado.

Además de la generación de reportes, el módulo permite obtener otros tipos de datos, tales como:

- Análisis de energía
- Contorno de tiempos

El análisis de energía, como su nombre indica, permite evaluar la energía liberada por cada uno de los barrenos cargados. El software presenta un diagrama de colores que indica la cantidad de energía presente en cada área. El color morado representa la mayor concentración de energía, seguido por el rojo, verde, amarillo, cian, azul rey y gris. Estos colores se asignan con base en la escala de energía generada por la voladura, considerando el tipo de explosivo seleccionado, su área de influencia, la distribución de los barrenos y la densidad de la roca. Los rangos de energía son calculados automáticamente por el software, si se desea, también muestra la cantidad de energía expresada en mega julios (MJ) (véase Ilustración 71).



Ilustración 71. Análisis de energía vista frontal.

Por su parte, el contorno de tiempos es una herramienta que permite visualizar la secuencia de detonación de la voladura. Esta herramienta facilita la modificación de la secuencia, si es necesario, y permite observar la dirección hacia la cual se prevé que se desplace el material.

El contorno de tiempos también se puede configurar para asignar intervalos de retardos, los cuales se pueden estimar y colorear de acuerdo con cada intervalo. De esta manera, los retardos con el mismo intervalo generarán un contorno común, indicando que serán detonados simultáneamente (Ilustración 72 y 73).

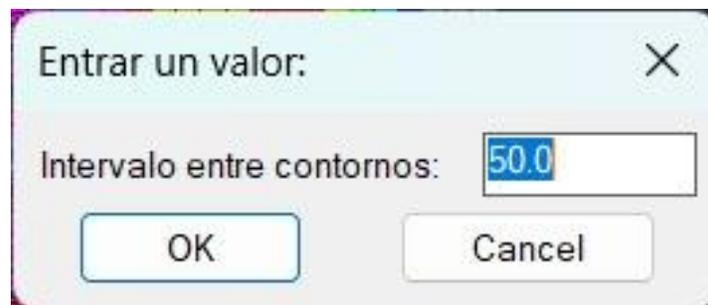


Ilustración 72. Ventana de configuración de intervalo entre contornos.

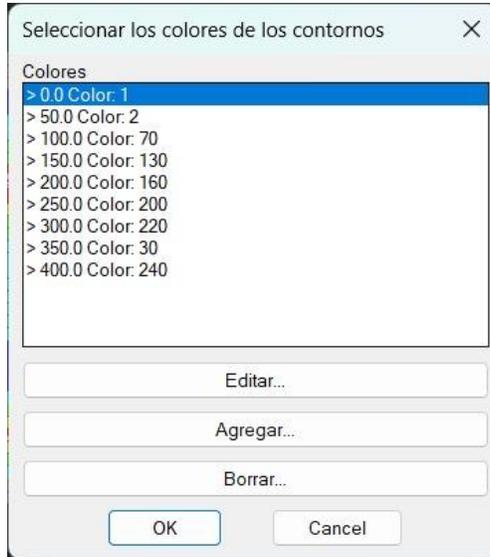


Ilustración 73. Ventana de configuración de colores de contornos.

Si se desea, también se puede utilizar la herramienta "Cuadrículas", ubicada en el módulo "Esenciales", para generar un ploteo que puede ser incorporado en informes o presentaciones (Ilustración 74).

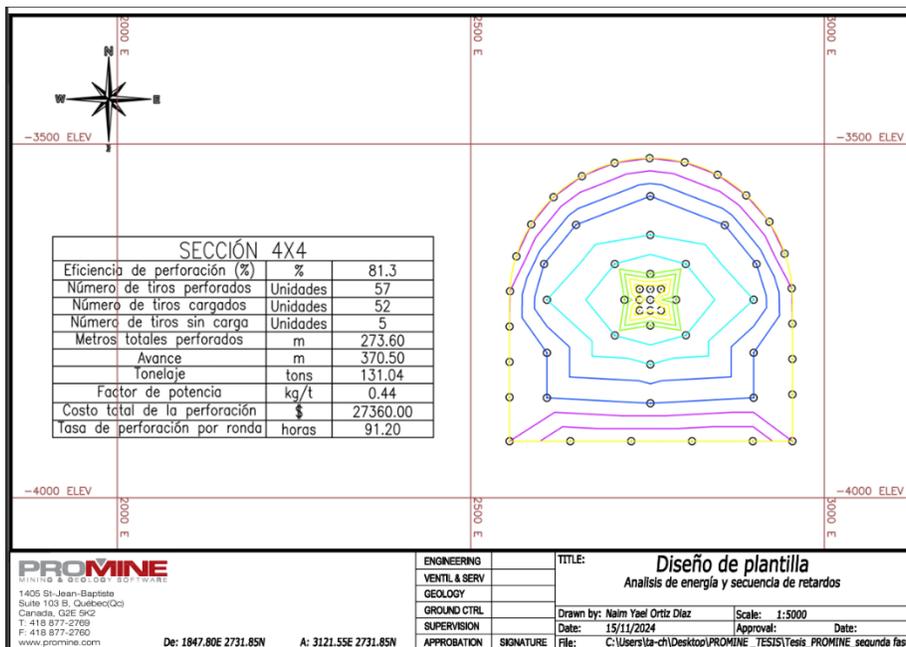


Ilustración 74. Ploteo generado en PROMINE con contorno de tiempos y reporte de la plantilla.

4.6.2 Módulo de Perforación y Voladura Subterránea

Al igual que en el módulo para galerías, en este módulo también es posible generar reportes de las voladuras planeadas y realizar comparaciones con los resultados obtenidos en campo. El módulo enfocado en la producción ofrece reportes con un mayor número de variables que pueden ser añadidas, así como un reporte resumido y otras herramientas que proporcionan valores clave para el análisis de una voladura y para verificar si los resultados son los esperados.

La herramienta principal para generar los reportes es "Insertar Reportes", la cual debe configurarse previamente, como se describió en un apartado anterior. Una vez configurado, se selecciona el reporte deseado, se eligen los barrenos que se desean incluir y se coloca el reporte en la zona correspondiente. Esta herramienta es fundamental, ya que permite añadir una gran cantidad de variables (más de 50) al reporte, con el objetivo de incluir toda la información necesaria y relevante sobre los barrenos generados (Ilustración 75). A continuación, se enlistan las que a criterio propio se consideran de las más relevantes:

- Número
- Ruptura
- Diámetro
- Longitud
- Explosivo
- Peso del explosivo
- Tapón
- Tiempo de retardo

VOL									
Tiro	Tiro	Diam.	Long.	Longitud	Retardo	Deto	Tipo	Tapón	Expl.
Num.	Abierto		(m)	perforada			de		Kg
A		64 MM	5.3			1	ANFO HD	0	12
		64 MM					EMULSION	1	3
A		64 MM	12.6				ANFO HD	0	27
		64 MM					EMULSION	0	6
A		64 MM	15.0				ANFO HD	0	34
		64 MM					EMULSION	0	6
A		64 MM	11.3				ANFO HD	0	22
		64 MM					EMULSION	0	7
A		64 MM	5.9			1	ANFO HD	0	13
		64 MM					EMULSION	0	4

Ilustración 75. Ejemplo de reporte generado.

Además del informe general, existen los resúmenes de voladura, que contienen una cantidad más reducida de datos, pero no por ello menos relevantes. Estos reportes recogen los datos básicos y fundamentales de una voladura. Dentro de este módulo se encuentran dos tipos de resúmenes:

Resumen basado en una sección: Este tipo de resumen se genera seleccionando los barrenos y el contorno de voladura específicos para realizar el resumen (Ilustración 76). A diferencia del reporte general, este resumen no es global y solo incluye los barrenos seleccionados.

Resumen		
Tonelaje – EXPLOTACION_2_CORTES	tons	599
Tonelaje total	tons	599
Longitud total de los tiros	m	50.2
Explosivo – ANFO HD	kg	109.2
Explosivo – EMULSION	kg	26.8
Peso total del explosivo	kg	136.0
Taco – TAPON	kg	23
Densidad de la roca	kg/m ³	3.20
Factor de carga	kg/t	0.227

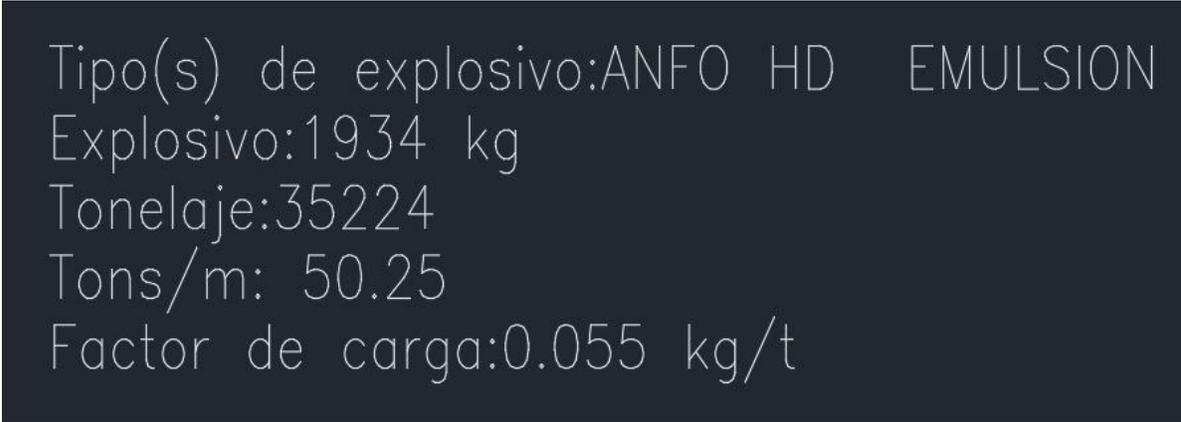
Ilustración 76. Ejemplo de resumen de reporte de una sección.

Resumen de costos de la voladura: Este reporte presenta datos básicos como la longitud, el taco y el explosivo, pero su principal objetivo es proporcionar un resumen de los costos involucrados en la voladura (Ilustración 77), expresados en dólares.

Resumen de voladura	
Longitud de perforación:	50
Explosivo:	136
Taco:	23
\$ Costo de perforación:	502
\$ Costo de cargado:	5015
\$ Costo del explosivo:	136
\$ Costo de taco:	23
Total (\$):	5675

Ilustración 77. Ejemplo de resumen de costos de voladura.

Otro tipo de reporte disponible en este módulo es el "**Factor de carga**", que, aunque también puede añadirse al reporte general, cuenta con una herramienta específica que facilita la obtención de este valor sin necesidad de configurar la plantilla y sin ocupar tanto espacio en el reporte (Ilustración 78).



```
Tipo(s) de explosivo: ANFO HD EMULSION
Explosivo: 1934 kg
Tonelaje: 35224
Tons/m: 50.25
Factor de carga: 0.055 kg/t
```

Ilustración 78. Ejemplo de factor de carga.

Además, al igual que en el módulo para galerías, este módulo permite realizar un análisis de energía para evaluar el radio de influencia de los explosivos utilizados (Ilustración 79). Este análisis es útil para determinar si la voladura generará un exceso de finos y una onda explosiva que pueda afectar las zonas cercanas, o si, por el contrario, se generarán excesos de sobretamaños que podrían incrementar los costos de producción. En este caso, el rango de colores va desde el rojo (siendo el más alto), seguido del naranja, amarillo y verde. Este análisis contempla las dimensiones volumétricas de la zona donde se realizará la voladura, la volumetría del explosivo y el confinamiento de la roca. Por ello, los rangos varían en comparación con el análisis de energía del módulo de galerías. Además, es posible modificar los colores y sus respectivos rangos utilizando esta misma herramienta; sin embargo, el análisis y los valores generados son calculados automáticamente por Promine.

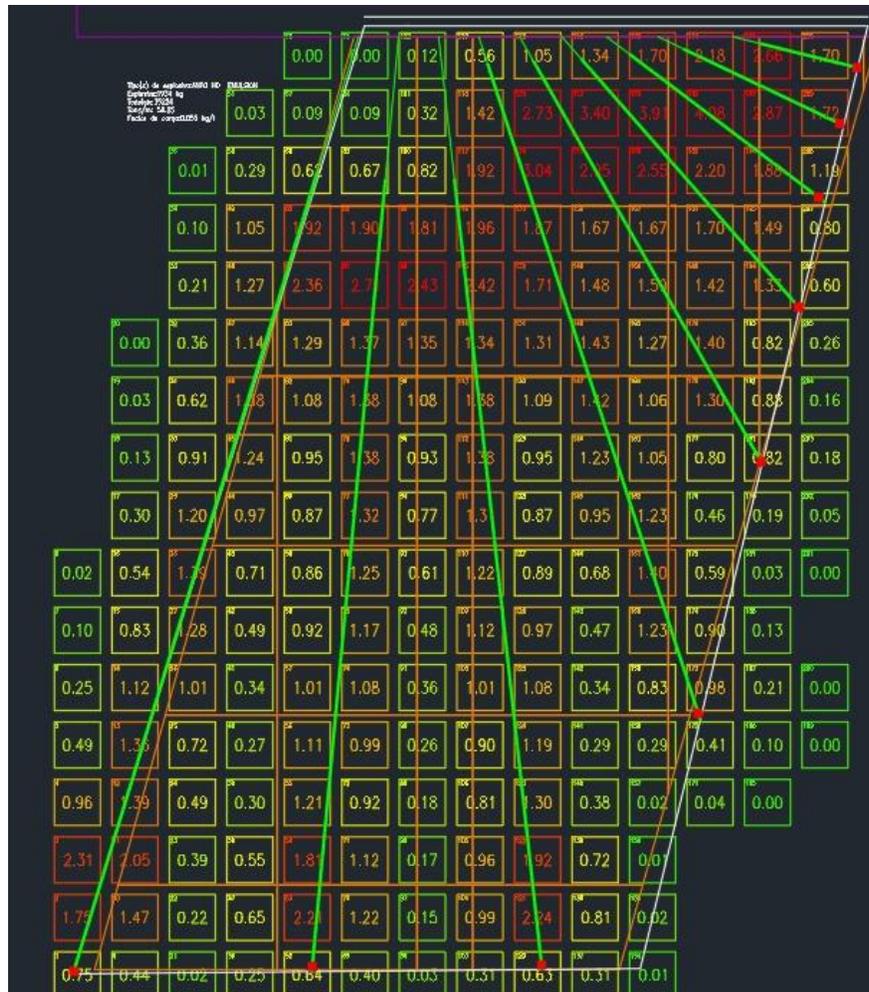


Ilustración 79. Análisis de energía de barrenos de producción.

4.7 Modificación de la plantilla

4.7.1 Generalidades

Si, al ejecutar la plantilla generada en el software, los resultados obtenidos no son los esperados, será necesario modificar la plantilla con base en la información adicional recabada en campo, utilizando las herramientas previamente explicadas en este trabajo.

La modificación de las plantillas depende en gran medida de la experiencia de la persona encargada de elaborarlas y supervisar su correcta ejecución. Posteriormente, se llevará a cabo un análisis y ajuste con el fin de optimizar los resultados.

5. Aplicación de la metodología del diseño

Se planea iniciar la explotación de un nuevo cuerpo mineral cuyos contenidos han sido confirmados por el Departamento de Geología. Para este propósito, se prevé implementar el método de corte y relleno. En este contexto, el equipo del Departamento de Mina requiere el diseño de la plantilla de barrenación y voladura tanto para las obras de desarrollo como para las obras de producción.

Adicionalmente, la Dirección de Operaciones ha solicitado la justificación técnica para los siguientes puntos:

1. **Selección del explosivo**
2. **Distribución de los barrenos**
3. **Costos asociados**

Cabe destacar que las características geomecánicas a considerar son las siguientes:

- **Roca estéril:** Densidad de 2.4 kg/m³, resistencia a la compresión simple (RCS) de 60 MPa y calidad de roca (RQD) del 65%.
- **Roca mineralizada:** Densidad de 3.0 kg/m³, resistencia a la compresión simple (RCS) de 110 MPa y calidad de roca (RQD) del 83%.

Lo anterior, se trata de un caso hipotético por lo que aquellos parámetros que no se mencionaron en el enunciado se asumirán.

5.1 Obras de desarrollo

Para el diseño de la plantilla de barrenación y voladura en las obras de desarrollo, estas se ejecutan utilizando un equipo Jumbo. Por lo tanto, es necesario definir el equipo que se empleará para llevar a cabo dichas actividades.

5.1.1 Selección de Equipo

En el mercado existe una amplia variedad de marcas y modelos de equipos Jumbo, por lo que la selección debe basarse en las necesidades específicas de cada operación. En este caso hipotético, se ha optado por seleccionar el equipo **Boomer T1** de la marca **Epiroc** (Ilustración 81), considerando sus características técnicas y su capacidad para adaptarse a los requerimientos operativos de este caso.



Ilustración 81. Equipo Bommer T1 (Epiroc,2025).

Posteriormente, es necesario definir el diámetro de barrenación que se utilizará tanto para los barrenos cargados como para los de alivio. Además, es fundamental establecer la sección transversal de la obra a ejecutar.

Los diámetros mínimos de las brocas compatibles con el equipo seleccionado se encuentran especificados en la ficha técnica correspondiente (Tabla 1). Esta información será clave para garantizar la eficiencia operativa y la compatibilidad del diseño con las características del equipo.

Cabe destacar que la selección del diámetro de la broca de barrenación y la broca de escariado se deben de realizar con base a las características propias de la roca y de cada operación, además de que toda la información de las herramientas compatibles con los equipos que se seleccionen viene detallada en las fichas técnicas de los mismos.

Tabla 1. Diámetro de broca para el equipo Boomer T1 (Epiroc, 2025).

Barras de perforación	
Dimensiones	Diámetro mínimo de broca
R38-H35-R32	45 mm
R38-H35-SR35 speedrod	45 mm
T38-H35-R32	45 mm
T38-H35-R32 speedrod	45 mm
T38-H35-SR35	45 mm
T38-H35-R35	48 mm
T38-H35-R35 speedrod	48 mm
T38-R39-R35	48 mm
T38-R39-SR35	45 mm
T38-R38-R35	48 mm

Por lo tanto, se empleará un diámetro de barrenación de 45 mm para los barrenos de producción y una broca escariadora de 76 mm para los barrenos de alivio. Asimismo, se utilizará una barra de 16 ft (4.8 m).

5.1.2 Parámetros de la roca

La determinación de las dimensiones de la obra está sujeta a varias consideraciones. Para este caso hipotético, se tomarán en cuenta dos factores principales:

- **Calidad de la roca**
- **Dimensiones de los equipos**

En cuanto a la calidad de la roca, se describe que la roca estéril presenta una densidad de 2.4 kg/m³, una resistencia a la compresión simple (RCS) de 60 MPa y un índice de calidad de la roca (RQD) del 65%. Según la clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas y basada en su resistencia a la compresión simple (Tabla 2), esta información permitirá determinar las características estructurales y de estabilidad de la obra.

Tabla 2. Clasificación de la roca con base a su resistencia a la compresión simple (Ramírez p. Alejano, L. 2004).

Resistencia (MPa)	Clasificación
>250	Extremadamente alta
100-250	Muy alta
50-100	Alta
25-50	Media
5-25	Baja
1-5	Muy baja
0.25-1	Extremadamente baja

La roca, en este caso, se clasifica como de alta resistencia de acuerdo con su resistencia a la compresión simple (RCS).

El segundo parámetro proporcionado es el índice de calidad de la roca (RQD), que para la roca estéril es del 65%. Según la clasificación presentada en la Tabla 3, este valor corresponde a una categoría de calidad **regular**.

Tabla 3. Clasificación de la calidad de roca con base al RQD (Bongiorno, F. s.f.).

Índice de Calidad R.Q.D. (%)	Calidad
0 - 25	Muy mala
25 - 50	Mala
50 - 75	Regular
75 - 90	Buena
90 - 100	Excelente

Cabe mencionar que existen pruebas de laboratorio que permiten medir las propiedades mecánicas de la roca con mayor precisión, proporcionando valores más confiables para su clasificación y permitiendo realizar un estudio técnico más detallado. No obstante, al tratarse de un caso hipotético, se trabajará únicamente con las variables disponibles.

Con base en estos datos, se puede inferir que la roca se clasifica entre **regular a buena**, lo que justifica la elección de una sección de obra de 5 m x 5 m. Es importante señalar que, en algunas zonas, podría ser necesario implementar fortificación dependiendo de las condiciones geomecánicas locales.

5.1.3 Selección del tipo de explosivo

Antes de calcular la plantilla, es necesario seleccionar el tipo de explosivo a utilizar como carga de fondo y carga de columna, ya que la densidad del explosivo es un parámetro indispensable para aplicar la fórmula con base en la Ilustración 82, se seleccionará el **ANFO** como explosivo para la carga de columna, considerando que la roca estéril presenta un **RCS de 60 MPa** y un **RQD de 65%**, lo cual sugiere un espaciamiento medio entre fracturas.

