



UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil en Minas

**“AVANCE Y DESARROLLO DE GALERIAS”**

Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Civil de Minas

María José Muñoz Beroiza

Profesor guía: Norman Villarroel Valderrama

Santiago de Chile  
Enero, 2019

## **AGRADECIMIENTOS**

*Quiero agradecer especialmente a mis padres, por entregarme la oportunidad de poder estudiar esta carrera profesional, también a mis hermanos y abuelas que formaron parte de este largo proceso.*

*A mi pololo Francisco Prieto por apoyarme, ayudarme y aconsejarme durante todo el proceso de mi carrera profesional.*

*A mis gatitas Miel, Luly y Kochü por alegrarme todos los días, especialmente a mi Kochü por haberme acompañado durante todo el proceso de estudio de mi tesis.*

*Finalmente dar agradecimientos a Gladys Ugas y Carlos Vásquez por su amistad incondicional.*

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	2
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	12
Objetivo Principal.....	13
Objetivos Específicos .....	13
<b>1.- ANTECEDENTES</b> .....	14
1.1-Orígenes de las construcciones subterráneas .....	14
<b>2.- TÚNELES MINEROS</b> .....	17
<b>3.- ESTUDIOS PRELIMINARES</b> .....	18
3.1-Estudios geológicos y geotécnicos del terreno.....	18
3.2-Sondeos .....	20
3.3-Galerías de reconocimiento.....	22
<b>4.- SISTEMAS DE AVANCE</b> .....	23
4.1- Método Inglés.....	25
4.2- Método Belga .....	26
4.3- Método Austriaco.....	28
4.4- Nuevo método Austriaco.....	29
4.5- Método Alemán.....	30
4.6- Método Italiano .....	31
4.7- Sección completa .....	32
4.8- Doble sección .....	33
4.9- Galería piloto.....	33
<b>5.- MÉTODOS DE EXCAVACIÓN</b> .....	34
5.1- Perforación y tronadura.....	35
5.2- TBM (Tunnel Boring Machine) .....	37
<b>6.- CLASIFICACIÓN DE LAS PERFORACIONES</b> .....	41
6.1- Según el método mecánico de perforación .....	42
6.1.1- Métodos rotopercutivos .....	42
6.1.2- Métodos rotativos .....	44
6.2- Según el tipo de maquinaria.....	45

6.2.1- Perforación Manual .....	45
6.2.1- Perforación Mecanizada .....	46
6.3- Accesorios de perforación.....	47
6.3.1. Roscas .....	47
6.3.2. Adaptadores .....	47
6.3.3. Varillaje.....	48
6.3.4. Manguitos .....	49
6.3.5. Brocas .....	50
<b>7.- TRONADURA.....</b>	<b>52</b>
7.1- Explosivos .....	52
7.2- Características generales de los explosivos.....	53
7.2.1- Estabilidad química .....	53
7.2.2- Sensibilidad .....	53
7.2.3- Velocidad de detonación (VOD).....	54
7.2.4- Potencia explosiva.....	54
7.2.5- Densidad de encartuchado.....	54
7.2.6- Resistencia al agua .....	55
7.2.7- Volumen de gases.....	55
7.3- Tipos de Explosivos .....	56
7.3.1- Dinamita .....	56
7.3.2- Slurries y Aquageles.....	58
7.3.3- Nitrocarbonitratos.....	60
7.3.4- Iniciadores y rompedores ADP .....	63
7.3.5- Emulsiones .....	64
7.3.6- Anfo pesados .....	66
7.4- Accesorios de tronadura.....	68
7.4.1- Fulminante simple N°8.....	68
7.4.2- Mecha de seguridad.....	69
7.4.3- Mecha rápida .....	71
7.4.4- Detonador ensamblado .....	72
7.4.5- Detonador no eléctrico .....	73
7.4.6- Detonador eléctrico .....	75
7.4.7- Línea silenciosa .....	75
7.4.8- Cordón detonante.....	76