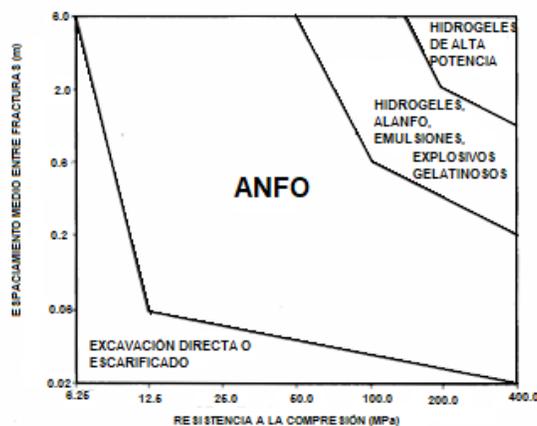


Ilustración 82. Selección del explosivo con base a las propiedades geomecánicas de la roca (IGME, 1994).

Para la carga de fondo, se empleará **Emulex 1**, una emulsión distribuida por la empresa Austin Powder. Entre los diámetros disponibles, se seleccionará aquel que mejor se ajuste al diámetro de barrenación definido (45 mm). En este caso, se utilizará el modelo de **1 ½" x 16"** (38 mm x 400 mm). Las especificaciones de este explosivo se obtuvieron de su ficha técnica (Tabla 4). Dado que el explosivo presenta densidades variables, se utilizará la densidad media para los cálculos posteriores.

Tabla 4. Propiedades del explosivo Emulex 1 (Austin Powder, 2025)

Propiedades	Valores
Densidad [g/cc]	1.12 (Ø < 50 mm / 2 pulg.) 1.16 (Ø < 50 mm / 2 pulg.)
Volumen de gases [l/kg]	1,023
Fuerza relativa a peso [ANFO = 100]	86
Fuerza relativa a volumen [ANFO = 0.82 g/cm ³]	118
Categoría de humos	1
Velocidad de detonación [ft/s]	16,400
Velocidad de detonación [m/s]	5,000

Para los barrenos de contorno se seleccionará **Emulex C**, otro explosivo distribuido por Austin Powder, cuyas propiedades también se obtuvieron de su ficha técnica (Tabla 5). Este explosivo se adaptará a las necesidades específicas de los barrenos de contorno y techo, asegurando un adecuado control en el diseño y la ejecución.

Tabla 5. Propiedades del Emulex C (Austin Powder, 2025).

Propiedades	Valores
Densidad [g/cc]	0.85
Volumen de gases [l/kg]	1,051
Fuerza relativa a peso [ANFO = 100]	82
Fuerza relativa a volumen [ANFO = 0.82 g/cm ³]	85
Categoría de humos	1
Presión de detonación [kb] [ft/s]	12,959
Presión de detonación [kb] [m/s]	3,950

Las propiedades para el ANFO se obtuvieron de igual forma de la ficha técnica proporcionada por Austin Powder (Tabla 6)

Tabla 6. Propiedades del ANFO (Austin Powder, 2025).

Propiedades	Valores
Densidad [g/cc]	0.56
Densidad en sistema de carga neumática @ 70 - 80 psi [g/cc]	0.65
Volumen de gases [l/kg]	1,073
Fuerza relativa a peso [ANFO = 100]	96
Fuerza relativa a volumen [ANFO = 0.82 g/cm ³]	66
Categoría de humos	1
Presión de detonación (confinada) [ft/s]	>9,842
Presión de detonación (confinada) [m/s]	>3,000

5.1.4 Diseño de la plantilla

5.1.4.1 Cuña y barrenos auxiliares

Una vez establecidos estos parámetros preliminares, se procede a calcular los valores específicos para el diseño de la plantilla de barrenación. La cuña seleccionada para este diseño se muestra en la Ilustración 83. Existen múltiples configuraciones de cuñas disponibles, y la elección de una distinta o la experimentación con nuevas configuraciones dependerá de la persona encargada del diseño y las necesidades operativas específicas.

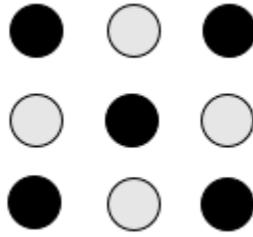


Ilustración 83. Cuña quemada (EXSA, 2008).

Para los cálculos preliminares, se emplearán las fórmulas propuestas por **Konya** y el **Manual Práctico de Voladura de EXSA**.

Cálculo del diámetro equivalente de los barrenos de alivio

Para determinar el diámetro equivalente de los barrenos de alivio, se aplicará la fórmula propuesta por **Konya**. Esta fórmula permite calcular el diámetro efectivo en función de las condiciones específicas del diseño.

$$D_H = d_H \sqrt{N}$$

Donde:

D_H : Diámetro equivalente de un sólo barreno (mm)

d_H : Diámetro de barrenos vacíos (mm)

N : Número de barrenos vacíos

Formula 1: Para el diámetro equivalente de un barreno vacío (Konya y Albarrán, 1998).

$$D_H = 76mm \times \sqrt{4}$$

$$D_H = 152 \text{ mm}$$

$$D_H = 0.152 \text{ m}$$

Cálculo para los cuadrantes de la cuña

Con base en el diámetro equivalente calculado en el paso anterior, se procederá a realizar los cálculos correspondientes para los cuadrantes de la cuña. Este análisis se fundamentará en el cuadro presentado en la Tabla 7 y el resultado obtenido se observa en la Tabla 8.

Tabla 7. Transcripción del cuadrado para el cálculo simplificado de cuadrantes (Konya y Albarrán, 1998).

Cálculo de cuadrantes de la plantilla				
Cuadro No	1	2	3	4
B	1.50 D_H	2.12 D_H	4.50 D_H	9.54 D_H
R	1.50 D_H	3.18 D_H	6.75 D_H	14.31 D_H
Sc	2.12 D_H	4.50 D_H	9.54 D_H	20.23 D_H
T	1.50 D_H	1.06 D_H	2.25 D_H	4.77 D_H
REVISAR	$S_c \geq \sqrt{L}$	$S_c \geq \sqrt{L}$	$S_c \geq \sqrt{L}$	$S_c \geq \sqrt{L}$

Tabla 8. Cálculo de cuadrantes para la plantilla de obras de desarrollo.

Cálculo de cuadrantes de la plantilla				
Cuadro	1	2	3	4
B	0.228m	0.322m	0.684m	1.45m
R	0.228m	0.483m	1.026m	2.175m
Sc	0.322m	0.684m	1.45m	3.074m
T	0.228m	0.161m	0.342m	0.725m

Determinación de la barrenación efectiva y cálculo del avance efectivo de la voladura

La profundidad de los barrenos se establecerá considerando las dimensiones y parámetros del diseño. Además, se calculará el avance efectivo de la voladura, el cual corresponde al 95% de la barrenación efectiva. Para ello, se utilizarán las fórmulas presentadas a continuación, asegurando la precisión requerida para el diseño de la plantilla.

$$H = \frac{D_H + 16.51}{41.67}$$

Donde:

H: Profundidad (m)

D_H : Diámetro de Barreno (mm)

Fórmula 2. Para la estimación de la profundidad del barreno (Konya y Albarrán, 1998).

$$L = 0.95H$$

Fórmula 3. Para la estimación del avance esperado (Konya y Albarrán, 1998).

$$H = \frac{152\text{mm} + 16.51}{41.67}$$

$$H = 4.04 \text{ m}$$

$$L = 0.95 \times 4.04 \text{ m}$$

$$L = 3.84 \text{ m}$$

Cálculo del bordo y espaciamiento de los barrenos auxiliares

Para determinar el bordo y el espaciamiento de los barrenos auxiliares, así como los de piso, tablas y techo, se empleará la siguiente fórmula

$$B = 0.012 \left(\frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) D_e$$

Donde:

B = Bordo

SG_e = Densidad del explosivo $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$

SG_r = Densidad de la roca $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)$

D_e = Diámetro del explosivo (mm)

Fórmula 4. Para el cálculo del bordo de los barrenos auxiliares, piso, tablas y techo (Konya y Albarrán, 1998).

Para los barrenos auxiliares, el bordo se calculará según la fórmula mostrada anteriormente. El espaciamiento y el taco se determinarán empleando las siguientes formulas.

$$S = 1.1 B$$

$$T = 0.5 B$$

Fórmula 5. Para el cálculo de espaciamiento y taco en barrenos auxiliares. (Konya y Albarrán, 1998).

Los valores obtenidos son los siguientes:

$$B = 0.012 \left(\frac{2 \left(1.14 \frac{g}{cm^3} \right)}{2.4 \frac{g}{cm^3}} + 1.5 \right) 38mm$$

$$\mathbf{B = 1.12 m}$$

$$S = 1.1 (1.12 m)$$

$$\mathbf{S = 1.23 m}$$

$$T = 0.5 (1.12 m)$$

$$\mathbf{T = 0.56 m}$$

5.1.4.2 Barrenos de tablas y techo

Para los barrenos de tablas y techo. El espaciamiento se calculará de manera similar, mientras que el taco será igual a la dimensión del bordo.

Los valores obtenidos son los siguientes:

$$B = 0.012 \left(\frac{2 \left(0.85 \frac{g}{cm^3} \right)}{2.4 \frac{g}{cm^3}} + 1.5 \right) 25mm$$

$$\mathbf{B = 0.66 m}$$

$$S = 1.1 x 0.66 m$$

$$\mathbf{S = 0.73 m}$$

$$T = B$$

$$\mathbf{T = 0.66 m}$$

5.1.4.3 Barrenos de piso

Para los barrenos de piso, el bordo y el espaciamiento son iguales, pero en la fórmula del taco el valor cambia de 0.5 a 0.2, arrojando los siguientes resultados:

$$B = 0.012 \left(\frac{2 \left(1.14 \frac{g}{cm^3} \right)}{2.4 \frac{g}{cm^3}} + 1.5 \right) 38mm$$

$$B = 1.12 \text{ m}$$

$$S = 1.1 (1.12 \text{ m})$$

$$S = 1.23 \text{ m}$$

$$T = 0.2 (1.12 \text{ m})$$

$$T = 0.224 \text{ m}$$

5.1.4.4 Cálculo del número total de barrenos

El cálculo del número de barrenos se realizará empleando la fórmula propuesta por EXSA.

$$N^{\circ}tal = 10 \times \sqrt{A \times H}$$

Donde:

A : Ancho de túnel

H: Altura de túnel

Fórmula 6. Para la estimación del número de barrenos (EXSA, 2008).

El resultado obtenido para este caso es el siguiente:

$$N \text{ de barrenos} = 10 \times \sqrt{5 \times 5}$$

$$N \text{ de barrenos} = 50$$

5.1.5 Estimación de la carga de columna y la carga de fondo

Para los barrenos auxiliares y de piso, se utilizará una emulsión de 1 ½" x 16" (Emulex 1) para la carga de fondo, mientras que el resto del barreno será cargado con ANFO. En el caso de los barrenos de contorno y techo, se utilizará únicamente Emulex C.

La cantidad de explosivo requerida se estimará con base en los parámetros previamente calculados.

Para los barrenos de contorno y techo, se cargarán con **Emulex C** exclusivamente. Cada cartucho tiene una longitud de 1.0 m (Tabla 9). La cantidad de cartuchos por barreno se obtiene restando el taco calculado a la profundidad calculada del barreno:

Tabla 9. Dimensiones del explosivo y peso por cartucho Emulex C (Austin Powder, 2025).

Tipo de cartucho	Tamaño de cartucho unidad individual		Peso de cartucho		Cartuchos por caja
	[pulgadas]	[mm]	[lb]	[kg]	
Película plástica	1 x 39	25 x 1000	1.058 - 0.965	0.480 - 0.438	55 lb/25kg 52 - 57

$$Cantidad\ de\ cartuchos = \frac{H - T}{L_{explosivo}}$$

$$Cantidad\ de\ cartuchos = \frac{4.04\ m - 0.66m}{1.0\ m}$$

$$Cantidad\ de\ cartuchos = 3.38 \sim 3$$

Para los barrenos auxiliares y de piso, se cargará cada barreno con un cartucho de **Emulex 1**, cuya longitud es de 0.4 m (Tabla 10). El resto del barreno será cargado con ANFO.

Tabla 10. Dimensiones del explosivo y peso por cartucho (Austin Powder, 2025).

Tipo de cartucho	Tamaño de cartucho		Peso de cartucho		Cartuchos por cajas
	[in]	[mm]	[lb]	[kg]	55 lb/25kg
Película plástica	1 x 8	25 x 200	0.271 – 0.255	0.123 – 0.116	203 – 215
	1 x 16	25 x 400	0.540 – 0.511	0.245 – 0.232	102 – 108
	1 x 39	25 x 1000	1.311 – 1.252	0.595 – 0.568	42 – 44
	1 ¼ x 16	32 x 400	0.835 – 0.787	0.379 – 0.357	66 – 70
	1 ¼ x 39	32 x 1000	1.968 – 1.836	0.893 – 0.833	32
	1 3/8 x 37	35 x 940	2.204	1	25
	1 ½ x 8	38 x 200	0.599 – 0.562	0.272 – 0.255	92 – 98
	1 ½ x 16	38 x 400	1.197 – 1.148	0.543 – 0.521	46 – 48
	1 ½ x 39	38 x 1000	3.064 – 2.755	1.390 – 1.250	18 – 20
	2 x 8	50 x 200	1.102	0.5	50
	2 x 16	50 x 400	2.204	1	25
	2 ½ x 16	65 x 400	3.672	1.666	16
	3 x 8	75 x 200	2.204	1	25
	3 x 16	75 x 400	5.011	2.273	11
	3 ½ x 16	90 x 400	6.889	3.125	8
	4 x 8	100 x 200	4.592	2.083	12
	4 x 16	100 x 400	9.186	4.167	6
	4 x 24	100 x 600	13.778	6.25	4
Tubo plástico	5 x 24	127 x 600	18.371	8.333	3

El cálculo para estimar la cantidad de ANFO a utilizar se puede realizar de dos formas, las cuales se mostrarán a continuación:

5.1.5.2 Cálculo de ANFO utilizando longitudes

$$C_{columna} = H - (T + C_{fondo})$$

Fórmula 7. Para la estimación de la carga de columna utilizando longitudes.

$$C_{columna} = 4.04 \text{ m} - (0.56\text{m} + 0.4 \text{ m})$$

$$C_{columna} = 3.08 \text{ m}$$

5.1.5.3 Cálculo de ANFO utilizando volúmenes

Para realizar el cálculo más sencillo se supone que la carga de fondo está acoplada es decir que se ajusta al diámetro del barreno, por lo que el cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$V_{\text{barreno}} = (H - (T + C_{\text{fondo}})) \times (r^2 \pi)$$

Fórmula 8. Para el cálculo del volumen del barreno que se cargara con ANFO.

$$V_{\text{barreno}} = (4.04 \text{ m} - (0.56 + 0.4 \text{ m})) (0.0225^2 \text{ m} \cdot \pi)$$

$$V_{\text{barreno}} = 4.90 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\delta_{\text{ANFO}} = 560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Cantidad de ANFO} = V_{\text{barreno}} \times \delta_{\text{ANFO}}$$

Fórmula 9. Para el cálculo de la cantidad de ANFO a utilizar.

$$\text{Cantidad de ANFO} = 4.90 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Cantidad de ANFO} = 2.74 \text{ kg}$$

5.2 Configuración de parámetros en Promine y diseño de la plantilla

Antes de iniciar con el diseño propiamente dicho de la plantilla de barrenación y voladura, es necesario configurar los parámetros definidos en los apartados anteriores.

Dado que este proceso de configuración ya fue abordado y detallado en el apartado 4, en este punto únicamente se mostrarán las ventanas de resultados correspondientes, omitiendo las configuraciones previas para evitar redundancia.

Se definieron los siguientes parámetros (Ilustración 84):

- Longitud de perforación
- Longitud media de tiros
- Eficiencia de la voladura
- Densidad
- Perfil de obra
- Reporte

- Diámetros
- Explosivo
- Retardos

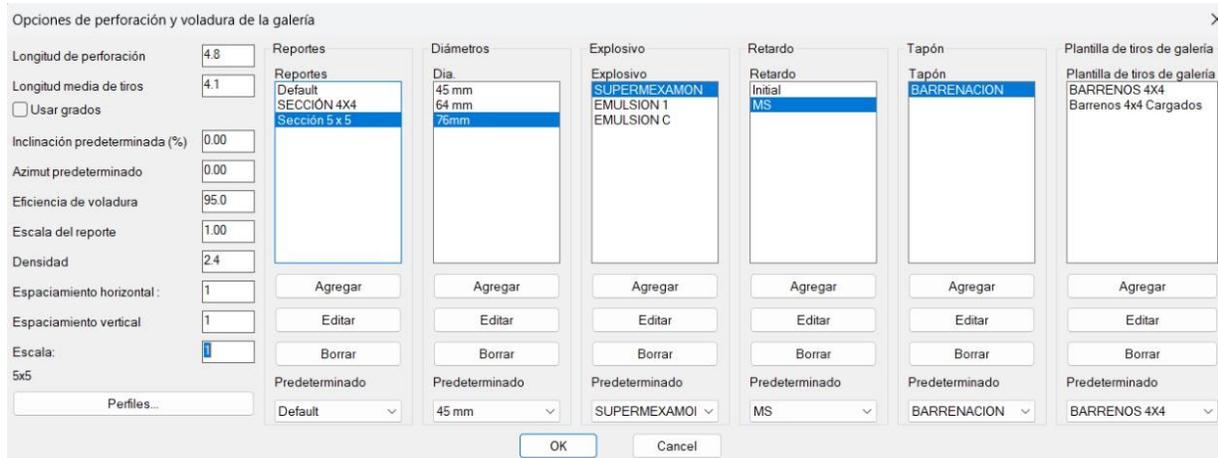


Ilustración 84. Configuración de parámetros módulo de perforación y voladura de galerías.

Para elaborar la plantilla correspondiente a las obras de desarrollo, se realizaron las siguientes etapas:

- **Modelado de obras**

Inicialmente, se modelaron distintas obras, tales como niveles, frentes y rampas (Ilustración 85). Esto se hizo con el objetivo de simular las condiciones reales y someter la plantilla diseñada a diferentes escenarios, ajustándola según las particularidades de cada obra.

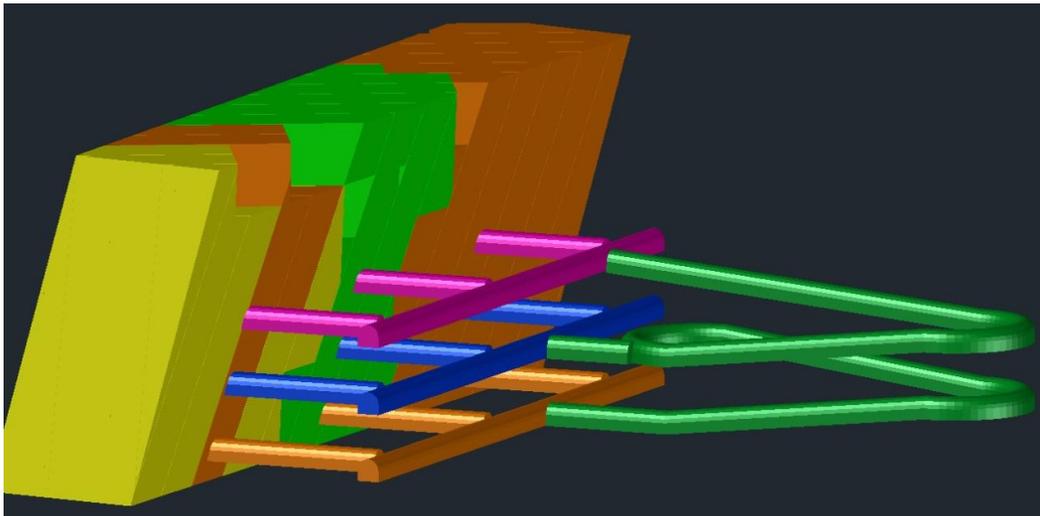


Ilustración 85. Modelamiento de obras de desarrollo vista lateral

- **Corte por secciones**

Se realizaron cortes seccionales de 4 metros (Ilustración 86), lo que corresponde a la longitud de perforación alcanzada por la barra de 16 ft (4.8 m) con una eficiencia del 85%. Este valor, que representa una eficiencia considerada buena dentro de la industria, fue tomado como referencia.



Ilustración 86. Corte de secciones de los niveles.

- **Diseño de los barrenos de cuña**

Partiendo de los cálculos realizados previamente, se diseñaron los barrenos de cuña hasta el tercer cuadrante. El cuarto cuadrante fue omitido, ya que presentaba un bordo y espaciamiento excesivamente grande, lo cual, bajo criterio técnico, podría generar una sobrecarga de explosivo (Ilustración 87). Es importante destacar que estos barrenos se generaron utilizando la herramienta propia del módulo de perforación y voladura de galerías, lo que permitió optimizar el proceso.

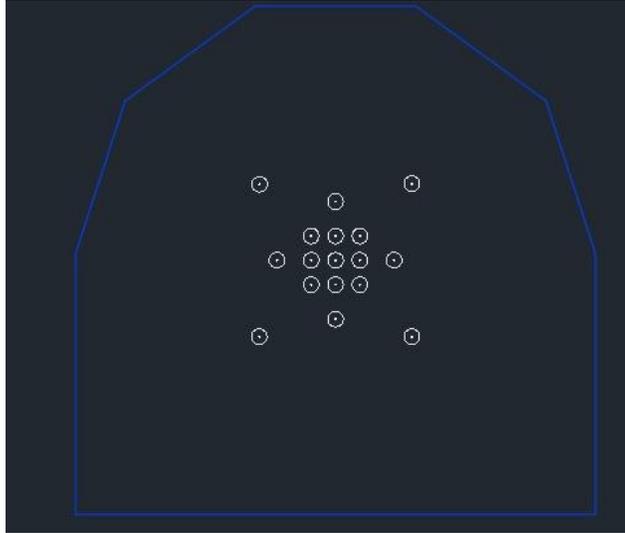


Ilustración 87. Barrenos de cuña y primeros dos cuadrantes de barrenos auxiliares vista frontal.

- **Generación de barrenos auxiliares, tablas, piso y techo.**

Utilizando las herramientas del módulo, se generaron los barrenos auxiliares, respetando el bordo y espaciamiento calculado, que fueron de 1.12 m y 1.23 m, respectivamente. De manera similar, se diseñaron los barrenos de tablas, pisos y techos, respetando las medidas previamente calculadas (Ilustración 88), las cuales son:

- Barrenos de tablas y techo: Bordo de 0.66 m, espaciamiento de 0.73 m y taco de 0.66 m.
- Barrenos de piso: Bordo de 1.12 m, espaciamiento de 1.23 y taco de 0.224 m.

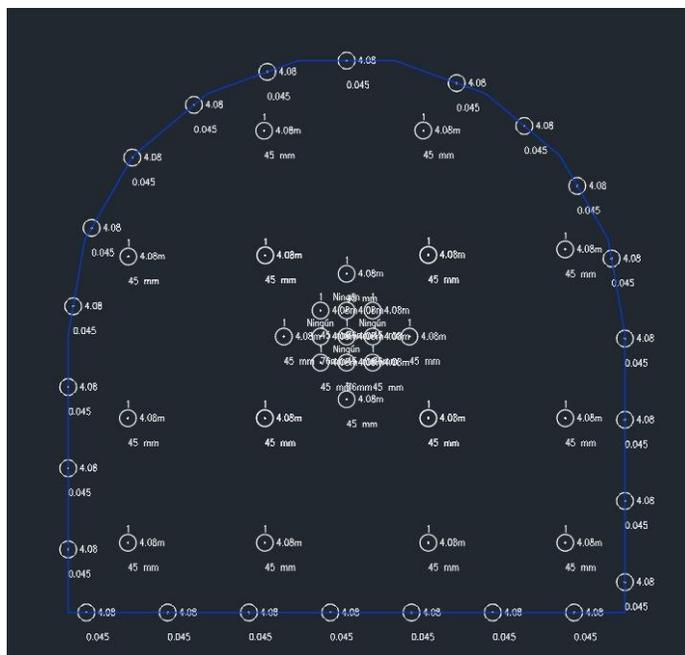


Ilustración 88. Marcaje de plantillas para obras de desarrollo vista frontal.

- **Cargado de los barrenos**

Con los barrenos marcados y siguiendo las cantidades de explosivo calculadas, se procedió a su cargado según el siguiente esquema:

- **Barrenos de cuña, auxiliares y piso:** Cargados con *Emulex 1* y *ANFO*.
- **Barrenos de tablas y techo:** Cargados únicamente con *Emulex C*.

En la Ilustración 89, se puede observar la distribución de los explosivos, con los colores correspondientes:

- **Rojo:** Emulex 1.
- **Naranja:** ANFO.
- **Verde:** Emulex C.

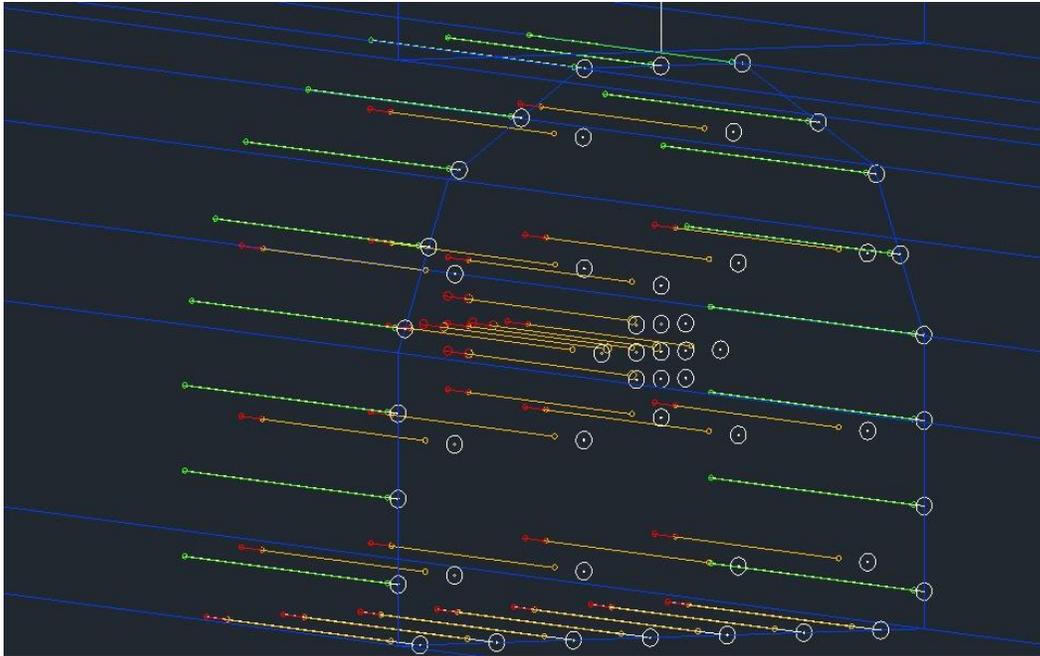


Ilustración 89. Cargado de barrenos de la plantilla vista lateral 3D.

- **Asignación de retardos**

Finalmente, se asignaron retardos a los barrenos, utilizando intervalos de 50 ms para este caso. La distribución final de los retardos puede observarse en la Ilustración 90.

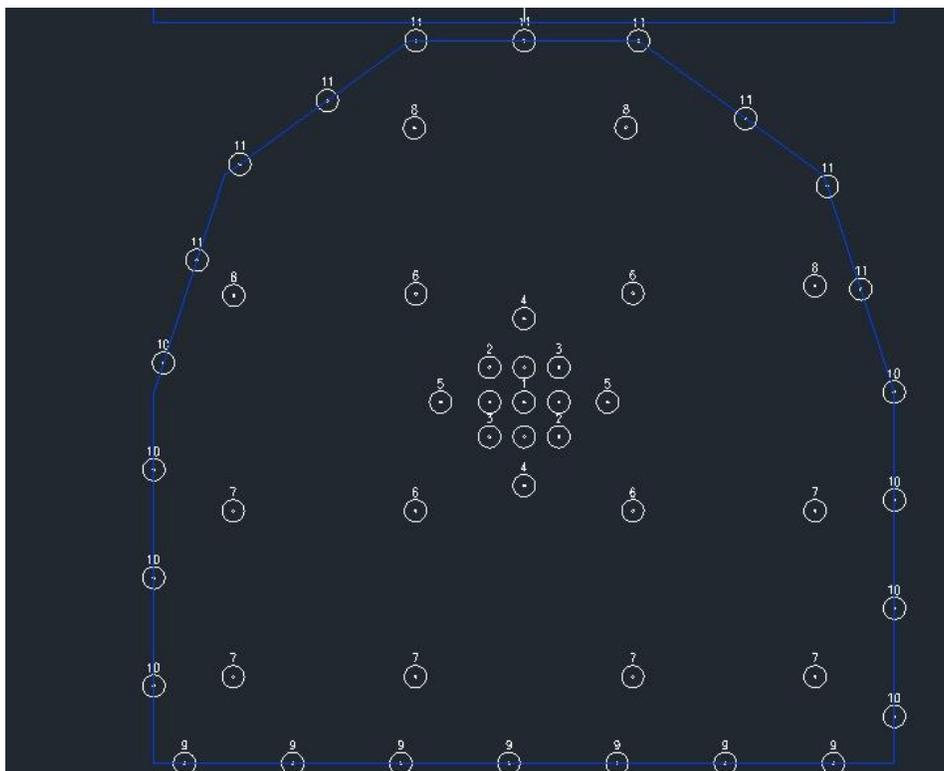


Ilustración 90. Secuencia de retardos vista frontal.

De esta manera, se completó el diseño de la plantilla de barrenación y voladura para una obra de desarrollo, tomando como referencia la sección de un nivel previamente modelado.

5.2.1 Análisis de la plantilla

Una vez diseñada la plantilla, se procede a realizar un análisis detallado para verificar si el diseño es adecuado antes de implementarlo. Los análisis realizados incluyen el contorno de tiempo, el análisis de energía y el reporte final.

- **Contorno de tiempo**

Se realizó el contorno de tiempo (Ilustración 91) para visualizar la secuencia de detonación de los barrenos. Este análisis es crucial, ya que una secuencia inadecuada junto con retardos cortos puede resultar en una voladura ineficaz.

En este caso, se identificó un barreno con retardo 7 que no fue considerado en el análisis de tiempos (cuadrado amarillo). Esto podría indicar un diseño inadecuado en esa zona específica, lo cual debe ser corregido para evitar problemas durante la voladura.



Ilustración 91. Contorno de tiempos vista frontal.

- **Análisis de energía**

El análisis de energía (Ilustración 92) permite identificar áreas con una alta concentración de energía y zonas donde esta es insuficiente.

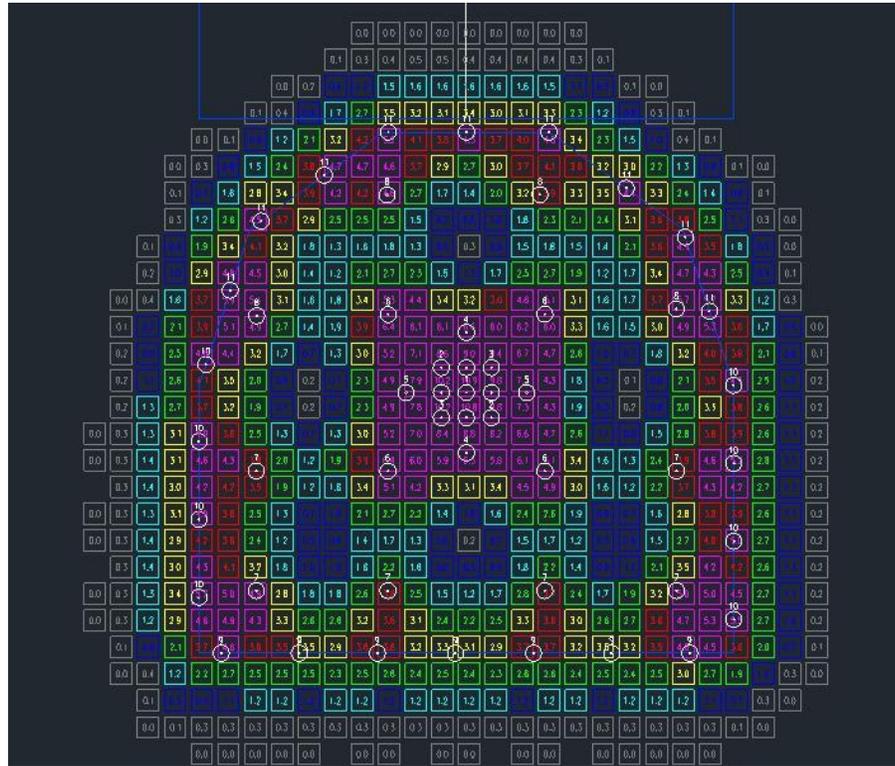


Ilustración 92. Análisis de energía vista frontal.

En los barrenos de tablas y cielo, se detectó una sobrecarga de explosivo. Esto se evidencia en las zonas con colores rojo y morado, indicando una energía superior a 4 MJ. Estas condiciones pueden ocasionar que la roca no se desprenda adecuadamente y no se generen zonas de alivio necesarias.

Por otro lado, se observaron áreas con colores gris y azul fuerte, que representan niveles mínimos de energía. Estas zonas podrían generar sobretamaños, afectando la calidad y eficiencia de la voladura.

- **Reporte final**

Finalmente, se generó un reporte que incluye los resultados obtenidos (Ilustración 93):

Sección 5 x 5		
Eficiencia de perforación (%)	%	85.4
Número de tiros perforados	Unidades	55
Número de tiros cargados	Unidades	51
Número de tiros sin carga	Unidades	4
Metros totales perforados	m	225.50
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	202.70
Factor de carga	kg/m ³	4.27
Costo total de la perforación	\$	22550.00
Tasa de perforación por ronda	horas	4.51

Ilustración 93. Reporte de la plantilla.

Eficiencia de perforación: 85.4%, lo que indica que de una barra de 4.8 m, se perforaron 4.1 m, un valor acorde a lo calculado previamente.

Número de barrenos: Se generaron 55 barrenos, de los cuales se cargaron 51, dentro del rango previamente calculado.

Avance logrado: 3.9 m, equivalente al 95% de efectividad de la voladura, conforme a los cálculos iniciales.

Factor de carga: Transformando el valor de 4.27 kg/m³ a toneladas. Se estimó en 2 kg/ton, un valor por encima del promedio para este tipo de obras. Esto concuerda con los resultados del análisis de energía, indicando que la cantidad de explosivo empleado es alta.

Se incorporaron datos estimados para complementar el análisis:

Costo de perforación: \$100 por metro.

Tasa de perforación: 50m/h.

Estos valores, aunque teóricos, permiten una evaluación económica inicial.

5.2.2 Ajuste de la plantilla

Una vez realizado el diseño inicial conforme a los cálculos teóricos, se realizan los ajustes pertinentes. Para este ejercicio, se modificarán tanto las ubicaciones de algunos barrenos como la cantidad de explosivo empleado, con base en los resultados obtenidos previamente.

En primer lugar, se utilizó como referencia la plantilla anterior y se ajustaron las distancias entre los barrenos de cuña. Además, se añadieron barrenos en las zonas donde la cantidad de energía se encontraba marcada en color azul o gris, lo que indicaba una energía insuficiente para generar la fragmentación de la roca (Ilustración 94).

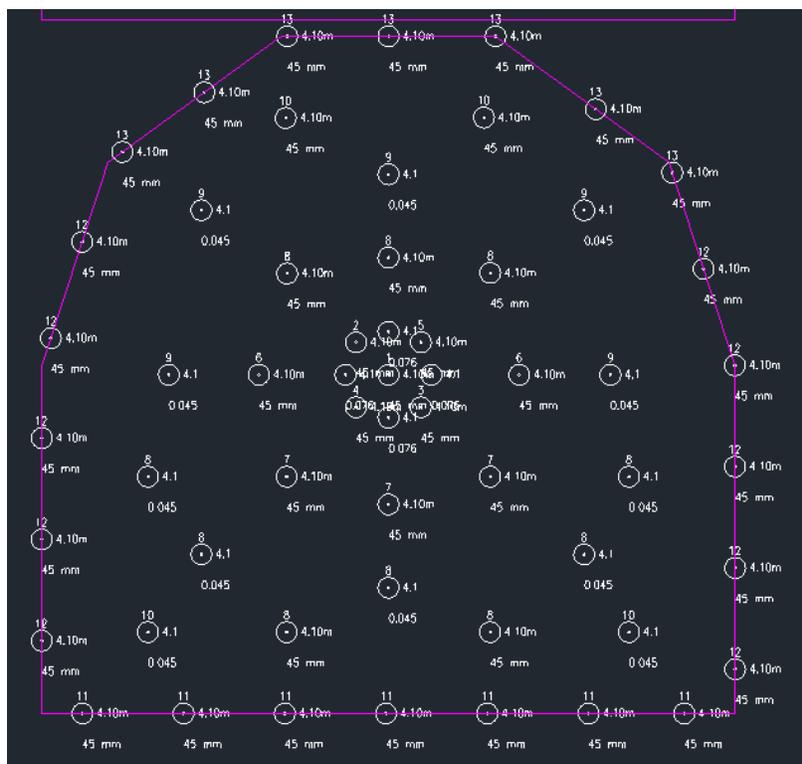


Ilustración 94. Redistribución de barrenos vista frontal.

- **Contorno de tiempos**

Una vez modificada la plantilla, se procede a generar el contorno de los tiempos con el objetivo de visualizar la secuencia de detonación de los barrenos. Durante este proceso, se observa que también se agregó una mayor cantidad de retardos (Ilustración 95). Se observa que existe una cantidad mayor de líneas de tiempo, y que posiblemente no cuentan con el tiempo suficiente entre cada una, lo que provocaría una acumulación de energía en un solo punto, impidiendo su adecuada distribución.

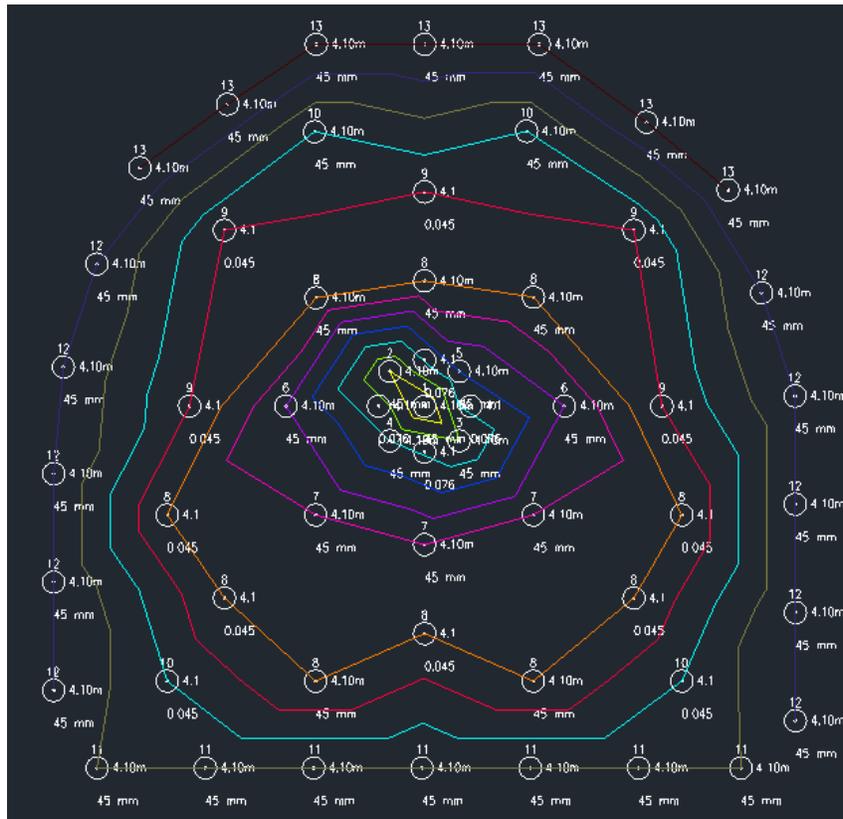


Ilustración 95. Contorno de tiempos primera modificación vista frontal.

- **Análisis de energía**

Se genera el análisis de energía, observando que, si bien ya no existen zonas de baja energía, ahora surge el problema de una sobresaturación en la zona central, lo que indica un uso excesivo de explosivo (Ilustración 96).

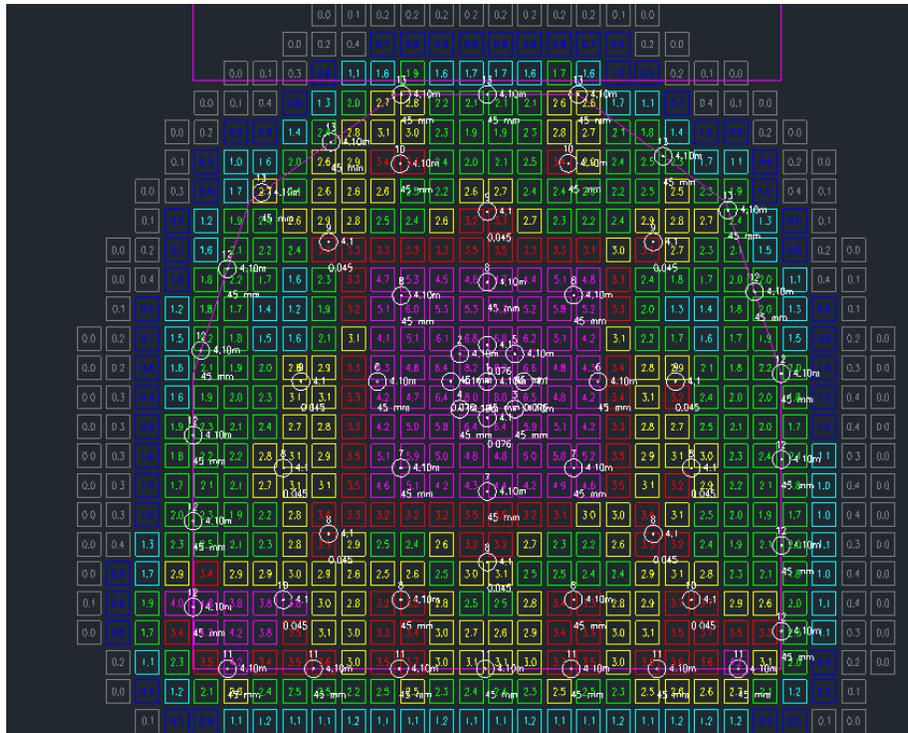


Ilustración 96. Análisis de energía primera modificación vista frontal.