7.4.9- Booster.....	77
<b>8.- FORTIFICACIÓN .....</b>	<b>78</b>
8.1-Marcos de madera .....	80
8.1.2. Componentes del marco de madera .....	81
8.2-Marcos metálicos o de acero rígido .....	83
8.3-Mallas de acero .....	85
8.4-Pernos.....	88
8.4.1-Pernos anclados mecánicamente .....	88
8.4.2- Pernos anclados con resina o cemento. ....	90
8.4.3- Pernos anclados por fricción .....	93
8.5-Cables de acero .....	97
8.6-Shotcrete.....	99
8.6.1-Métodos de aplicación del shotcrete.....	99
<b>9.- PROYECTO TÚNEL .....</b>	<b>105</b>
9.1. Método postulado por Roger Holmberg para el diseño y cálculo de los parámetros de perforación y tronadura para minería subterránea y túnelería.....	105
9.2. Cálculo de la Malla.....	107
9.2.1. Diagrama teórico.....	107
9.2.2 Cálculos para la rainura .....	108
9.2.3. Cálculo de las zapateras.....	117
9.2.4. Cálculo de los tiros de corona.....	120
9.2.5. Cálculo de los tiros de cajas.....	121
9.2.6. Cálculo de tiros auxiliares.....	124
9.3- Resultados finales.....	129
<b>CONCLUSIÓN .....</b>	<b>132</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>133</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. MINA DAROCA (FUENTE: HISTORIA DE LOS TÚNELES Y SU EVOLUCIÓN HISTÓRICA, STUDYLIB).....	15
ILUSTRACIÓN 2. TÚNEL DE MALPAS (FUENTE: TRIPADVISOR).....	16
ILUSTRACIÓN 3. TIPOS DE TESTIGOS (FUENTE: SONDEOS EN TÚNELES DE BRAVO, M). ....	21
ILUSTRACIÓN 4. DIAGRAFÍAS DE TELEVIWER ACÚSTICO (FUENTE: SONDEOS EN TÚNELES DE BRAVO, M).....	21
ILUSTRACIÓN 5. SISTEMA DE AVANCE EN TÚNELES (FUENTE: MANUAL DE P Y V, LÓPEZ JIMENO).....	23
ILUSTRACIÓN 6. TIPOS DE CUELES (FUENTE: MANUAL DE TÚNELES, CAP. 7).....	24
ILUSTRACIÓN 7. FASES DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO INGLÉS (FUENTE: EL MÉTODO INGLÉS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES, YEPES V) .....	25
ILUSTRACIÓN 8. ENUMERACIÓN DEL ORDEN DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO BELGA (FUENTE : USO E IMPORTANCIA DE LOS TÚNELES ,PREZI ). .....	27
ILUSTRACIÓN 9. ESQUEMA DE EJECUCIÓN DE UN TÚNEL POR EL MÉTODO BELGA (FUENTE: MÉTODO BELGA DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES, YEPES V). ....	28
ILUSTRACIÓN 10. ENUMERACIÓN DEL ORDEN DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO AUSTRIACO (FUENTE: MÉTODO DE EXCAVACIÓN AUSTRIACO, EL PAÍS).....	29
ILUSTRACIÓN 11. TÚNEL DE ALBERTIA ELABORADO A TRAVÉS DEL NUEVO MÉTODO AUSTRIACO .....	30
ILUSTRACIÓN 12. ENUMERACIÓN DEL ORDEN DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO ALEMÁN (FUENTE: MÉTODO ALEMÁN DE CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES, YEPES V) .....	31
ILUSTRACIÓN 13. ENUMERACIÓN DEL ORDEN DE EXCAVACIÓN DEL MÉTODO ITALIANO (FUENTE: TÚNELES, CERES (2010)).....	32
ILUSTRACIÓN 14. COSTO SEGÚN LONGITUD DEL TÚNEL EXCAVADO PARA LOS MÉTODOS CON TBM Y PERFORACIÓN Y TRONADURA (FUENTE: PUTZMEISTER). ....	34
ILUSTRACIÓN 15. CICLO DE PERFORACIÓN Y TRONADURA. (FUENTE: PUTZMEISTER).....	36
ILUSTRACIÓN 16. COMBINACIÓN DE LAS CUATRO ACCIONES EN LA PERFORACIÓN (FUENTE: PERFORACIÓN, GONZALES, F (2016))......	41