- **Modificación de cargas de explosivo y distribución de barrenos**

Al observar una alta saturación de energía en la zona central, se reducirán las cargas en los barrenos auxiliares y de piso bajo este mismo diseño (Ilustración 97). Además, se modificó la distribución de los barrenos. Esto se debe a que en dichas áreas presentan una mayor concentración de energía, lo que podría afectar el resultado de la voladura.

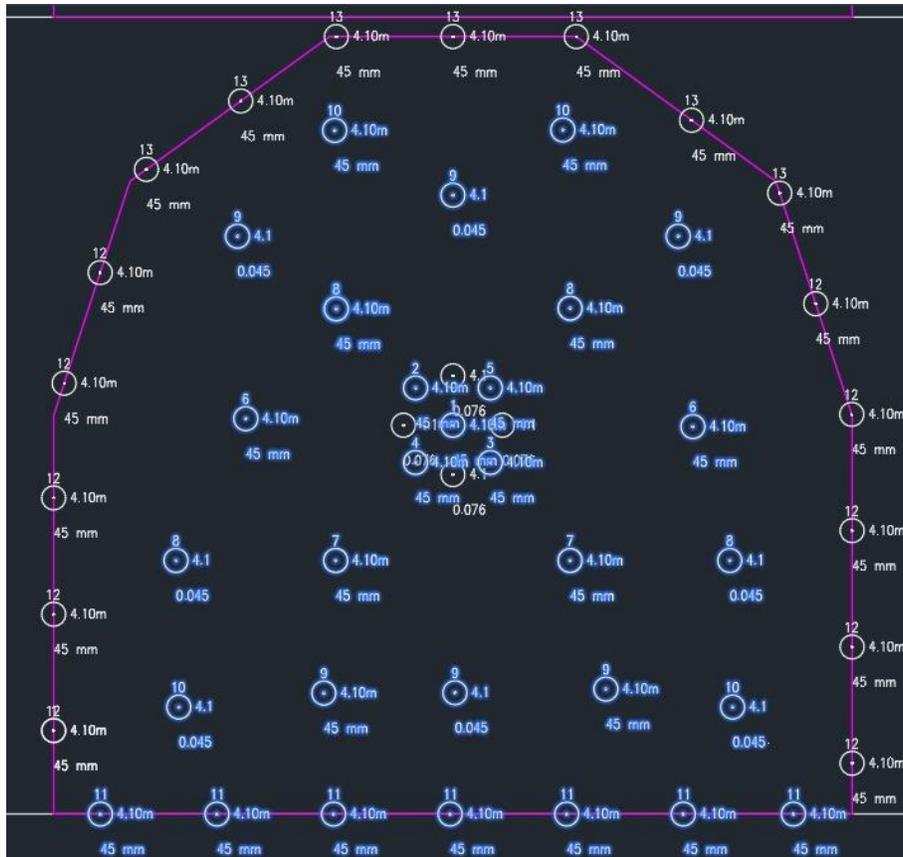


Ilustración 97. Selección de barrenos a modificar las cargas explosivas vista frontal.

Se redujo únicamente la cantidad de ANFO, pasando de 3 m a 2.5 m de explosivo en los barrenos auxiliares y de 3 m a 2 m en los barrenos de piso. Esto, a su vez, aumentará el tamaño del taco de 0.56 m a 1.06 m en los barrenos auxiliares y de 0.56 m a 1.56 m en los barrenos de piso.

- **Contorno de tiempos**

Al modificar la distribución de los barrenos, también se ajustó la secuencia de los retardos. Se buscó otorgar un mayor tiempo de alivio entre líneas de barrenos para evaluar si esto ayudaba a evitar zonas con una acumulación excesiva de energía. En la Ilustración 98 se observa una distribución más uniforme entre los retardos y las líneas de tiempo; además, el incremento en el tiempo entre líneas favorece una dispersión homogénea de la energía, evitando su acumulación excesiva en un solo punto. Adicionalmente, la reducción en la cantidad de explosivo disminuye el rango de influencia,

lo que previene la sobrefragmentación de la roca. Por estas razones, este diseño resulta más viable que el anterior.

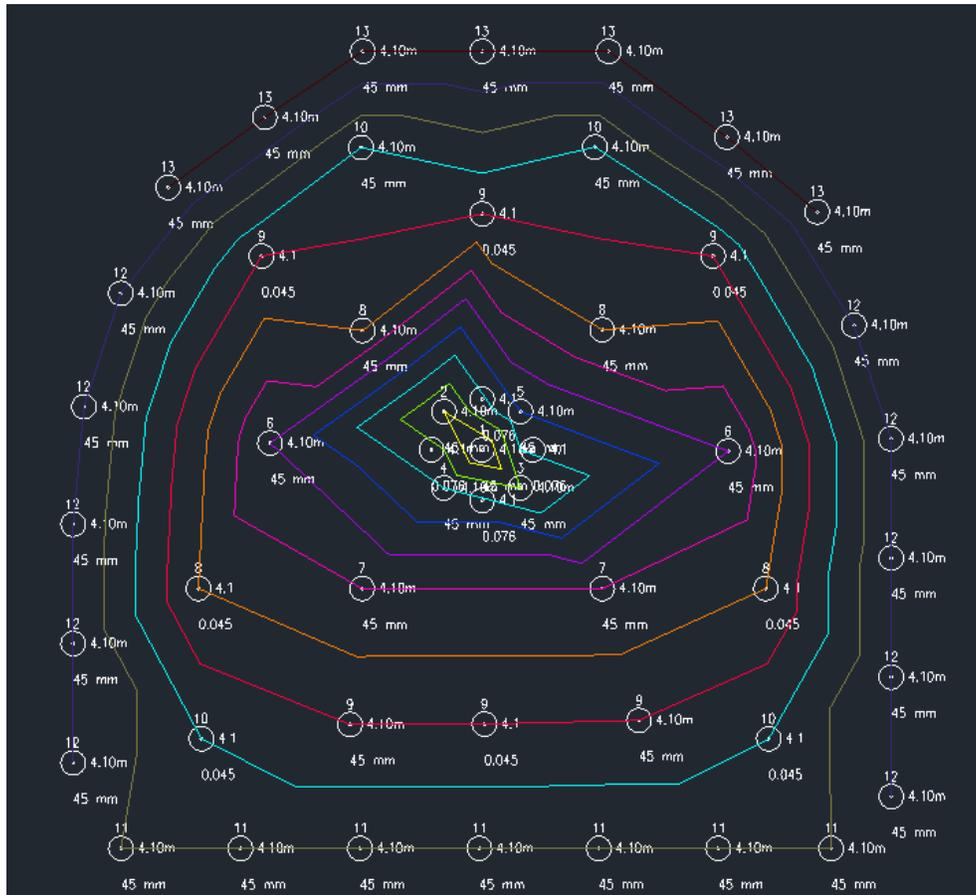


Ilustración 98. Contorno de tiempos segunda modificación vista frontal.

- **Análisis de energía**

Se generó el análisis de energía correspondiente, y se observó que la cantidad de energía se redujo significativamente, aunque aún existen zonas con alta concentración de energía. Las zonas óptimas (verde y amarillo) son predominantes en este análisis (Ilustración 99). Se identificaron dos zonas en las esquinas de la sección de obras que podrían generar un problema, ya que durante la voladura podría haber la presencia de “patas”. Por lo tanto, se podría modificar la cantidad de explosivo utilizado en estas áreas o, en su caso, utilizar esta plantilla y observar los resultados.

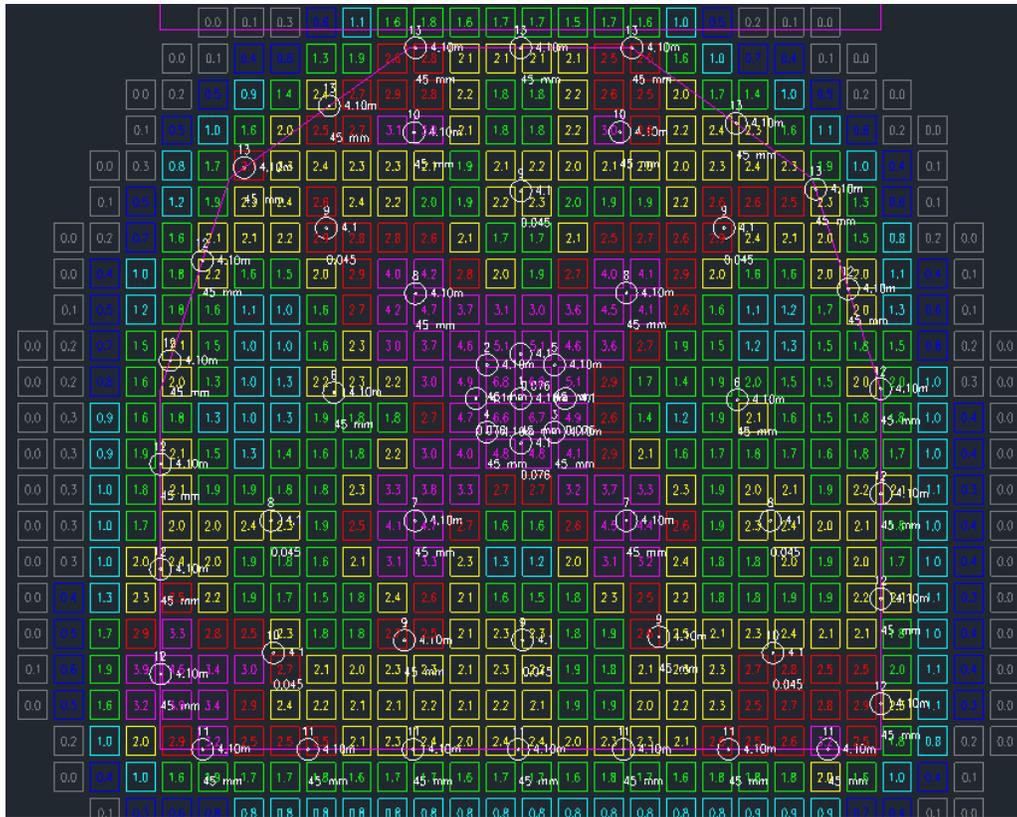


Ilustración 99. Análisis de energía segunda modificación vista frontal.

Reporte Final

Finalmente generamos el reporte de la plantilla (Ilustración 100).

Sección 5 x 5		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	56
Número de tiros cargados	Unidades	52
Número de tiros sin carga	Unidades	4
Metros totales perforados	m	229.60
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	202.70
Factor de carga	kg/m ³	2.74
Costo total de la perforación	\$	22960.00
Tasa de perforación por ronda	horas	4.59

Ilustración 100. Reporte final segunda modificación.

Dentro del reporte anterior se observa lo siguiente:

- La cantidad de barrenos empleados para la segunda modificación fue de 56, lo que representa un aumento de 1 barreno con respecto a la plantilla inicial. Sin embargo, se observa un mejor resultado en esta versión debido a la redistribución de los barrenos.
- La cantidad de barrenos de la segunda modificación se redujo en 6 con respecto a la primera modificación, en la cual existía una sobrecarga de energía en varias zonas.
- El factor de carga de la segunda modificación se redujo de 2 kg/ton a 1.38 kg/ton, valor obtenido de realizar la transformación del factor mostrado en el reporte de 2.74 kg/m³. Se observó una reducción de 0.62 kg/ton con respecto a la plantilla inicial, lo cual se considera un valor razonable, dado que la sección de la obra es de 5 m x 5 m. Sin embargo, aún existen zonas que pueden ser mejoradas.
- **Modificación de la distribución de los barrenos**

Como última modificación, para la sección de la rampa se consideró la reducción de barrenos y la modificación de su distribución, optando por un mayor espaciamiento entre los barrenos auxiliares (Ilustración 101), con el objetivo de visualizar el comportamiento una vez generado el análisis de energía.

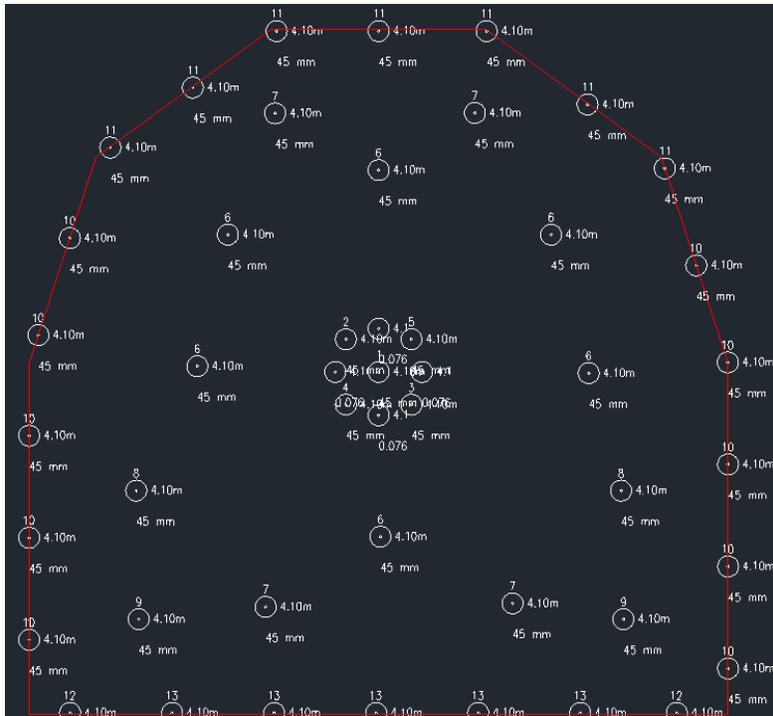


Ilustración 101. Redistribución de los barrenos tercera modificación vista frontal.

- **Contorno de tiempos**

Así como en los casos anteriores, se modificó la distribución de los retardos con el objetivo de probar diferentes arreglos y observar si esto influye en la propagación de la energía (Ilustración 102).

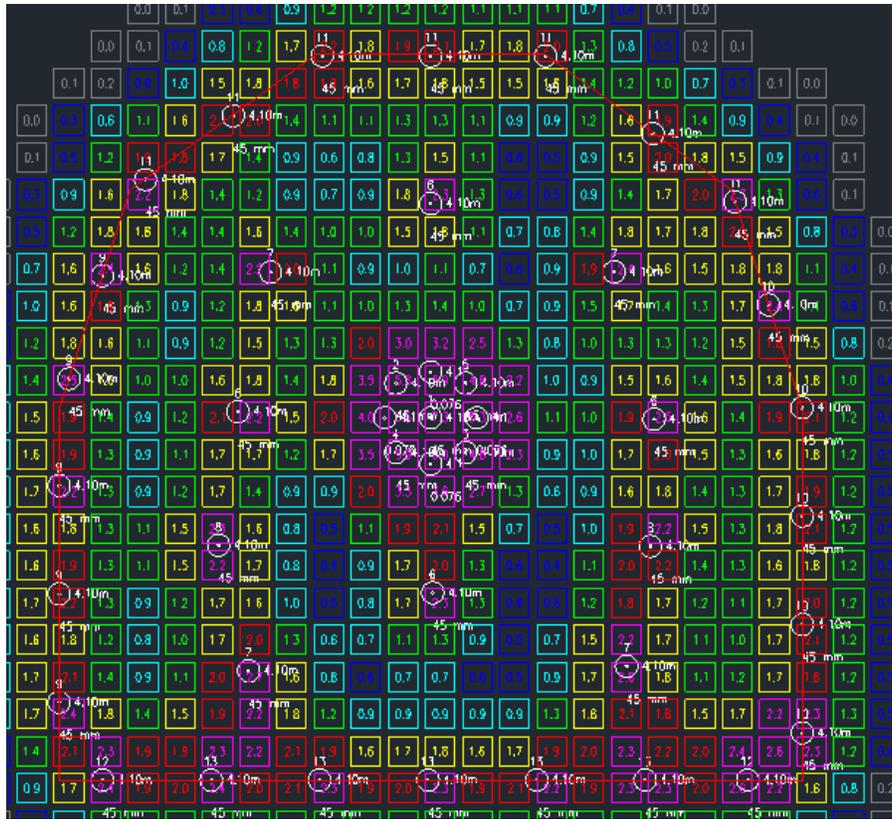


Ilustración 103. Análisis de energía tercera modificación.

- **Reporte Final**

Finalmente se generó el reporte final (Ilustración 104).

Sección 5 x 5		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	43
Número de tiros cargados	Unidades	39
Número de tiros sin carga	Unidades	4
Metros totales perforados	m	176.30
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	203.51
Factor de carga	kg/m ³	1.88
Costo total de la perforación	\$	17630.00
Tasa de perforación por ronda	horas	3.53

Ilustración 104. Reporte final tercera modificación.

En este reporte se observa lo siguiente:

- La cantidad de barrenos empleados es de 43, lo cual representa una reducción de 13 barrenos en comparación con la plantilla anterior.
 - El costo total de perforación y el tiempo por plantilla se redujeron, esto debido a la disminución de los 13 barrenos, pasando de \$22,960 a \$17,630 y de 4.59 horas a 3.53 horas por plantilla.
 - El factor de carga pasó de 1.38 kg/ton a 0.94 kg/ton, lo cual se considera dentro del estándar. Sin embargo, se deben observar los resultados obtenidos una vez aplicada la plantilla, para realizar el análisis, la comparativa y las conclusiones.
-
- **Vista 3D de las plantillas realizadas**

Se pueden observar las obras realizadas con la vista 3D de Promine, lo que permite hacer una planeación de las voladuras que se llevarán a cabo durante el día, semana o mes, generando así un plano que facilita su comprensión (Ilustración 105).

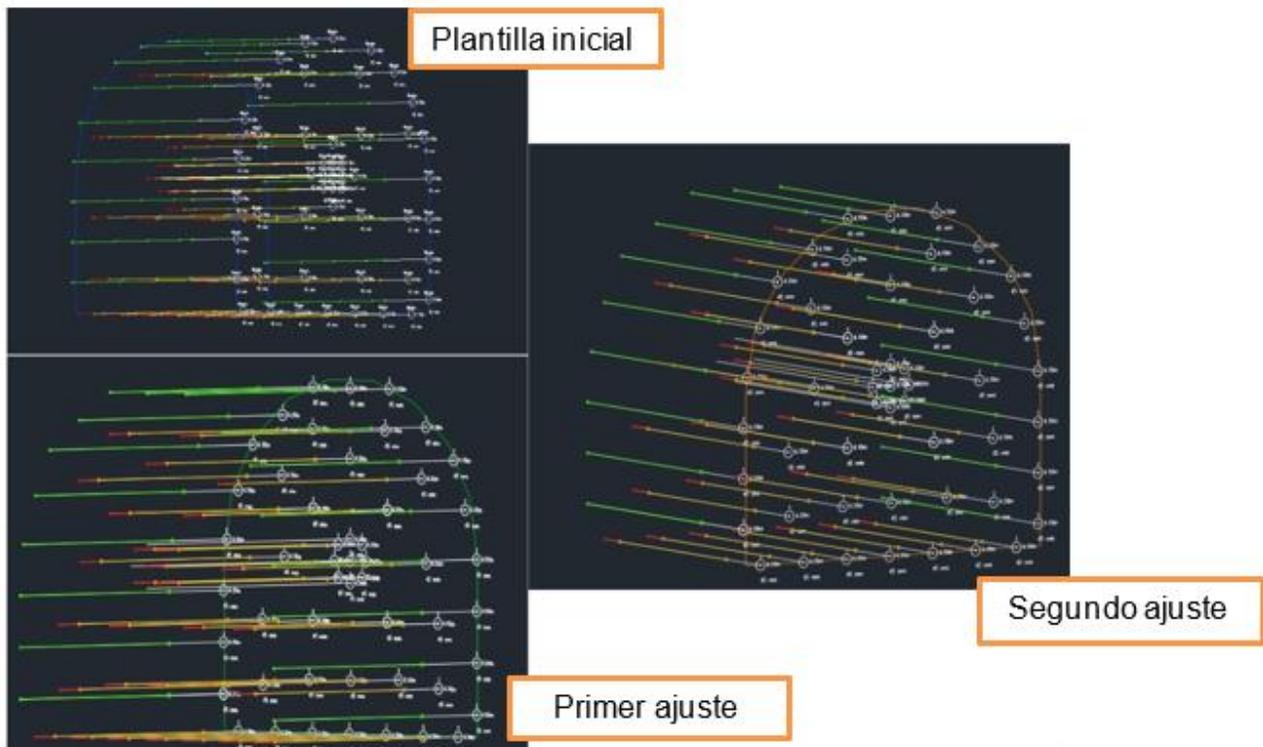


Ilustración 105. Vista 3D de las plantillas generadas para obras de desarrollo.

5.3 Obras de producción

El módulo utilizado para diseñar las plantillas de producción es distinto al que se emplea para las plantillas de desarrollo. No obstante, si el método contempla el uso de galerías con barrenación horizontal, es posible diseñar las plantillas de producción utilizando el mismo módulo destinado al desarrollo.