ILUSTRACIÓN 17. (A) PERFORACIÓN CON MARTILLO EN CABEZA ( TOPHAMMER) , (B) PERFORACIÓN CON MARTILLO EN FONDO (DOWN THE HOLE) ( FUENTE :TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 2 , BERGER , E) .....	43
ILUSTRACIÓN 18. COMBINACIÓN DE LAS TRES ACCIONES QUE ACTÚAN EN LA PERFORACIÓN ROTATIVA (FUENTE: PERFORACIÓN DE ROCAS, SLIDESHARE).....	44
ILUSTRACIÓN 19. DIFERENTES SECCIONES DE TÚNELES (FUENTE: PERFORACIÓN Y TRONADURA SUBTERRÁNEA GUZMÁN,R. (2012)).....	45
ILUSTRACIÓN 20. PERFORACIÓN MANUAL (FUENTE: TECNOLOGIAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 2 , BERGER , E). .....	46
ILUSTRACIÓN 21. JUMBOS DE PERFORACIÓN FRONTAL UTILIZADOS DEPENDIENDO LA SECCIÓN DEL TÚNEL (FUENTE: ATLAS COPCO). .....	46
ILUSTRACIÓN 22. TIPOS DE ROSCAS (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3, BERGER, E). .....	47
ILUSTRACIÓN 23. ADAPTADORES DE LEYNER Y ESTRIADOS (FUENTE: MANUAL DE P Y T DE LÓPEZ JIMENO, C). .....	48
ILUSTRACIÓN 24. TIPOS DE VARILLA. (FUENTE: P Y T DE LOPEZ JIMENO ,C). .....	49
ILUSTRACIÓN 25. (A) BARRENAS TIPO CINCEL, (B) BARRENAS DE INSERTOS MÚLTIPLES Y (C) BARRENA DE BOTONES (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3, BERGER, E). .....	49
ILUSTRACIÓN 26. (A) SIMPLE, (B) SEMIPUENTE, (C) PUENTE, (D) ESTRÍAS Y (E) ALETAS DE GRAN DIÁMETRO (FUENTE: MANUAL DE P Y T DE LÓPEZ JIMENO, C). .....	50
ILUSTRACIÓN 27. (A) BROCA EN CRUZ Y (B) BROCA EN X (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3, BERGER, E). .....	51
ILUSTRACIÓN 28. BROCA DE BOTONES. (FUENTE: BROCA DE PERFORACIÓN DE BOTONES , DIRECT INDUSTRY).....	51
ILUSTRACIÓN 29. BROCAS RETRACTILES (FUENTE: MANUAL DE P Y T DE LÓPEZ JIMENO, C). .....	52
ILUSTRACIÓN 30. CLASIFICACIÓN DE LOS EXPLOSIVOS (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3, BERGER, E). .....	52
ILUSTRACIÓN 31. CONSIDERACIONES PARA LA SELECCIÓN DE EXPLOSIVOS (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3 DE BERGER, E).....	56

ILUSTRACIÓN 32. AMONGELATINA 60% (FUENTE: ENAEX).....	57
ILUSTRACIÓN 33. TRONEX PLUS (FUENTE: ENAEX).....	57
ILUSTRACIÓN 34. PERMICARB (FUENTE: ENAEX). ....	58
ILUSTRACIÓN 35. HIDREX (FUENTE: ENAEX). ....	59
ILUSTRACIÓN 36. DYNOLITE Y DYNOGEL (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3 DE BERGER, E).....	59
ILUSTRACIÓN 37. ANFO PREMIUM (FUENTE: ENAEX). ....	60
ILUSTRACIÓN 38. ANFO A GRANEL (FUENTE :ENAEX).....	61
ILUSTRACIÓN 39. ANFO ALUMINIZADO (FUENTE: ENAEX).....	62
ILUSTRACIÓN 40. ANFO LIVIANO (FUENTE: ENAEX).....	63
ILUSTRACIÓN 41. INICIADORES CILÍNDRICOS APD-P (FUENTE: ENAEX). ....	64
ILUSTRACIÓN 42. EMULEX (FUENTE: ENAEX). ....	65
ILUSTRACIÓN 43. CAMIONES TIPO QUADRA (FUENTE: ENAEX).....	66
ILUSTRACIÓN 44. ESTRUCTURA DEL ANFO PESADO (FUENTE: EXPLOSIVOS: TIPOS Y PROPIEDADES DE WATANABE,J (2014)).....	67
ILUSTRACIÓN 45. CARACTERÍSTICAS DE CARGA Y RESISTENCIA AL AGUA DE DIFERENTES TIPOS DE ANFO PESADO (FUENTE: DU PONT, 1986).....	68
ILUSTRACIÓN 46. COMPONENTES DEL FULMINANTE N°8 (FUENTE: AGENTES DE VOLADURA SENSIBLE AL FULMINANTE N°8, SALAZAR,K. (2017) ). ....	69
ILUSTRACIÓN 47. MECHA DE SEGURIDAD (FUENTE: TECNOVOLADURAS). ....	70
ILUSTRACIÓN 48. MECHA RÁPIDA (FUENTE : FAMESA). ....	71
ILUSTRACIÓN 49. VISTA EN CORTE-ELEVACIÓN Y VISTA EN PLANTA DEL DETONADOR NO ELÉCTRICO- TRADICIONAL (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3, BERGER, E). ....	73
ILUSTRACIÓN 50. COMPONENTES DEL DETONADOR NO ELÉCTRICO – SILENCIOSO (FUENTE: TECNOLOGÍAS DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3 DE BERGER, E).....	74
ILUSTRACIÓN 51. LÍNEA SILENCIOSA (FUENTE : IPG).....	76
ILUSTRACIÓN 52. BOOSTER (FUENTE: ENAEX).....	77
ILUSTRACIÓN 53. TIPOS DE FORTIFICACIONES PARA TÚNELES (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	80

ILUSTRACIÓN 54. COMPONENTES DE UN MARCO DE MADERA (FUENTE: GUÍA N° 5 DE OPERACIÓN PARA LA PEQUEÑA MINERÍA DE FORTIFICACIÓN Y ACUÑADURA , SERNAGEOMIN). .....	81
ILUSTRACIÓN 55. DETALLES DEL MARCO DE ACERO (FUENTE: FORTIFICACIÓN DE MINAS, SERNAGEOMIN). .....	84
ILUSTRACIÓN 56. MARCO DE ACERO (FUENTE: MARCO DE ACERO, INDUSTRIA MINERA) .....	84
ILUSTRACIÓN 57. ILUSTRACIÓN 58. MALLAS ELECTROSOLDADAS (FUENTE: FORTIFICACIÓN DE MINAS, SERNAGEOMIN).....	86
ILUSTRACIÓN 58. MALLA TEJIDA O DE BIZCOCHO (FUENTE: FORTIFICACIÓN DE MINAS, SERNAGEOMIN). .....	87
ILUSTRACIÓN 59. PERNO CON TUERCA (FUENTE: MANUAL DE GEOMECÁNICA APLICADA A LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES POR CAÍDA DE ROCAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA, SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA. (2005)). .....	89
ILUSTRACIÓN 60. PERNOS ANCLADOS CON RESINA O CEMENTO (FUENTE: MANUAL DE GEOMECÁNICA APLICADA A LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES POR CAÍDA DE ROCAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA, SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA. (2005)). .....	91
ILUSTRACIÓN 61. PERNO SPLIT SET (FUENTE: MANUAL DE GEOMECÁNICA APLICADA A LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES POR CAÍDA DE ROCAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA, SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA. (2005)). .....	94
ILUSTRACIÓN 62. PERNO SWELLEX (FUENTE: MANUAL DE GEOMECÁNICA APLICADA A LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES POR CAÍDA DE ROCAS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA, SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA. (2005)). .....	96
ILUSTRACIÓN 63. COMPONENTES DE UN CABLE DE ACERO (FUENTE: FORTIFICACIÓN DE MINAS, SERNAGEOMIN).....	98
ILUSTRACIÓN 64. PROYECCIÓN POR VÍA SECA (FUENTE: MÉTODOS POR VÍA SECA O VÍA HÚMEDA DE MUÑOZ, J. (2017)). .....	100
ILUSTRACIÓN 65. PROYECCIÓN POR VÍA HÚMEDA (FUENTE: MÉTODOS POR VÍA SECA O VÍA HÚMEDA DE MUÑOZ, J. (2017)). .....	101
ILUSTRACIÓN 66. EQUIPO PARA PROYECCIÓN POR VÍA SECA MODELO MEYCO PICCOLA (FUENTE: MÁQUINAS Y EQUIPOS DE SHOTCRETE (CAPITULO 6), ICH). .....	103

ILUSTRACIÓN 67.EQUIPO MEYCO ROAD RUNNER PARA PROYECCIÓN POR VÍA HÚMEDA...	103
ILUSTRACIÓN 68.EQUIPO MEYCO MAMBA QUE PROYECTA SHOTCRETE POR VÍA HÚMEDA (FUENTE: DEGUSSA CONSTRUCTION CHEMICALS). ....	104
ILUSTRACIÓN 69.LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO DE TUNELERÍA (FUENTE :WIKIPEDIA). ....	105
ILUSTRACIÓN 70. PARTES DEL TÚNEL Y SUS SECCIONES ESTABLECIDAS POR ROGER HOLMBERG (FUENTE: DISEÑO DE VOLADURA SUBTERRÁNEA POR MÉTODO DE HOLMBERG , FERNÁNDEZ ,M) .....	106

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PERFORACIÓN Y TRONADURA (FUENTE: CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA MÁQUINAS TBM EN PROYECTOS MINEROS, CONSTRUCCIÓN MINERA).....	37
TABLA 2.UTILIZACIÓN DE TBM EN PROYECTOS MINEROS (FUENTE: CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA .....	38
TABLA 3. CONSIDERACIONES TÉCNICAS CLAVES (FUENTE: CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA.....	39
TABLA 4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TBM (FUENTE: CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA.....	40
TABLA 5. GAMA DE DIÁMETROS MÁS COMUNES PARA MINERÍA A CIELO ABIERTO Y SUBTERRÁNEA (FUENTE: MANUAL P Y T, LÓPEZ JIMENO, C).....	43
TABLA 6. TIPOS DE PERFORACIONES A UTILIZAR SEGÚN DISTINTAS SECCIONES DE TÚNELES (FUENTE: PERFORACIÓN Y TRONADURA SUBTERRÁNEA GUZMÁN,R. (2012)).....	45
TABLA 7. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL FULMINANTE SIMPLE N°8. (FUENTE: EXPLOSIVO EN MÉTODOS A CIELO ABIERTO, PEREZ, I. , PINTO,G., QUINTANILLA,J &ARAYA,C. (2015)). .....	69
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS DE LA MECHA DE SEGURIDAD (FUENTE: FAMESA). ....	70
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA MECHA RÁPIDA (FUENTE: FAMESA).....	72
TABLA 10. LONGITUD Y CANTIDAD DE PIEZAS POR CAJA DE CADA COMPONENTE DEL DETONADOR ENSAMBLADO ( FUENTE : FAMESA).....	73