5.3.1 Selección de equipo

Para la generación de las plantillas utilizadas en las obras de producción, es necesario seleccionar previamente el equipo adecuado, ya que se desarrollarán diversas plantillas de producción aplicables a distintos métodos de explotación. Para aquellos métodos que utilizan equipos tipo Jumbo, se continuará empleando el Boomer T1 (Ilustración 81); Por lo que, es necesario definir el diámetro de barrenación que se utilizará. Los diámetros mínimos de las brocas compatibles con el equipo seleccionado se encuentran especificados en la ficha técnica correspondiente (Tabla 1). Por lo tanto, se empleará un diámetro de barrenación de **51 mm** para los barrenos de producción.

Por otro lado, para los métodos que requieren barrenación larga, se seleccionará un equipo tipo Simba.

En el mercado existen diversas marcas y equipos especializados en barrenación larga. Para el método de tumba por subniveles y la elaboración de la plantilla, se considerará el uso de un equipo **Simba E7** de la marca **Epiroc** (Ilustración 106).



Ilustración 106. Equipo de barrenación larga Simba E7 (Epiroc, 2025).

Es importante recordar que la selección del equipo debe realizarse con base en las características específicas de cada operación.

Una vez definido el equipo, se debe seleccionar el diámetro de barrenación a utilizar. Tras analizar los diámetros compatibles (Tabla 11), se ha determinado que el más adecuado es el de **64 mm**.

Tabla 11. Catálogo de diámetros disponibles para el Simba E7 (Epiroc, 2025).

Perforadora	Barra	Tubo guía	Diámetro de broca (mm)
COP 1838+	R32 <u>Speedrod</u>	TDS 45	51-64
COP 1838+MUX	T38 <u>Speedrod</u>	TDS 54/TDS 64	64-76
COP 1838+HUX	T45 <u>Speedrod</u>	TDS 64/TDS 76	76-89
	TDS 45	N/A	48-76
	TDS 54	N/A	64-89
	TDS 64	N/A	70-89
COP 2550UX	T51	TDS 76	89-115
	TDS 64	N/A	76-115
	TDS 76	N/A	89-102
	TDS 76	N/A	89-115 (<u>ST58 shank adapter</u>)
COP 3060	TDS 76	N/A	89-102
	TDS 87	N/A	102-115
COP 35	TAC 76/89	N/A	88-105
COP 44	TAC 76/89	N/A	110-125
COP 54	TAC 89 (TDS102)	N/A	134-152
COP 64	TAC 89 (TDS102)	N/A	156-178

Cabe señalar que ambos equipos pueden ser utilizados en obras de producción, dependiendo del método de minado. Sin embargo, sus principales diferencias radican en la forma en que realizan la perforación: el jumbo ejecuta perforaciones horizontales, mientras que el Simba realiza perforaciones verticales o inclinadas. Además, la longitud de los barrenos varía entre ambos equipos; el jumbo se utiliza comúnmente para perforaciones de entre **2 m y 5 m**, mientras que el Simba se emplea para longitudes que van desde **8 m hasta 30 m** dependiendo el diseño establecido.

5.3.2 Parámetros de la roca

En cuanto a la calidad de la roca, se describe que la roca mineralizada presenta una densidad de 3.0 kg/m^3 , una resistencia a la compresión simple (RCS) de 110 MPa y un índice de calidad de la roca (RQD) del 83%. Según la clasificación propuesta por la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas y basada en su resistencia a la compresión simple (Tabla 2), esta información permitirá determinar las características estructurales y de estabilidad de la obra.

La roca, en este caso, se clasifica como de muy alta resistencia de acuerdo con su resistencia a la compresión simple (RCS).

El segundo parámetro proporcionado es el índice de calidad de la roca (RQD), que para la roca mineralizada es del 83%. Según la clasificación presentada en la Tabla 3, este valor corresponde a una categoría de calidad **buena**.

Cabe mencionar que existen pruebas de laboratorio que permiten medir las propiedades mecánicas de la roca con mayor precisión, proporcionando valores más confiables para su clasificación y permitiendo realizar un estudio técnico más detallado. No obstante, al tratarse de un caso hipotético, se trabajará únicamente con las variables disponibles.

5.3.3 Selección del explosivo

Para el diseño de las plantillas de producción, además de emplear **ANFO** y **Emulex C** con las características previamente descritas, se realizará una modificación en el alto explosivo. Esta decisión se fundamenta en las propiedades de la roca mineral, que presenta una densidad de 3.0 kg/m^3 , una resistencia a la compresión simple (RCS) de 110 MPa y un índice de calidad de la roca (RQD) del 83%.

Con base en estos datos, se puede inferir que la roca posee una **buena calidad**, por lo que se ha seleccionado el alto explosivo **Senatel Magnafrac**, distribuido por ORICA. Sus propiedades y dimensiones de empaquetamiento se presentan en la Tabla 12 y 13.

Tabla 12. Propiedades del explosivo Senatel Magnafrac (Orica, 2025).

Producto	Senatel™ Magnafrac™
Densidad (g/cm ³) ⁽¹⁾	1.17 – 1.23
Diámetro mínimo de cartuchos (mm)	22
Tipo de barreno	Húmedo y seco
VOD característica (m/s) ⁽²⁾	5700 - 6300
Energía Efectiva Relativa (REE) ⁽³⁾	
Energía relativa en peso - RWS (%)	117
Energía relativa en volumen - RBS (%)	175
CO2 Equivalente (kg/t) ⁽⁴⁾	170

Tabla 13. Propiedades de empaquetamiento Senatel Magnafrac (Orica, 2025).

Diámetro (mm)	Longitud nominal (mm)	Peso nominal (g)	Cartuchos por caja (ítems)	Peso por caja (kg)
50	500	1250	20	25
55*	500	1465	17	25
60	500	1785	14	25
75	500	2500	10	25
80*	500	3125	8	25

5.3.4 Diseño de la plantilla para el método de corte y relleno

Antes de diseñar las plantillas, es fundamental configurar cada uno de los parámetros detallados en los apartados anteriores. Una vez completada esta configuración, se procede al cálculo del bordo y el espaciamiento de los barrenos, utilizando nuevamente las fórmulas de **Konya** para obtener un primer diseño.

Las obras de producción para este método se pueden realizar utilizando el mismo módulo que se usó para las obras de desarrollo, por lo que, se volverá a emplear este módulo solamente que con un enfoque a las obras de producción.

$$B = 0.012 \left(\frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) D_e$$

Donde:

$B = \text{Bordo}$

$SG_e = \text{Densidad del explosivo} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$

$SG_r = \text{Densidad de la roca} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$

$D_e = \text{Diámetro del explosivo (mm)}$

Fórmula 10. Para el cálculo del bordo de los barrenos auxiliares, piso, tablas y techo (Konya y Albarrán, 1998).

$$S = 1.1 B$$

$$T = 0.5 B$$

Fórmula 11. Para el cálculo de espaciamiento y taco en barrenos auxiliares (Konya y Albarrán, 1998).

Por lo tanto, de acuerdo con las propiedades previamente descritas tanto del explosivo como del mineral, el bordo y el espaciamiento son los siguientes:

$$B = 0.012 \left(\frac{2 \left(1.2 \frac{g}{cm^3} \right)}{3.0 \frac{g}{cm^3}} + 1.5 \right) 50mm$$

$$B = 1.38 m$$

$$S = 1.1 \times 1.38 m$$

$$S = 1.5 m$$

$$T = 0.5 (1.38 m)$$

$$T = 0.69 m$$

La carga de los barrenos variará en función de la longitud perforada, por lo que se tomarán como base los siguientes parámetros:

- **Carga de fondo:** Se utilizarán cartuchos de **Senatel Magnafrac** de **0.5 m** de longitud cada uno.
- **Carga de columna:** Estará compuesta únicamente por **ANFO**. Su longitud se determinará restando la suma de la longitud de los cartuchos utilizados y la del taco.
- **Longitud del taco:** Se empleará el valor previamente calculado de **0.69 m** como base.
- **Barrenos de contorno (tablas y techo):** En caso de ser necesarios, se cargarán con dos cartuchos de Emulex C para mejorar el control del contorno de la obra con un espaciamiento de 0.69 m.

Con estos datos preliminares, se procede a generar la plantilla de barrenación.

En primer lugar, se genera los niveles a explotar, una vez modelado el nivel con las dimensiones de obra que se hayan planeado, para este ejercicio las dimensiones para las obras de producción serán de 4.5 m x 4.5 m, posteriormente se llevan a cabo los cortes de secciones.

Se utilizará el mismo equipo Boomer T1 que se empleó para las obras de desarrollo con la única diferencia que el diámetro de barrenación será de 51mm, la barra seguirá siendo la de 16 ft (4.8 m), esto debido a las dimensiones del explosivo Senatel Magnafrac.

Por otra parte, las plantillas realizadas no tendrán cuña ya que se entiende que existe una cara libre en la parte inferior de la obra.

Con los datos previamente calculados el acomodo de los barrenos se visualiza de la siguiente forma (Ilustración 107)

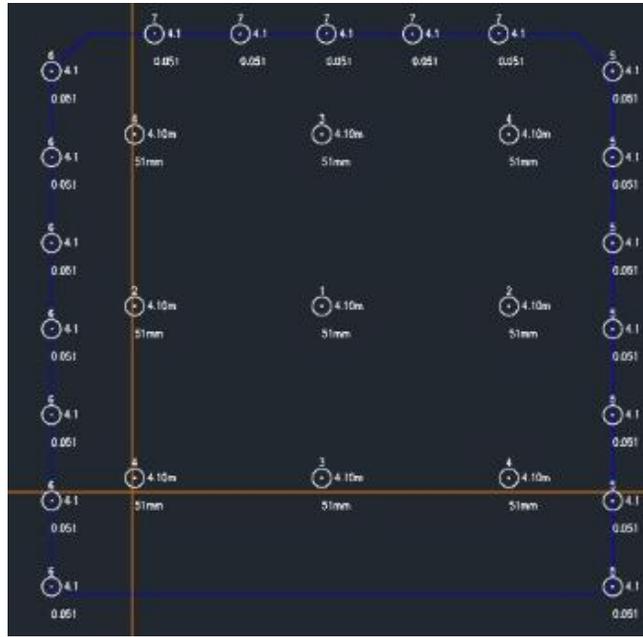


Ilustración 107. Arreglo de los barrenos de producción con los valores calculados vista frontal

El análisis de distribución energética, obtenido con base en los valores previamente calculados, se presenta en la Ilustración 108. En dicho análisis se identifican zonas con alta concentración de energía, sin embargo, no se encuentran cercanos a los límites de la voladura, por lo que no presentarían un gran problema.

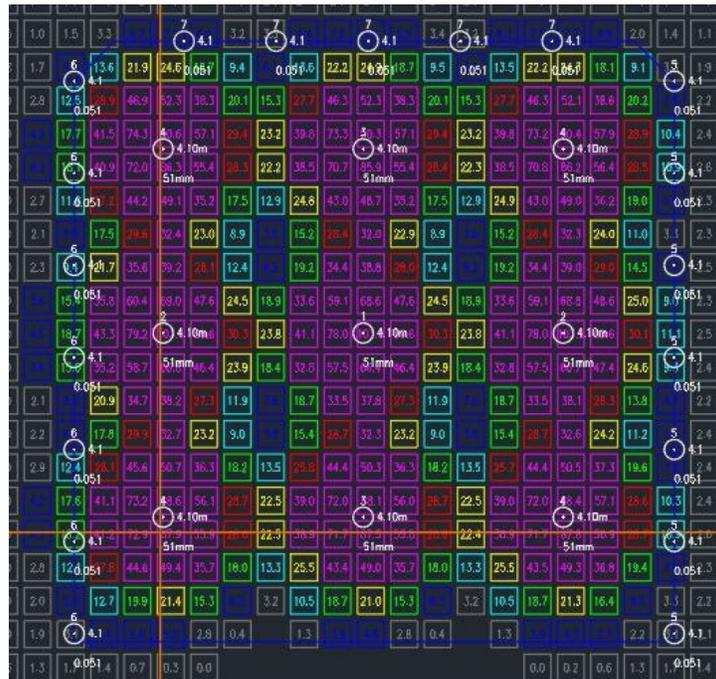


Ilustración 108. Análisis de energía de la plantilla de corte y relleno.

El reporte generado de esta plantilla muestra que se tiene un factor de carga de 2.41 kg/m³ lo que es equivalente a 1.01 kg/ton. Este es un valor que se encuentra dentro de un rango óptimo (Ilustración 109).

SECCIÓN 4.5X4.5		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	28
Número de tiros cargados	Unidades	28
Número de tiros sin carga	Unidades	0
Metros totales perforados	m	114.80
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	188.46
Carga operante	kg	189.51
Factor de carga	kg/m ³	2.41
Costo total de la perforación	\$	7585.00
Tasa de perforación por ronda	horas	1.52
Factor de potencia	kg/t	1.01

Ilustración 109. Reporte final de la plantilla de corte y relleno.

5.4.2.1 Ajuste de la plantilla de corte y relleno

Con base en los datos obtenidos, se procedió a realizar un ajuste en los parámetros de diseño: se incrementó la longitud del taco a 1.0 m, se redujo el bordo de 1.38 m a 1.2 m y el espaciamiento de 1.5 m a 1.3 m, con el objetivo de observar los resultados generados y realizar una comparativa con el diseño anterior.

En la Ilustración 110 se presenta el nuevo arreglo de perforación, el cual mantiene una configuración similar, pero con una reducción en el bordo y el espaciamiento. Por su parte, la Ilustración 111 muestra el análisis energético del nuevo diseño, donde se observa una concentración de energía en la zona de interés. No obstante, se identifican áreas en el contorno de la obra donde no llega suficiente energía, por lo que no existirán daños en el contorno de la voladura que afecten su estabilidad, sin embargo, en comparación con el arreglo anterior, este presenta una mayor concentración energía, por lo que se corre el riesgo de contar con una sobrefragmentación.

Finalmente, la Ilustración 112 presenta el reporte del diseño ajustado, en el que se destaca una disminución en la carga operante, pasando de 189.51 kg en el diseño original a 169.91 kg en el diseño modificado. Asimismo, el factor de carga se redujo de 1.01 kg/ton a 0.90 kg/ton, ya una vez transformados los valores.

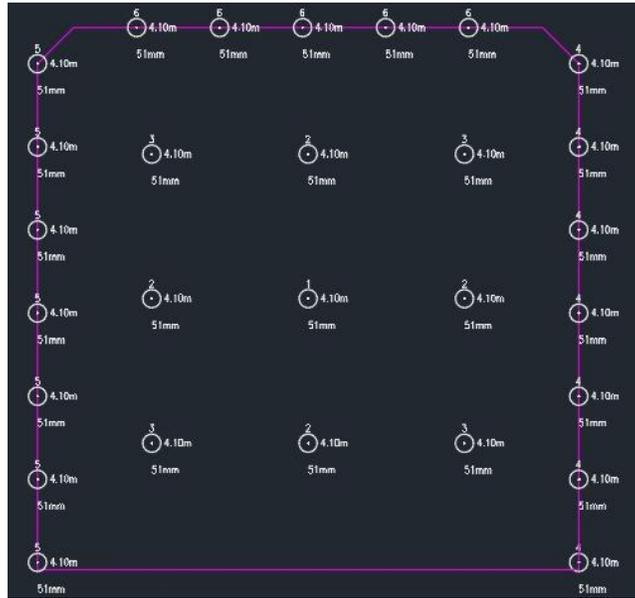


Ilustración 110. Primer ajuste de la plantilla vista frontal.

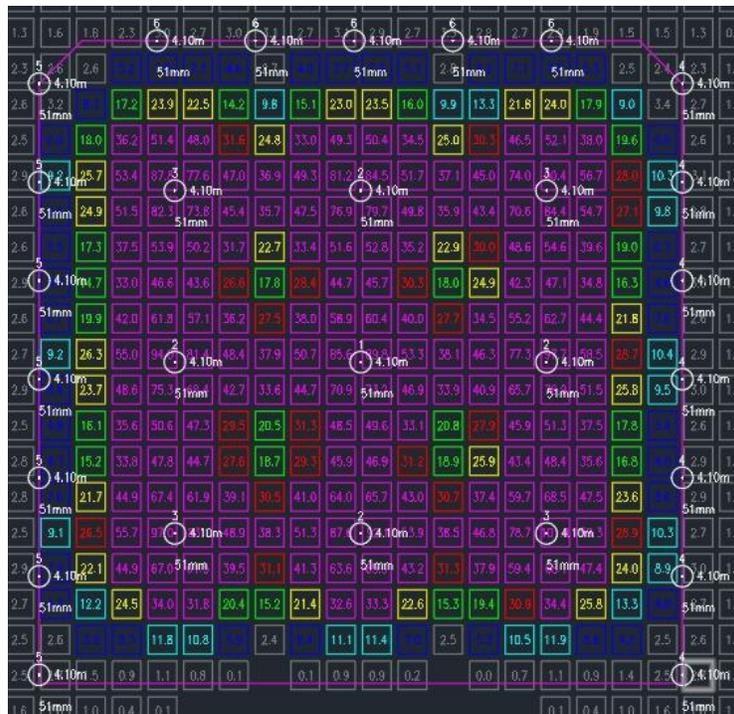


Ilustración 111. Análisis de energía del primer ajuste.

SECCIÓN 4.5X4.5		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	28
Número de tiros cargados	Unidades	28
Número de tiros sin carga	Unidades	0
Metros totales perforados	m	114.80
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	188.46
Carga operante	kg	169.91
Factor de carga	kg/m ³	2.16
Costo total de la perforación	\$	7585.00
Tasa de perforación por ronda	horas	1.52
Factor de potencia	kg/t	0.90

Ilustración 112. Reporte final del primer ajuste.

Se realizó un segundo ajuste con los parámetros calculados inicialmente, pero modificando el arreglo de los barrenos, siendo ahora de tres bolillo como se observa en la Ilustración 113.

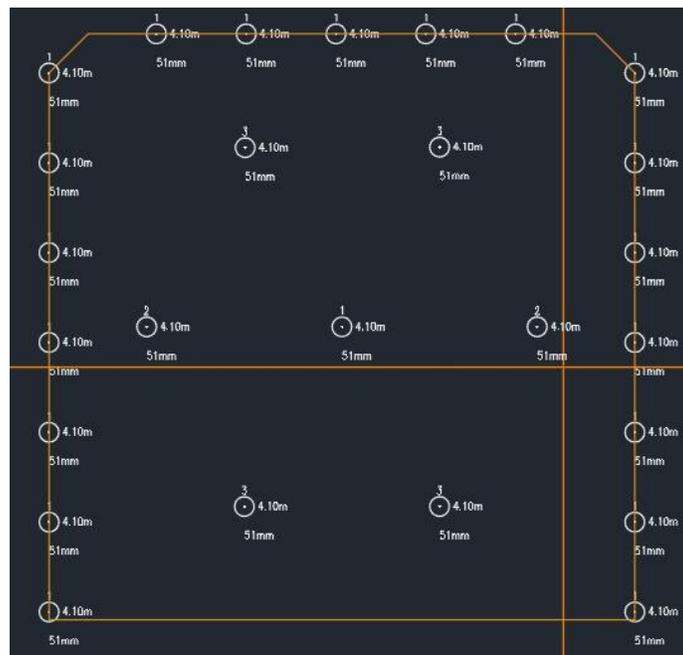


Ilustración 113. Segundo ajuste de la plantilla vista frontal.

Se realizó el análisis de energía (Ilustración 114), el cual muestra una distribución uniforme de la energía en las áreas, exceptuando las esquinas inferiores y superiores, por lo que se podría añadir barrenos en estas áreas con el objetivo de abarcar todo el contorno de la obra.

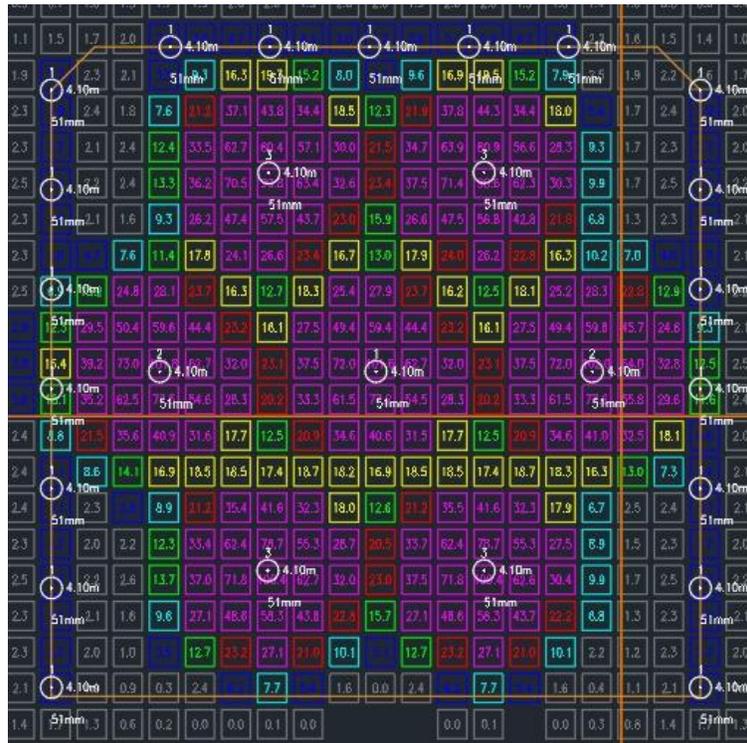


Ilustración 114. Análisis de energía del segundo ajuste.