TABLA 11. PRESENTACIÓN Y EMBALAJE DE LA LÍNEA SILENCIOSA (FUENTE : LÍNEA SILENCIOSA , EXSA).....	76
TABLA 12. TIPOS DE CORDONES DETONANTES (FUENTE: TECNOLOGÍA DE EXCAVACIÓN DE ROCAS DEL MÓDULO 3, BERGER , E).....	77
TABLA 13. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MARCOS DE MADERA ( FUENTE : ELABORACIÓN PROPIA).....	82
TABLA 14. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MARCOS METÁLICOS O DE ACERO RÍGIDO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	84
TABLA 15. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS MALLAS (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ...	87
TABLA 16. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PERNOS ANCLADOS MECÁNICAMENTE (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	89
TABLA 17. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PERNOS ANCLADOS CON RESINA O CEMENTO (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	93
TABLA 18. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PERNOS ANCLADOS POR FRICCIÓN (FUENTE : ELABORACIÓN PROPIA).....	97
TABLA 19. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS CABLES (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA). ...	98
TABLA 20. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SHOTCRETE POR VÍA SECA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	100
TABLA 21. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA APLICACIÓN DEL SHOTCRETE POR VÍA HÚMEDA (FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA).....	102
TABLA 22. RESULTADOS DEL DIAGRAMA TEÓRICO.....	129
TABLA 23. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS PARA LA RAINURA.....	129
TABLA 24. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS ZAPATERAS.....	130
TABLA 25. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LOS TIROS DE CORONA.....	130
TABLA 26. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LOS TIROS DE CAJA. ....	131
TABLA 27. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE LOS TIROS AUXILIARES.....	131

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se aborda el análisis del avance y desarrollo de galerías , donde en primer lugar se dará a conocer el origen de las construcciones subterráneas a nivel mundial, luego se continuara con las características principales de los túneles mineros donde se indicaran los fines que pueden presentar estos y las etapas de prefactibilidad para la construcción de este , posteriormente se ahondara en los puntos claves para la construcción de galerías o túneles los cuales incluye : estudios preliminares , clasificación de los sistemas de avance , métodos de excavación , clasificación de las perforaciones , tronadura y fortificación, para luego terminar con un proyecto de tunelería en la región de atacama donde se llevara a cabo un diseño de tronadura por el método Roger Holmberg.

Según la Real Academia Española, *“Túnel: vía subterránea abierta artificialmente para el paso de las personas o vehículos o instalación cubierta y alargada que comunica dos puntos y sirve para distintos fines”*.

El objetivo principal en la construcción de una galería o túnel es conseguirlo de la manera más económica posible, nunca olvidando la seguridad y factores ambientales. Para poder llevar a cabo la construcción de túneles, se deben realizar una serie de etapas comenzando con un estudio previo y detallado del lugar donde se planea ejecutar la obra, que implica estudios geológicos y geotécnicos del terreno, sondeos los cuales nos permiten con los resultados realizar ensayos geomecánicos como RQD, ensayos de carga de compresión uniaxial y triaxial y ensayos de carga puntual entre otros; y galerías de reconocimiento. Esta etapa de estudios se realiza incluso durante la fase de construcción del túnel, el objetivo principal del estudio geológico es determinar y calificar el terreno excavado los cuales pueden corresponder a depósitos fluviales, zonas de falla, macizos rocosos, y la serie de factores geotécnicos al igual que condiciones hidrogeológicas del sector de interés.

Luego de realizada la etapa anterior, se procede a definir el método y la forma de construcción más apropiada para el proyecto, la cual abarca aspectos como el método de excavación, la cantidad y ubicación de los frentes, técnicas de excavación y la fortificación, así como también el control del agua subterránea, sistemas de transporte de marina, etc.

Los métodos de avance que se emplearán en la excavación y soporte se definirán tras un análisis exhaustivo de todos los aspectos importantes, incorporando el tipo de terreno, la longitud y disposición del trazado del túnel, etc. Los métodos de excavación y soporte se dividen en métodos convencionales y mecanizados, por un lado los métodos convencionales corresponden a la construcción de cavidades subterráneas empleando la perforación y tronadura o también pueden realizarse con excavadoras mecánicas de frente parcial (retroexcavadoras, picadores o rozadoras), con una instalación de fortificación a través de shotcrete, pernos , marcos metálicos o de madera , cables de acero , mallas de acero.

Los métodos mecanizados se realizan con máquinas tuneladoras, las cuales pueden ser de frente parcial o completo como las TBM (Tunnel Boring Machines) , estas se clasifican en distintos tipos : maquinas sin protección periférica y soporte del frente , maquinas con escudos periférico y soporte activo del frente , con propulsión por medio de gatos hidráulicos longitudinales. Es importante señalar que el tipo de maquinaria que se utilizara en función a las condiciones de borde y los riesgos geotécnicos que puedan reconocerse.

### **Objetivo Principal**

- El objetivo principal de este proyecto es la realización del diagrama de tronadura por el método Roger Holmberg en una mina subterránea.

### **Objetivos Específicos**

- Entender en mayor profundidad los orígenes de las construcciones subterráneas a nivel mundial.
- Comprender todas las etapas que conlleva el avance y desarrollo de galerías.

## 1.-ANTECEDENTES

### 1.1-Orígenes de las construcciones subterráneas

El origen de las obras subterráneas comienza con la formación de cuevas y cursos de aguas subterráneas, los cuáles han influido en el equilibrio y armonía de los ecosistemas, y, por ende, del desarrollo de la vida.

El arte de los túneles se funde en sus orígenes con el arte de la minería. La mina más antigua que se conoce en el mundo se localiza en el cerro de Bomvu en Swazilandia y data del año 40000 a.c, la cual nos remonta a la era del hombre Neandertal, ellos poseían métodos de perforación a través del fuego, y a lo largo de la historia han evolucionado tanto los métodos como túneles que dependiendo de su envergadura se emplea el método específico.

La técnica de fuego fue el primer método de perforación de galerías mineras y luego de túneles, esta técnica consiste en ocasionar un incendio en el frente de ataque para luego extinguirlo violentamente con agua fría lo que generaba un brusco gradiente térmico que da lugar al fracturamiento de la roca; el gran problema de esta técnica fue la generación de gases a menudo venenosos lo cual producía una atmosfera viciada e irrespirable por los trabajadores.

El ejemplo más antiguo del primer túnel del que se tiene constancia gracias a los relatos de Diodoro de Sicilia, Herodoto y Estrabon es de un “túnel falso”, construido bajo 400 metros del rio Éufrates, este túnel se perforo mediante zanja a cielo abierto y después se recubrió, por lo cual se bifurcaron las aguas del Éufrates aprovechando el periodo de sequía. La leyenda cuenta que Semiramis mando a construir bajo el Éufrates con el fin de lograr una comunicación entre el Palacio y el Templo de Belos en la Babilonia del 2200 a.C.

Luego, el segundo túnel fue producto de los Brunel padre e hijo (4000 años después del construido en Babilonia), los cuales tuvieron veinte años de lucha para lograr controlar las furiosas aguas del río Támesis.

Por otro lado, en el antiguo Egipto y el medio Oriente parte de los túneles que se construían eran por motivos de carácter religioso, el principal túnel del cual se tiene alusión fue en la Isla de Samo por el ingeniero Eupalinos de Megara hijo de Naustrofo que fue un túnel utilizado para el abastecimiento de agua para la capital de la isla. El imperio romano construyo túneles con diferentes finalidades: galerías mineras, túneles para abastecimiento de aguas, para alcantarillado, para el drenaje de lagos volcánicos.

En cambio, en la edad media se da más importancia a las galerías, pasadizos en castillos y fortalezas, en esta época se aumentó en gran cantidad el arte de la minería en Centroeuropa gracias a Georg Bauer, cuyo pseudónimo era “*Georgius Agricola*” quien publicó un libro llamado “*De re metallica*”, el cual aborda el arte de la minería, el refinado y la fundición de metales de la época.

El Renacimiento destaca el retorno de los túneles tras el letargo de la época medieval, un personaje importante de la época fue Leonardo da Vinci quien concibe niveles subterráneos en sus proyectos de ciudades y proyecta la posibilidad de perforar túneles donde los canales se encuentran con montañas. El primer túnel del Renacimiento fue construido entre los años 1555 y 1562 por Pierres Bedel con la finalidad de bifurcar las aguas torrenciales que venían castigando la villa aragonesa, corresponde a la Mina de Daroca (provincia de Teruel), la cual tiene 650 metros de longitud, 6.7 metros de ancho y su altura varía entre los 7 y 8 metros.