De igual forma, se generó el reporte final (Ilustración 115), en el cual se observa un decremento en el factor de carga, alcanzando un valor de 0.86 kg/ton. Esta disminución se atribuye a la cantidad de barrenos utilizados, si bien, el valor es menor el área de influencia también lo es, por lo que se presenta el riesgo de contar con sobretamaños al momento de realizar la voladura y con un perfil de obra deficiente, por ende, este diseño es el menos favorable en comparación con los dos anteriores, se deberá de modificar y volver a realizar la comparativa con los resultados obtenidos.

Asimismo, se registró una disminución en la carga operante, pasando a 162.85 kg, así como una disminución en la cantidad total de barrenos, pasando de 28 a 26.

SECCIÓN 4X4		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	26
Número de tiros cargados	Unidades	26
Número de tiros sin carga	Unidades	0
Metros totales perforados	m	106.60
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	188.46
Carga operante	kg	162.85
Factor de carga	kg/m ³	2.07
Costo total de la perforación	\$	6765.00
Tasa de perforación por ronda	horas	1.35
Factor de potencia	kg/t	0.86

Ilustración 115. Reporte final del segundo ajuste.

Finalmente, en la Ilustración 116 se observan la plantilla base y los dos ajustes que se realizaron, estos en una vista 3D.

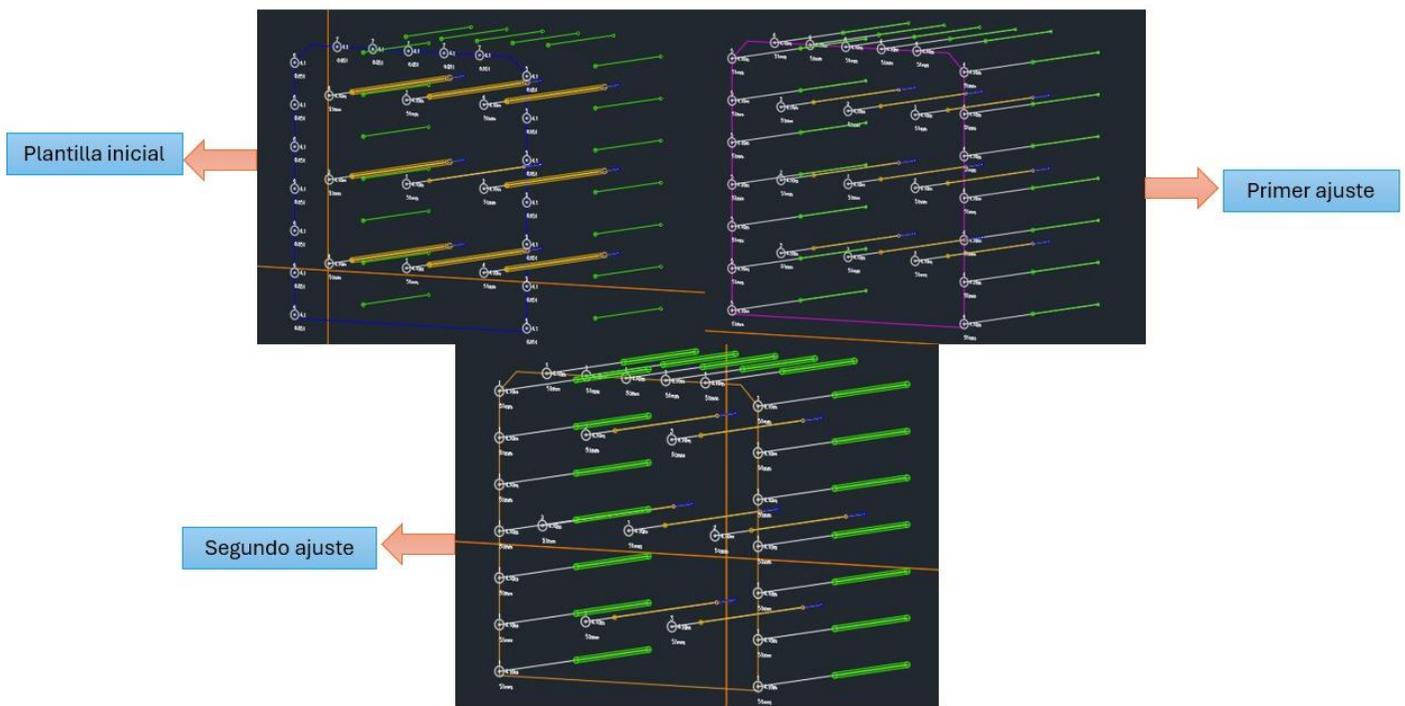


Ilustración 116. Vista lateral de las 3 plantillas realizadas para corte y relleno.

5.3.5 Diseño de la plantilla para el método de tumbe por subniveles

El módulo “Barrenación y Voladura Subterránea” ofrece diversas configuraciones para la generación de barrenos. En este análisis se presentarán los arreglos más comúnmente utilizados en la industria minera: la barrenación en abanico y la barrenación paralela. Si bien Promine permite trabajar con otros tipos de arreglos con características específicas, para este caso en particular se emplearán únicamente estos dos métodos, dado que son los más representativos y adecuados para los objetivos del presente trabajo.

5.3.5.1 Cálculo de bordo y espaciamiento para tumbe por subniveles

El cálculo del bordo y espaciamiento de esta plantilla se realizará tomando como base los resultados obtenidos de las fórmulas previamente utilizadas en apartados anteriores.

$$B = 0.012 \left(\frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) D_e$$

Donde:

$B = \text{Bordo}$

$SG_e = \text{Densidad del explosivo} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$

$SG_r = \text{Densidad de la roca} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$

$D_e = \text{Diámetro del explosivo (mm)}$

Fórmula 12. Para el cálculo del bordo de los barrenos auxiliares, piso, tablas y techo (Konya y Albarrán, 1998).

$$S = 1.1 B$$

$$T = 0.5 B$$

Fórmula 13. Para el cálculo de espaciamiento y taco en barrenos auxiliares (Konya y Albarrán, 1998).

Por lo tanto, de acuerdo con las propiedades previamente descritas tanto del explosivo como del mineral, el bordo y el espaciamiento son los siguientes:

$$B = 0.012 \left(\frac{2 \left(1.2 \frac{g}{cm^3} \right)}{3.0 \frac{g}{cm^3}} + 1.5 \right) 60mm$$

$$B = 1.66 m$$

$$S = 1.1 \times 1.66 m$$

$$S = 1.82 m$$

$$T = 0.5 (1.66 m)$$

$$T = 0.83 m$$

5.3.5.2 Generación de secciones y dimensiones del banco

El explosivo que se utilizará es el mismo que se empleó para corte y relleno, esto debido a que las propiedades de la roca son las mismas, por lo que para tumbe por subniveles es necesario delimitar las dimensiones del banco con el objetivo de establecer las longitudes de los barrenos y poder calcular la cantidad de explosivo que se empleará, para esto se tienen que diseñar las secciones como se observa en la Ilustración 117 y delimitar el contorno de la voladura como se observa en la Ilustración 118 con el recuadro de color blanco.

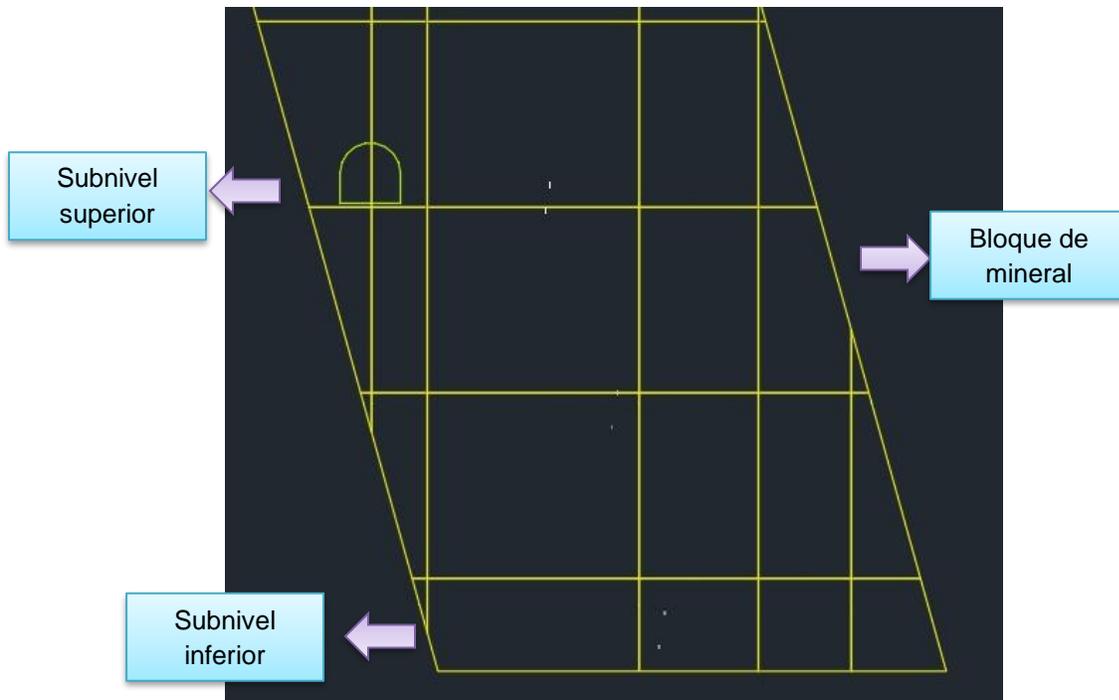


Ilustración 117. Corte de sección lateral para realizar la barrenación larga.

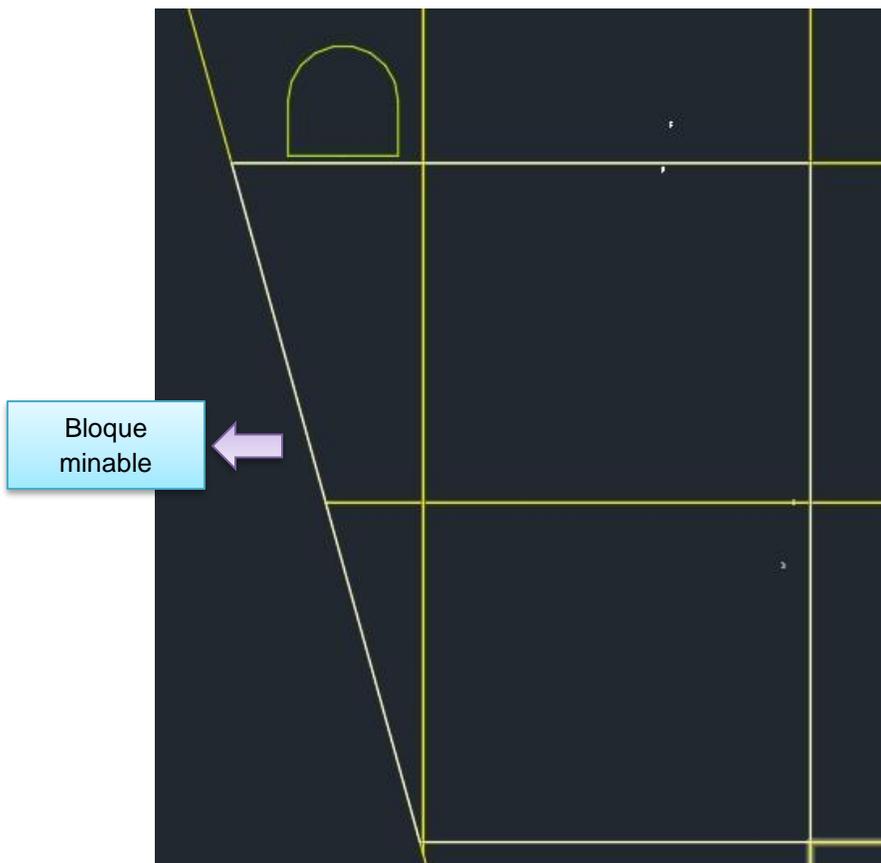


Ilustración 118. Delimitación de la barrenación larga (cuadro blanco) vista lateral.

Se mide la distancia máxima que podrían tener los barrenos y se obtuvo un valor de 34.07 m como se observa en la Ilustración 119, por lo que primeramente se utilizará la barrenación en abanico y se cargarán los barrenos dependiendo las longitudes obtenidas de los barrenos generados a partir del bordo y espaciamiento calculado.

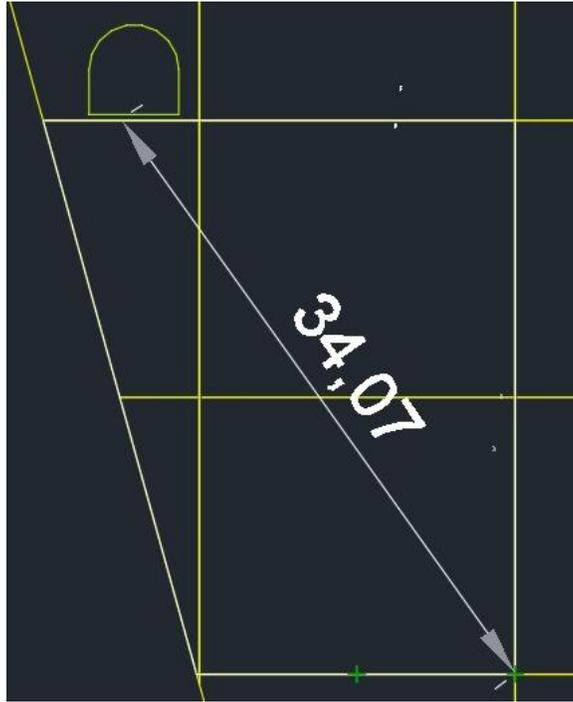


Ilustración 119. Longitud máxima desde el punto de pivote hasta el límite del banco.

5.3.5.3 Barrenación en abanico

Para la generación de los barrenos en abanico, se debe indicar el ángulo inicial y final, para luego introducir el espaciamiento entre puntos de pivote. Finalmente, se elige entre el espaciamiento o el número de barrenos.

La configuración que se usó para los barrenos fue la siguiente:

- Ángulo inicial: 116°
- Ángulo final: 68°
- Espaciamiento de pivoteo: 0.4 m
- Espaciamiento entre barrenos: 1.82 m

El cargado de los barrenos se realizará de la siguiente forma:

- Carga de fondo: 2 emulsiones de Senatel Magnafrac de 0.5 m cada una.
- Carga de columna: Para cada barreno se calculará con base a la siguiente formula.

$$C_{columna} = H - (T + C_{fondo})$$

Fórmula 14. Para la estimación de la carga de columna utilizando longitudes.

- Taco: 0.83 m

Los barrenos generados con estos parámetros desde una vista de planta se observan en la Ilustración 120, en la Ilustración 121 se observa una vista lateral y el análisis de energía de esta misma plantilla se observa en la Ilustración 122.

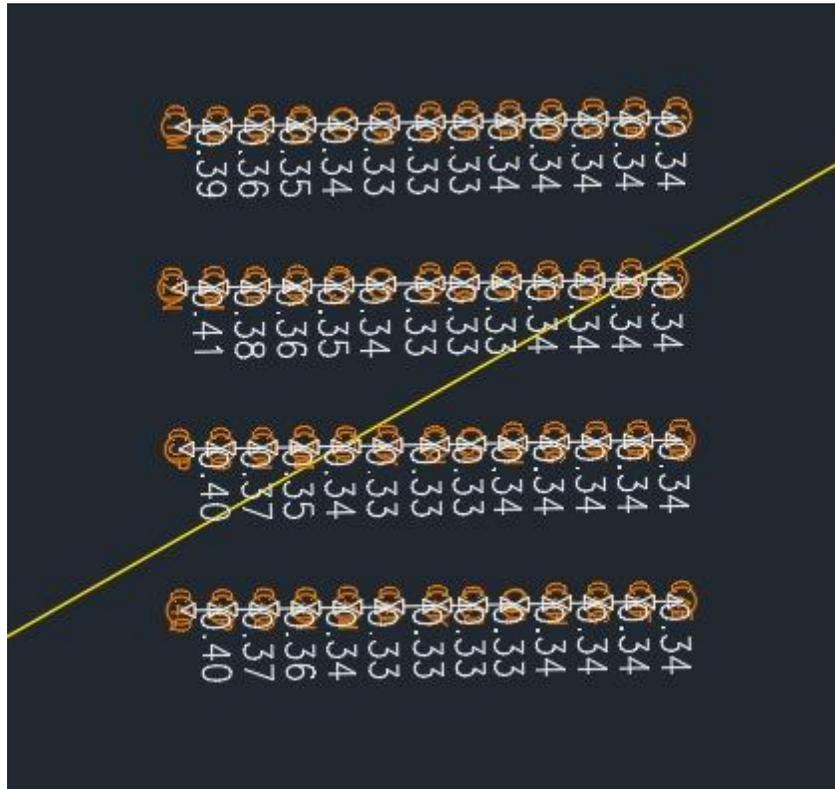


Ilustración 120. Plantilla vista desde planta.

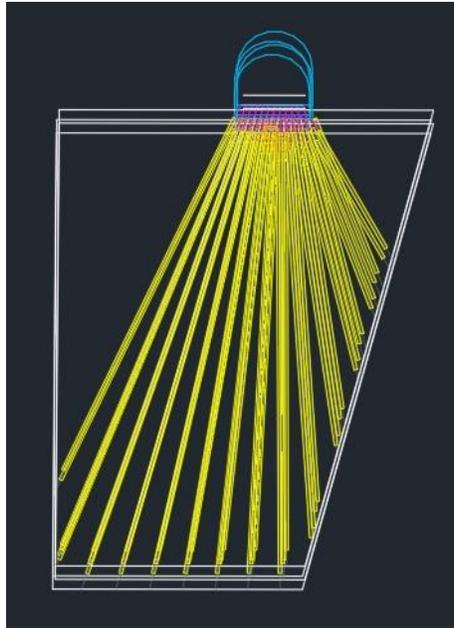


Ilustración 121. Barrenos vista lateral.

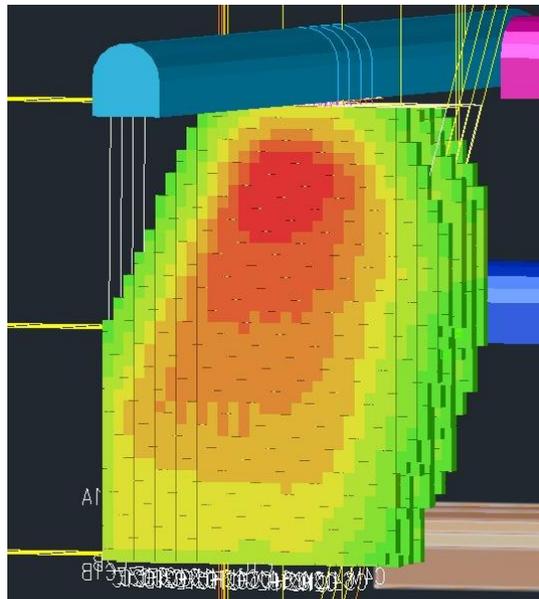


Ilustración 122. Análisis de energía de la plantilla en vista lateral 3D.

Si bien, al observar los barrenos en vista en planta parecen estar muy próximos entre sí, esto se debe a que el espaciamiento entre pivotes fue de 0.4 m. Sin embargo, al generarse los barrenos con el ángulo correspondiente, estos se separan de forma progresiva para mantener el espaciamiento al final del barreno en 1.82 m. Adicionalmente, el bordo utilizado es de 1.66 m, conforme a lo previamente determinado.

En el análisis de energía mostrado en la Ilustración 122, los resultados fueron óptimos, ya que la energía se concentró adecuadamente en el centro de la voladura. Aunque algunos rastros de energía sobrepasaron los límites de la zona de voladura, estos niveles no son lo suficientemente elevados como para provocar fracturamiento o grietas significativas. No obstante, se identificó una zona donde no se visualiza el análisis de energía, debido a las dimensiones de la obra y su ubicación. Esto impide la ejecución de barrenos en dicha área, ya que no es posible lograr la orientación y el ángulo adecuados. Por lo tanto, se considera importante tomar en cuenta estas limitaciones al diseñar el patrón de perforación.

Finalmente, la Ilustración 123 muestra el reporte general, el cual proporciona un resumen de los resultados obtenidos. No se elaboró un reporte detallado debido a la gran cantidad de información que esto implicaría, aunque el resumen permite visualizar de forma clara el desempeño esperado de la plantilla.

Resumen		
Tonelaje – TUMBE_1ABANICO	tons	2734
Tonelaje – TUMBE_2ABANICO	tons	2726
Tonelaje – TUMBE_3ABANICO	tons	2726
Tonelaje – TUMBE_4ABANICO	tons	2726
Tonelaje total	tons	10967
Longitud total de los tiros	m	1273.5
Explosivo – ANFO	kg	2141.7
Explosivo – SENATEL	kg	225.6
Peso total del explosivo	kg	2367.3
Taco – TAPON	kg	147
Densidad de la roca	kg/m ³	3.00
Factor de carga	kg/t	0.216

Ilustración 123. Resumen de la plantilla en abanico.

En dicho reporte se observa que se estarían tumbando un total de 10,967 toneladas de mineral con una cantidad de 2,367.3 kg de explosivo y con lo cual se obtiene un factor de carga de 0.216 kg/ton, valores que se encuentran dentro de los teóricos aceptables.

5.3.5.4 Barrenación en paralelo

La inserción de barrenos paralelos, al igual que el resto de los barrenos, se realiza mediante la herramienta "Inserción tiros". Posteriormente, se selecciona la opción correspondiente y se establece el espaciamiento de los tiros, previamente calculado. Además, se debe indicar el ángulo de inclinación.

La generación de secciones y el límite de la voladura se realizó de la misma forma que para los barrenos en abanico, asimismo el bordo previamente calculado se utilizará para esta plantilla.

Los parámetros con los que se diseñó la plantilla son los siguientes.

- Ángulo de los barrenos: - 90°
- Espaciamiento entre barrenos: 1.76 m
- Longitud de los tiros: 21.1 m

El cargado de los barrenos se realizará de la siguiente forma:

- Carga de fondo: 2 emulsiones de Senatel Magnafrac de 0.5 m cada una.
- Carga de columna: Para cada barreno se calculará con base a la siguiente fórmula.

$$C_{columna} = H - (T + C_{fondo})$$

Fórmula 15. Para la estimación de la carga de columna utilizando longitudes.

- Taco: 0.83 m

Se redujo el espaciamiento entre barrenos, ya que con el valor de 1.82 m únicamente se generaban dos barrenos por la dimensión de la obra y con el valor de 1.76 m se lograron generar 3 barrenos.

La plantilla se muestra en la Ilustración 124, en la Ilustración 125 se observa en una vista lateral y el análisis de energía correspondiente se observa en la Ilustración 126. Se aprecia una adecuada distribución de la energía en la zona de voladura; sin embargo, no se logró cubrir por completo el contorno, debido a la disposición de los barrenos y al hecho de que únicamente se generaron tres barrenos con el espaciamiento previamente mencionado.



Ilustración 124. Plantilla de barrenos paralelos vista desde planta.

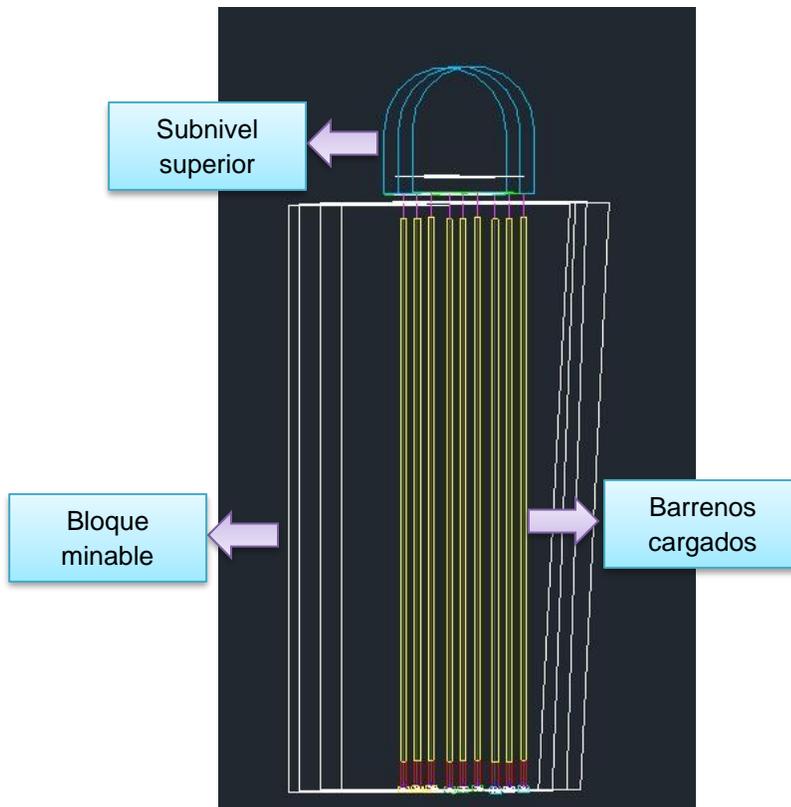


Ilustración 125. Barrenos vista lateral.

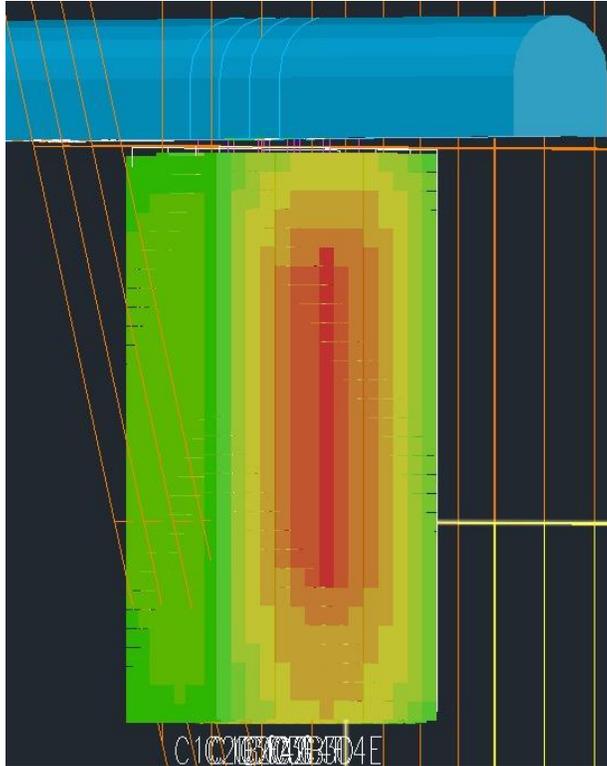


Ilustración 126. Análisis de energía de los barrenos paralelos en vista lateral 3D.

El reporte generado es el que se visualiza en la Ilustración 127 en el cual se obtuvieron los datos de un tonelaje total de 4,228 con 459.2 kg de explosivo y un factor de carga de 0.109 kg/t, el cual se encuentre por debajo de los valores teóricos y deberá de verificar que la fragmentación de la roca es la adecuada. Además, con este arreglo se obtuvo un menor tonelaje debido a la cantidad de barrenos utilizados, las dimensiones de la obra y la configuración de los barrenos.

Este tipo de barrenación aplicaría más a cuerpos uniformes y con un menor grado de buzamiento.

Resumen		
Tonelaje – TUMBE_1PARALELO	tons	1027
Tonelaje – TUMBE_2PARALELO	tons	1037
Tonelaje – TUMBE_3PARALELO	tons	1072
Tonelaje – TUMBE_4PARALELO	tons	1074
Tonelaje total	tons	4228
Longitud total de los tiros	m	253.7
Explosivo – ANFO	kg	416.3
Explosivo – SENATEL	kg	42.9
Peso total del explosivo	kg	459.2
Taco – TAPON	kg	34
Densidad de la roca	kg/m ³	3.00
Factor de carga	kg/t	0.109

Ilustración 127. Resumen de la plantilla con barrenos paralelos.

5.3.6 Diseño de la plantilla para el método de salones y pilares

Con respecto al método de salones y pilares, debido a sus características, se utilizará nuevamente el módulo de perforación y voladura de galerías, para generar la plantilla que se utilizará, primeramente, se deben generar los pilares en el modelo de bloques previamente creado. Esto se puede hacer igualmente utilizando las herramientas de Promine (Ilustración 128).

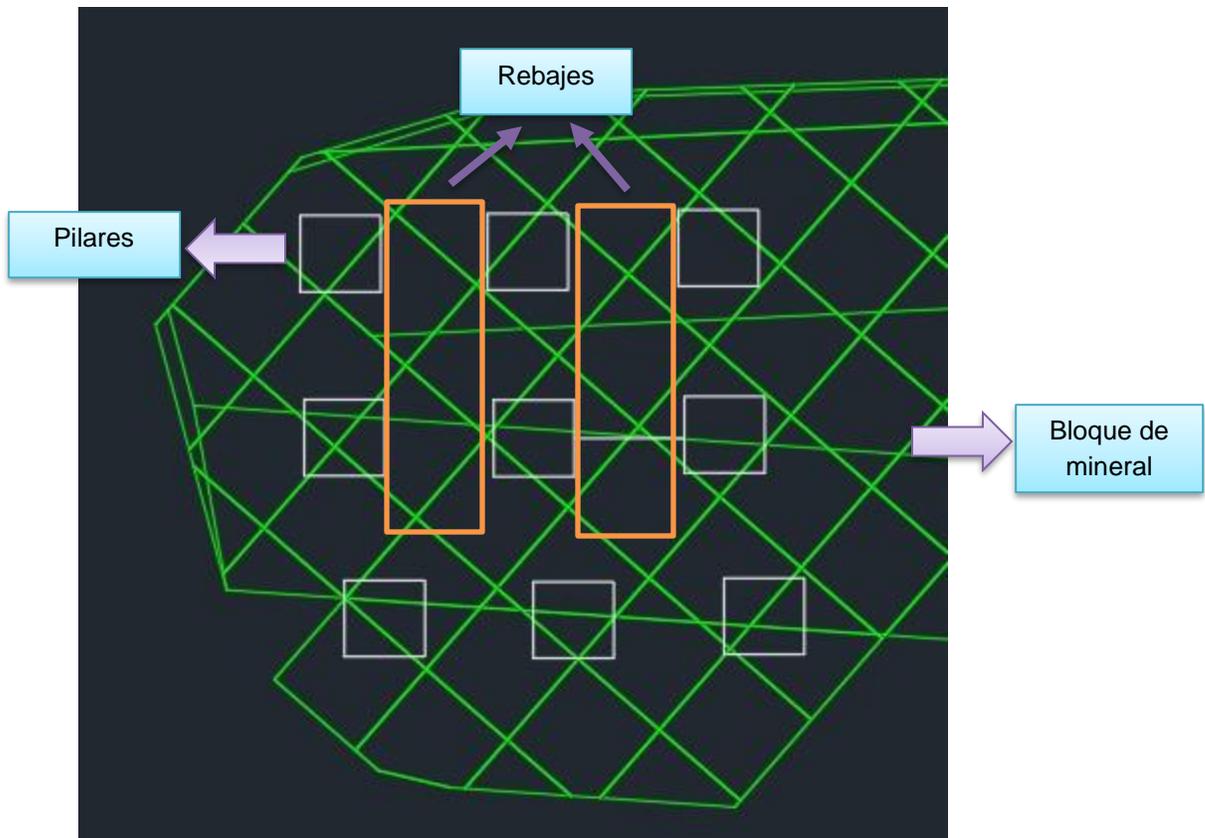


Ilustración 128. Generación de pilares en el modelo de bloques vista de planta.

5.3.6.1 Generación de secciones y dimensionamiento de la obra

Una vez generados los pilares, se procede a realizar las obras como el nivel de acceso y los frentes de explotación, las dimensiones de las obras de acceso serán de igual forma que en los anteriores casos de 5 m x 5 m, mientras que propiamente las obras de producción, es decir cuando se ingresa al mineral se ampliarán las secciones a 8 m x 7 m.

En la Ilustración 129 se observan las obras 3D generadas y en la Ilustración 130 se observan los cortes de las secciones generados con los perfiles de obra previamente descritos.



5.3.6.2 Cálculo de bordo y espaciamento salones y pilares

El cálculo del bordo y espaciamento de esta plantilla se realizará tomando como base el explosivo Senatel Magnafrac y un diámetro de barrenación de 51mm. Además, se usará la misma barra de 16 ft (4.8 m).

$$B = 0.012 \left(\frac{2SG_e}{SG_r} + 1.5 \right) D_e$$

Donde:

$B = \text{Bordo}$

$SG_e = \text{Densidad del explosivo} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$

$SG_r = \text{Densidad de la roca} \left(\frac{g}{cm^3} \right)$

$D_e = \text{Diámetro del explosivo (mm)}$

Fórmula 16. Para el cálculo del bordo de los barrenos auxiliares, piso, tablas y techo (Konya y Albarrán, 1998).

$$S = 1.1 B$$

$$T = 0.5 B$$

Fórmula 17. Para el cálculo de espaciamento y taco en barrenos auxiliares (Konya y Albarrán, 1998).

Por lo tanto, de acuerdo con las propiedades previamente descritas tanto del explosivo como del mineral, el bordo y el espaciamento son los siguientes:

$$B = 0.012 \left(\frac{2 \left(1.2 \frac{g}{cm^3} \right)}{3.0 \frac{g}{cm^3}} + 1.5 \right) 50mm$$

$$B = 1.38 m$$

$$S = 1.1 \times 1.38 m$$

$$S = 1.5 m$$

$$T = 0.5 (1.38 m)$$

$$T = 0.69m$$

5.3.6.3 Generación de plantilla

Se generó la plantilla utilizando como base los valores previamente calculados, empleando un acomodo de barrenos en tres bolillos, como se muestra en la Ilustración 131. El cargado de los barrenos se realizará de la misma manera que en el método de corte y relleno.

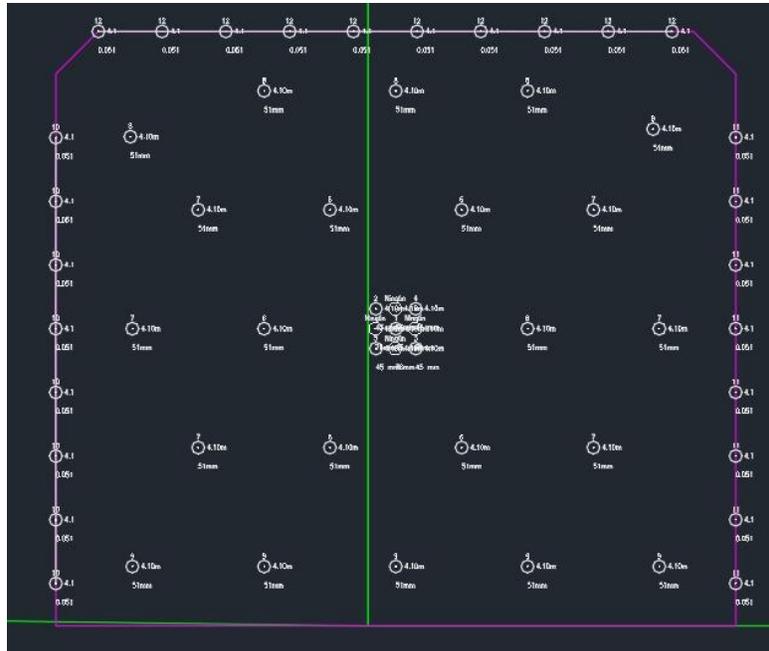


Ilustración 131. Plantilla generada con retardos para salones y pilares vista frontal.

Se generó el contorno de tiempos de los retardos (Ilustración 132) enfocándose en que la carga tumbada se fuera acomodando en el centro de la voladura.

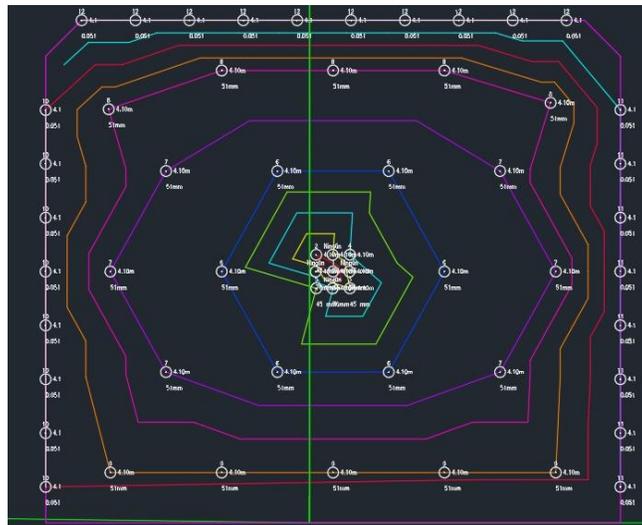


Ilustración 132. Contorno de tiempos de la plantilla generada para salones y pilares.

De igual forma se generó el análisis de energía el cual arrojó resultados favorables, es decir que la distribución de la energía se observa de manera uniforme, sin embargo, existen zonas a las cuales no se fragmento la roca lo que podría generar un contorno deficiente y un sobretamaño de la roca (Ilustración 133).

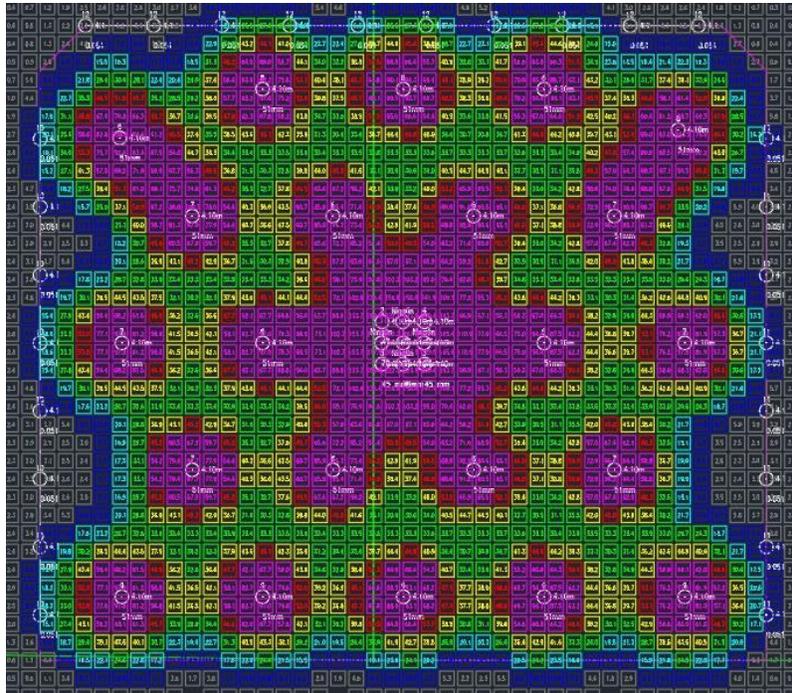


Ilustración 133. Análisis de energía de la plantilla para salones y pilares.

Finalmente, se generó el reporte en el cual se observó que se generaron 59 barrenos los cuales tumbaron 521.15 toneladas de mineral con un factor de carga de 1.51 kg/m³, lo que es equivalente a 0.63 kg/ton valor que es aceptable para este tipo de obras (Ilustración 134).

Sección 8 x 7		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	59
Número de tiros cargados	Unidades	55
Número de tiros sin carga	Unidades	4
Metros totales perforados	m	241.90
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	521.15
Factor de carga	kg/m ³	1.51
Costo total de la perforación	\$	17630.00
Tasa de perforación por ronda	horas	19.76
Carga operante	kg	328.95
Volumen roto	m ³	217.15

Ilustración 134. Reporte final de la plantilla para salones y pilares.

5.4.5.4 Ajuste de la plantilla

Se partió de la plantilla generada en el apartado anterior para realizar los ajustes, los cuales son aumentar añadir barrenos (recuadros amarillos) en las zonas en donde no se logró visualizar el análisis de energía (Ilustración 135). El resto de los parámetros se conserva, posteriormente se realizó el análisis de energía (Ilustración 136).



Ilustración 135. Primer ajuste de la plantilla de salones y pilares vista frontal.

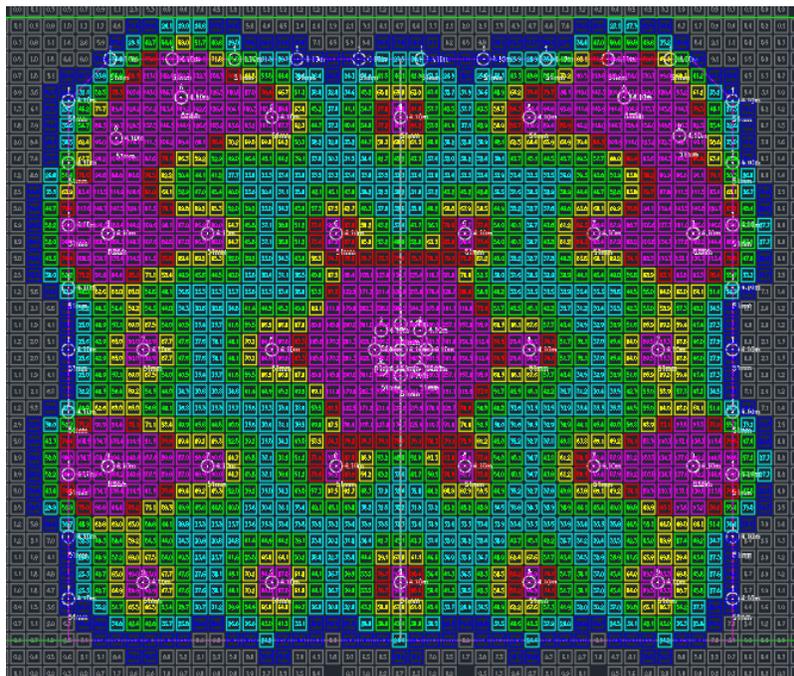


Ilustración 136. Análisis de energía ajustando el espaciado.

Dicho análisis muestra que la nueva distribución abarca el área de la voladura, no obstante, se observa como en la parte central comienza a disminuir la energía, que bien aún fragmentaría la roca, el aumentar la concentración de ANFO aumentaría la cantidad de energía liberada, no obstante, con este arreglo se puede partir para realizar las pruebas pertinentes y observar los resultados.