**Ilustración 1. Mina Daroca (Fuente: Historia de los túneles y su evolución histórica, Studylib).**

Dentro de la Era de los Canales (siglo XVIII) los túneles alcanzan un importante peso propio: el túnel de Malpas, canal de Midi el cual se construyó con la finalidad de unir el Atlántico con el mar Mediterráneo, esta fue potenciada por Colbert bajo el reinado del Rey Sol (Luis XIV) siendo el primer túnel para canal. Este túnel consta de 155 metros de longitud, 6.5 metros de altura y 8 de ancho, fue perforado por Pierre-Paul Riquet quien empleó la pólvora por primera vez. Luego de esto, muchos túneles se construyeron en las siguientes décadas donde se destacaron los túneles ingleses para canal, la gran mayoría fue creación por el ingeniero James Brindley.



**Ilustración 2. Túnel de Malpas (Fuente: TripAdvisor).**

A partir del siglo XIX, comienza la historia de los ferrocarriles donde los túneles alcanzaron un gran apogeo; en la historia de los túneles de ferrocarriles se presenta una pelea constante del hombre por controlar el arte de perforar la tierra; donde se incorporan paulatinamente maquinarias y procedimientos constructivos causando una disminución de la fuerza manual y un aumento progresivo de la mecanización.

## 2.-TÚNELES MINEROS

Los minerales que se encuentran en el interior de las montañas marcan un papel relevante en nuestra historia producto de la gran riqueza que han ocasionado y por el gran potencial de los recursos naturales y humanos los cuales nos representan prosperidad futura y que en la actualidad se interpreta en una cuantiosa riqueza derivada de la exportación de los metales.

La construcción de galerías o túneles en minería se realiza esencialmente para los siguientes fines:

- Explotación
- Exploración
- Drenaje
- Ventilación

Un análisis de prefactibilidad para la construcción de un túnel minero debe estar fundamentado principalmente en tres factores los cuales determinan la productividad de la industria minera y estas son:

1. Volumen y ley del yacimiento o volumen de reservas económicas del yacimiento
2. Monto de capital disponible
3. Métodos de trabajo y calidad de personal.

### **Etapas para un análisis de prefactibilidad en la construcción de un túnel minero**

1. Establecer los costos totales del túnel y sus alternativas a largo, mediano y corto plazo, teniendo en cuenta los factores de productividad de la mina.
2. Establecer las ventajas y desventajas que ofrece el túnel y las alternativas analizando factores muy importantes, tales como:
  - Vida de la mina
  - Futura exploraciones
  - Ubicación de la planta concentradora
  - Campamentos

Debemos valorar en términos de costos de operación, mantenimiento y costos de energía las ventajas y desventajas con el objetivo de obtener un costo final para cada caso.

### **3.- ESTUDIOS PRELIMINARES**

Para llevar a cabo la construcción un túnel, se deben abordar inicialmente los siguientes aspectos considerando algunos aspectos como geológicos, geotécnicos e hidráulicos:

#### **Primero:**

Se debe realizar un estudio detallado del lugar donde se planea ejecutar la obra, la cual implica estudios geológicos y geotécnicos de los terrenos, sondeos y galerías de reconocimiento. La finalidad de esta investigación geológica es poder caracterizar el terreno que será excavado, sean estos depósitos fluviales, macizos rocosos, zonas de fallas, y sus respectivos parámetros geotécnicos, al igual que las condiciones hidrogeológicas del sector de interés.

#### **Segundo:**

Definir el método y estrategia de construcción más adecuada, las cuales incluyen los siguientes aspectos: método de excavación, cantidad y ubicación de frentes, técnicas de excavación y fortificación, control de agua subterránea, sistemas de transporte de marina, instalaciones de faena, logística de acceso y ubicación del botadero.

El primer punto para iniciar la construcción de túneles se abordará en mayor detalle a continuación.

#### **3.1-Estudios geológicos y geotécnicos del terreno**

Estos estudios geológicos y geotécnicos se realizan con la finalidad de tener un exhaustivo conocimiento acerca de la constitución y las propiedades del macizo rocoso, el cual se verá afectado de forma directa o indirectamente por la construcción y explotación de la obra subterráneas.

A continuación, se presentan algunas propiedades del macizo rocoso:

- Litología
- Estructura tectónica y discontinuidades del macizo rocoso
- Hidrogeología y gases
- Propiedades geotécnicas y comportamiento geomecánico.

Para realizar un mejor reconocimiento de la superficie se realizarán:

- Zanjas
- Calicatas
- Sondeos cortos
- Estaciones geomecánicas

Estos se realizan en la planta del túnel extendiéndose de un lado al otro, a una distancia acorde con el fin de que los datos nos lleguen a servir para realizar una extrapolación hacia el interior del terreno, a un conocimiento del mismo a la cota por donde se realizara la traza del túnel.

En el caso de que el terreno sea un medio rocoso, se dará especial interés a la posible presencia de fallas o discontinuidades de gran envergadura, tanto de ámbito regional como local. Se destacará, asimismo, la presencia de otras anomalías o singularidades estructurales del medio rocoso, como las zonas cársticas.