Se realizó un segundo ajuste, pero este modificando de tres bolillos a rectangular como se observa en la Ilustración 137, además se modificó la secuencia de los retardos como se observa en la Ilustración 138 de igual forma buscando que la carga se concentre en el centro.

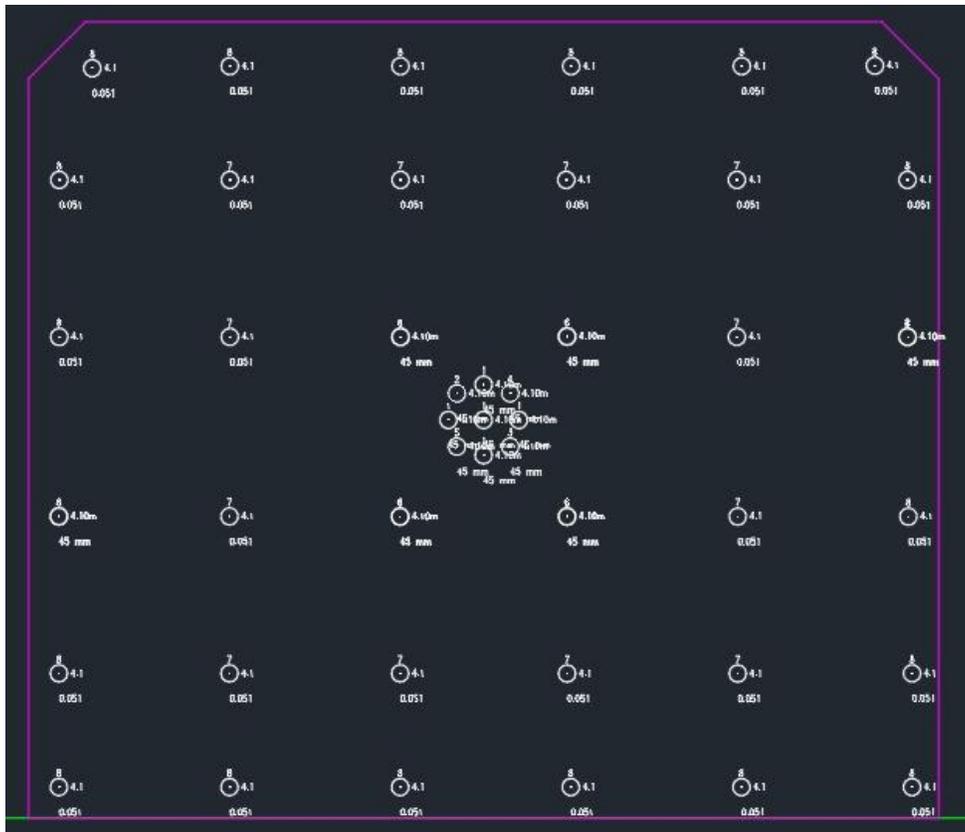


Ilustración 137. Plantilla rectangular para salones y pilares vista frontal.

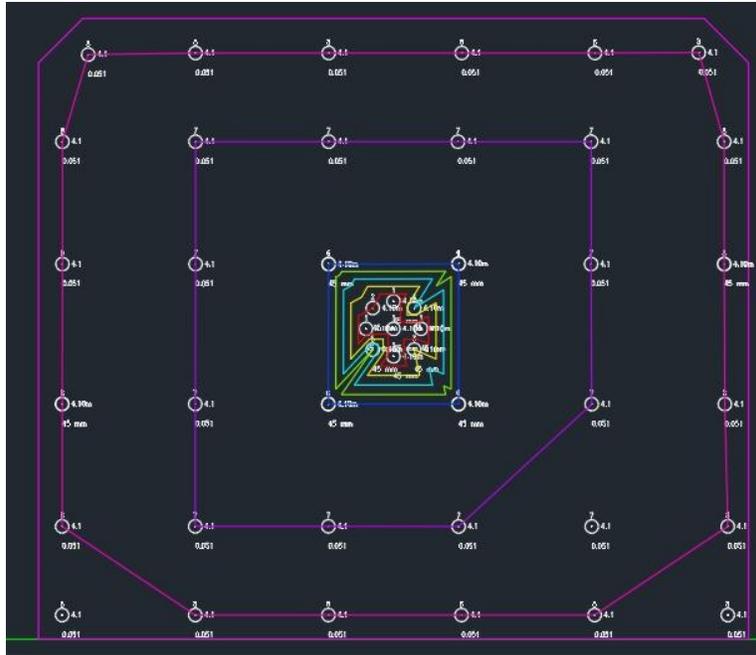


Ilustración 138. Contorno de tiempo de la plantilla rectangular.

Se generó el análisis de energía el cual muestra una distribución de energía aceptable, no obstante, existen zonas en donde se encuentra el barreno muy cercano y podría generar un sobrefracuramiento de la obra, Por otro lado, se identifican zonas marcadas con color azul rey en el centro de la obra, lo que indica una concentración mínima de energía (Ilustración 139). Esta situación deberá ser evaluada para verificar si dicha energía es suficiente para alcanzar la fragmentación requerida.

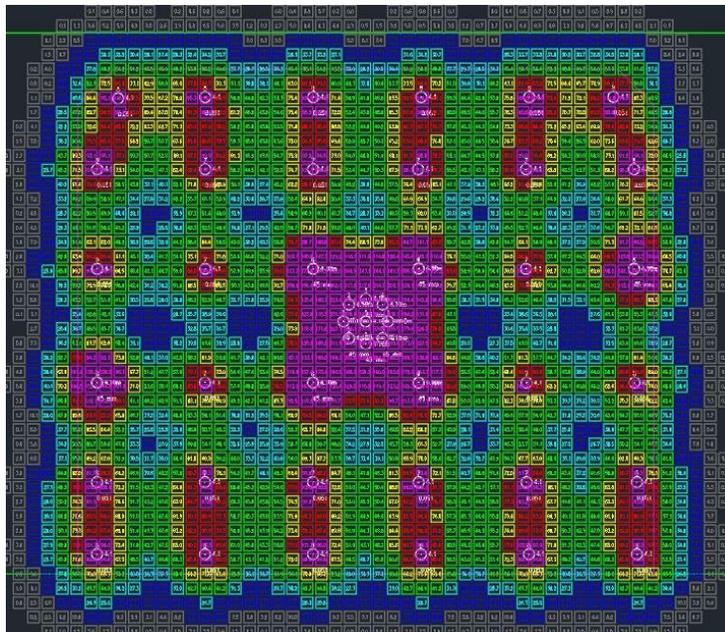


Ilustración 139. Análisis de energía del segundo ajuste de la plantilla.

Existen alternativas como, por ejemplo:

- Reducir la carga de los barrenos en algunas zonas y aumentar en otras.
- Reducir el bordo
- Colocar barrenos extras en caso de ser necesario

Cada opción es válida y dependerá de la experiencia y las condiciones bajo las que se opere cada unidad.

El reporte final generado se muestra en la Ilustración 140, en el cual se obtuvo un total de 521.15 toneladas tumbadas, utilizando 381.53 kg de explosivo, lo que arroja un factor de carga de 0.73 kg/ton, ya realizando la transformación de valores a partir del 1.76 kg/m³. Dicho valor aún se considera aceptable para este tipo de obras y las dimensiones de esta.

Sección 8 x 7		
Eficiencia de perforación (%)	%	100.0
Número de tiros perforados	Unidades	45
Número de tiros cargados	Unidades	41
Número de tiros sin carga	Unidades	4
Metros totales perforados	m	184.50
Avance	m	3.90
Tonelaje	tons	521.15
Factor de carga	kg/m ³	1.76
Costo total de la perforación	\$	12300.00
Tasa de perforación por ronda	horas	72.16
Carga operante	kg	381.53
Volumen roto	m ³	217.15

Ilustración 140. Reporte final del segundo ajuste.

Se muestra en la Ilustración 141 las tres plantillas generadas en vista 3D para salones y pilar.

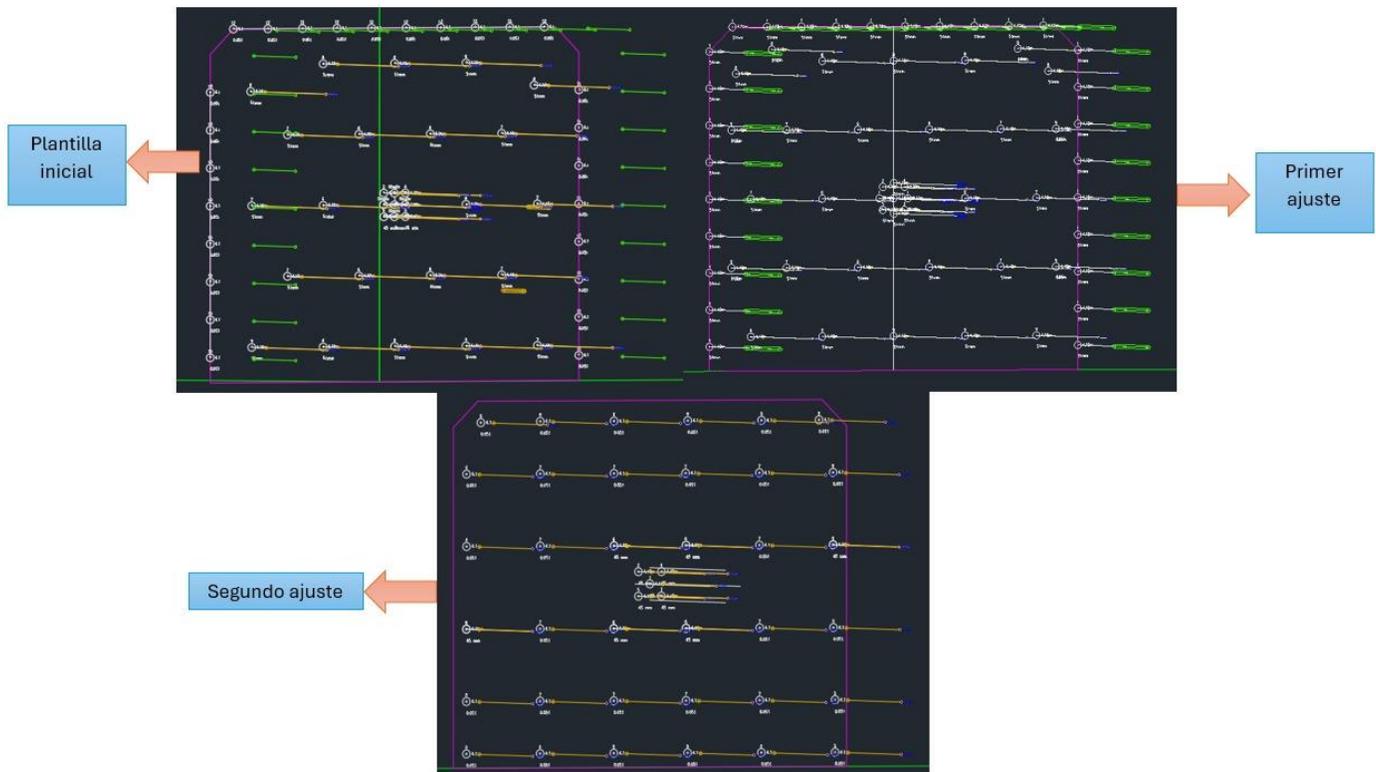


Ilustración 141. Plantillas generadas para salones y pilares en vista lateral 3D.

5.4 Análisis económico

Con el objetivo de complementar el análisis de las plantillas generadas, se realizará un breve análisis económico con los resúmenes arrojados por el propio software para las plantillas que se generaron con el módulo de perforación y voladura subterránea, ya que para las generadas con el módulo de galerías no se cuenta con tanto detalle sobre los costos, a excepción del costo total de perforación.

Por lo tanto, el análisis económico se realizará para las 2 plantillas generadas en el apartado de tumba por subniveles. Los costos de explosivo son similares a los que actualmente se manejan en el mercado:

- ANFO: Su precio es de \$780 por saco de 25 kg

- Senatel Magnafrac: Su precio unitario es de \$1,507, tomando como base el precio del Emulex 1.

El resto de los costos asignados son los que se observan en la Ilustración 142.

Costo de perforación/longitud	50.000
Costo de carga/longitud	100.000

Ilustración 142. Costo de perforación y cargado para plantillas de producción.

Se debe considerar que todos los costos asignados fueron registrados en moneda nacional, es decir, pesos mexicanos (MXN)

Para la plantilla de abanico en tumbé, los valores obtenidos se observan en la Ilustración 143.

Resumen de voladura	
Longitud de perforación:	1273
Explosivo:	2280
Taco:	147
Tapón:	46
\$ Costo de perforación:	63673
\$ Costo de cargado:	127346
\$ Costo del explosivo:	1879713
\$ Costo de taco:	147
Total (\$):	2070879

Ilustración 143. Resumen de costos de la plantilla de abanico.

Mientras que para la plantilla de barrenos en paralelo los costos se observan en la Ilustración 144.

Resumen de voladura	
Longitud de perforación:	254
Explosivo:	459
Taco:	34
Tapón:	12
\$ Costo de perforación:	12683
\$ Costo de cargado:	25366
\$ Costo del explosivo:	389309
\$ Costo de taco:	34
Total (\$):	427391

Ilustración 144. Resumen de costos de la plantilla de barrenos paralelos.

Finalmente, se generó una tabla comparativa para observar la plantilla con mejores resultados y un mejor costo (Tabla 14).

Tabla 14. Comparación entre plantillas generadas con base a tonelaje, explosivo, factor de carga y costo por tonelada.

Plantilla	Tonelaje	Explosivo total (kg)	Factor de carga (kg/t)	Costo por tonelada (MXN)
Abanico	10,967	2,280	0.216	MXN 188.82
Paralela	4,228	459	0.109	MXN 101.05

Dentro de la Tabla 14 se observa que la plantilla con un menor costo es la barrenación en paralelo

Esto se debe a la cantidad de explosivo utilizado por tonelada movida, es decir, al factor de carga. De igual manera, la plantilla con el factor de carga más bajo es la plantilla en paralelo

No obstante, recordemos que los resultados de la plantilla paralela no fueron tan favorables, según el análisis de energía generado, ya que existieron zonas donde no se presentó el análisis. Por lo tanto, había un riesgo de sobretamaños que tendrían que ser reducidos con otras técnicas, lo que implicaría un mayor costo.

Por otro lado, la plantilla de abanico presentó mejores resultados obteniendo un mayor tonelaje, una mayor cantidad de influencia del análisis de energía y un factor de carga de igual forma aceptable.

Esto demuestra que se generaron plantillas con resultados dentro del análisis de energía y los resúmenes de la voladura, óptimos, así como los costos empleados para ejecutarlas, igualmente dentro de un intervalo aceptable.

Es así como esta herramienta, que permite al software generar un pequeño resumen de los costos de la voladura, puede ser útil tanto para las personas encargadas como para los estudiantes que estén utilizando esta herramienta. Les permite obtener un panorama general y tener un control sobre los resultados de las voladuras y sus costos asociados. De este modo, se pueden identificar áreas de mejora que optimicen los procesos, maximizando el uso de recursos y, a su vez, reduciendo costos operativos.

6. Conclusiones

Se expone que el uso de software especializado representa una herramienta fundamental en la formación de las y los alumnos. La posibilidad de simular múltiples escenarios, analizar grandes volúmenes de información y generar plantillas de barrenación optimizadas permite consolidar conocimientos técnicos sobre el comportamiento de los explosivos y los parámetros que influyen en su desempeño.

Asimismo, se evidenció que las plantillas y configuraciones generadas mediante el software pueden ser complementadas con otras herramientas de análisis, como estudios de mecánica de rocas, análisis del comportamiento de explosivos y el uso de equipos con sensores para validar datos en campo. Esto refuerza la importancia de integrar tecnologías digitales en la educación, preparando egresadas y egresados con habilidades prácticas y competitivas.

El software permitió realizar ajustes de manera ágil, generar reportes y evaluar configuraciones con facilidad, lo cual reduce errores, optimiza recursos y mejora la toma de decisiones. Además, ofrece la posibilidad de adaptar los diseños a condiciones geológicas específicas, brindando una base sólida para su aplicación en situaciones reales.

En síntesis, la incorporación de estas herramientas digitales no solo mejora los procesos de diseño y evaluación, sino que también fortalece el aprendizaje práctico de las y los alumnos, facilitando su transición al entorno profesional actual, cada vez más tecnificado y exigente.

7. Recomendaciones

Como último apartado, se recomienda realizar una mayor cantidad de casos de estudio prácticos con las y los estudiantes sobre el uso del software para el análisis de voladuras y los patrones de barrenación. Además, es pertinente que este enfoque se implemente de manera progresiva, es decir, que en los semestres iniciales se introduzcan los conceptos básicos y se les asigne un caso general y no tan extenso para aplicar los conocimientos adquiridos. Posteriormente, se debe profundizar en las particularidades de los casos prácticos y en la mayor cantidad posible de variantes a considerar. Esto tiene como objetivo que las y los alumnos cuenten con bases sólidas y que la complejidad de los escenarios evolucione en concordancia con su desarrollo académico y capacidad de análisis.

Por otro lado, también se recomienda fortalecer la vinculación entre empresa y universidad, con el fin de que los conocimientos adquiridos y los casos modelados puedan ponerse a prueba en contextos reales. Esta interacción permitirá retroalimentar los análisis realizados, mejorar la calidad de la información, el modelado y, por ende, los resultados obtenidos. Asimismo, este tipo de colaboración permite que las empresas visualicen las capacidades del estudiantado, lo cual podría generar nuevas oportunidades profesionales para las y los alumnos.

Finalmente, se sugiere generar y administrar una base de datos que almacene cada uno de los casos, junto con su información de modelado y resultados, con el propósito de que funcione como un repositorio accesible para las nuevas generaciones de estudiantes. Este banco de información podrá ser utilizado como referencia para nuevos proyectos, haciendo que el conocimiento sea escalable, evolutivo y útil a lo largo del tiempo.

8. Referencias

- Austin Powder México. (2025). *Productos*. Austin Powder. Recuperado de <https://austinpowder.com/mexico/home/>
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J., & Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y voladura de rocas en minería*. E.T.S. de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <https://oa.upm.es/21848/>
- Bongiorno, F. (s.f.). *Índice de calidad de la roca RQD. Clasificaciones de los macizos rocosos según: Barton, Bieniawski, Hoek y Brown*. Universidad de los Andes. Recuperado de https://www.academia.edu/37308158/%C3%8DNDICE_DE_CALIDAD_DE_LA_ROCA_RQD_CLASIFICACIONES_DE_LOS_MACIZOS_ROCOSOS_SEG%C3%9AN
- Candelaria Mining Corp. (2018). *Study for the Pinos Project, Zacatecas, Mexico*.
- Epiroc. (2025). *Equipos de perforación*. Recuperado de <https://www.epiroc.com/es-es/products/drill-rigs>
- EXSA. (2006). *Manual práctico de voladura* (4ª ed.). EXSA. Recuperado de https://www.academia.edu/14518880/Manual_de_voladura
- ISEE. (2008). *Manual del Especialista en Voladura* (17ª ed.). International Society of Explosives Engineers. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/402914031/ISEE-Manual-del-Especialista-en-Voladura-pdf>
- Konya, C. J., & Albarrán N., E. (1998). *Diseño de voladuras*. Cuicatl. Recuperado de https://www.academia.edu/28310007/MANUAL_KONYA
- López Jimeno, E. (1982). *Influencia de las propiedades de las rocas y de los macizos rocosos en el diseño y resultado de las voladuras*. Recuperado de <http://hdl.handle.net/2183/5795>
- Orica Mining Services. (2025). *Senatel Magnafrac*. Recuperado de https://www.oricaminingservices.com/es/es/product/products_and_services/package_d_explosives/page_packaged_explosives/senatel_magnafrac/1371
- Perniá Llera, J. M., López Jimeno, C., Pla Ortiz de Urbina, F., & López Jimeno, E. (1987). *Manual de perforación y voladura de rocas*. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/317978295/MANUAL-DE-PERFORACION-LOPEZ-JIMENO-pdf>
- Pérez Álvarez, R., & Barral Ramón, N. (s.f.). *Bloque III. Rotura y cálculo de voladuras*. Universidad de Cantabria. Recuperado de <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2194/course/section/2056/BLOQUE-III.pdf>
- Promine. (s.f.). *Soluciones para el día a día minero*. <https://promine.com/es/>

- Ramírez Oyanguren, P., & Alejano Monge, L. R. (2004). *Mecánica de rocas: Fundamentos e ingeniería de taludes*. Recuperado de https://www.academia.edu/36903342/Mec%C3%A1nica_d_Fundamentos_e_Ing_de_Rocas_enier%C3%ADa_de_Taludes
- Reyes C., B. (2005). *Métodos de explotación*. Departamento de Ingeniería en Minas, Universidad de Santiago de Chile. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/167407184/Libro-Metodos-de-Explotacion>
- Secretaría de Trabajo y Previsión Social (STPS). (2003). *NOM-023-STPS-2003: Minas subterráneas y minas a cielo abierto – Condiciones de seguridad y salud en el trabajo: STPS*.