También se realizan estudios y ensayos en las áreas de emboquille, con el objetivo de investigar y saber con mayor exactitud las características del terreno como zonas que son más inestables desde el punto de vista geotécnico, y así fijar correctamente el punto de inicio de la construcción. Además, se realizan estudio de las condiciones hidrogeológicas del entorno del túnel para poder definir aspectos del diseño, construcción y explotación de la obra subterránea.

Los objetivos a reconocer con los reconocimientos y ensayos realizados son los siguientes:

1. Determinación del perfil geológico del túnel
2. Caracterización geotécnica cuantitativa de los terrenos
3. Recomendaciones sobre tipos de sostenimientos a adoptar
4. Recomendaciones orientadas a definir los sistemas de ejecución
5. Problemática previsible de la excavación
6. Análisis específicos de las áreas de emboquille y posibles estructuras especiales

### **3.2-Sondeos**

Los sondeos corresponden a perforaciones que se realizan en el terreno con la finalidad de conocer u obtener algo que está en el subsuelo.

Existe una diversidad de tipos de sondeos, los cuales se clasifican según la finalidad para la que se construyen, y en cada uno de ellos se emplean métodos de operación específicos. Se tienen así:

- Sondeos de reconocimiento o investigación general
- Sondeos piezométricos
- Sondeos de monitoreo o vigilancia de calidad de agua
- Sondeos geotécnicos
- Sondeos de inyección de cemento o pilotes
- Sondeos de explotación de agua
- Sondeos petrolíferos, que a su vez pueden ser de investigación o de desarrollo de campo
- Sondeos de inyección de residuos en formaciones permeables
- Sondeos para la creación de cavidades salinas
- Sondeos geotérmicos

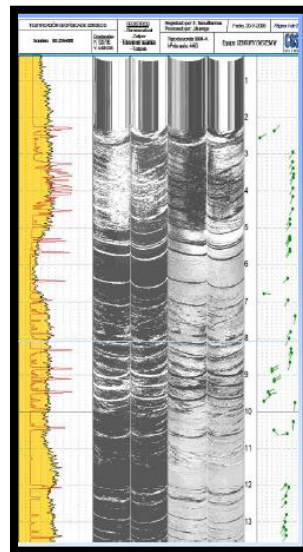
En el presente trabajo se trata en mayor detalle los sondeos de reconocimiento o investigación general, los cuales tienen como objetivo realizar las exploraciones necesarias para el estudio de los terrenos, entregando los siguientes datos:

- Litología, a través del estudio del ripio, testigos y registros o diagráfias.
- Presiones de formación y niveles piezométricos de los distintos acuíferos cortados.

- Propiedades físicas de las rocas tales como porosidad, permeabilidad, temperatura, existencia de fluidos, características mecánicas, etc.
- Propiedades químicas de los fluidos contenidos en las rocas, salinidades, efectos corrosivos, concentraciones de diferentes elementos, composición isotópica, etc.



**Ilustración 3. Tipos de testigos (Fuente: Sondeos en túneles de Bravo, M).**



**Ilustración 4. Diagrafías de Televiwer acústico (Fuente: Sondeos en túneles de Bravo, M).**

Para los sondajes que se efectúan en roca, se emplea la corona diamantada en la punta la cual va quebrando el material y se deja un testigo en el interior de la sonda para luego ser retirado

para su análisis. Con estos testigos se pueden realizar diversos ensayos, tales como RQD (Rock Quality Designation) el cual se basa en la estimación del número de familias de fracturas que existen por metro cúbico donde se quiere calcular el RQD y otra forma de obtenerlo es a través de la ecuación de Palstrom , la cual es  $RQD = 115 - 3.3 J_v$  donde se puede conseguir el valor del RQD para  $J_v > 4.5$  pero el gran problema es que no se diferencia la frecuencia de las familias por lo genera cierta incertidumbre respecto al valor obtenido , RMR ( Rock Mass Rating) que integra UCS + RQD + espaciamiento , condición y orientación de las discontinuidades + las aguas subterráneas ; ensayos de carga de compresión uniaxial y triaxial y ensayos de carga puntual entre otros.

### **3.3-Galerías de reconocimiento**

Las galerías de reconocimiento son excavaciones que se realizan a lo largo del centro, estas se realizan con la finalidad de obtener conocimiento acerca del tipo de terreno donde se llevara a cabo la construcción del túnel logrando obtener datos como la velocidad de avance, comportamiento de la roca (dureza, presencia de fallas) con el objetivo de lograr determinar los métodos de perforación más adecuados y en algunos casos la fortificación de este.

La realización de la galería de reconocimiento debe ser de extrema calidad. Es importante señalar que el tiempo que debe transcurrir entre la construcción de la galería y el túnel debe ser la mínima posible, producto de una posible alteración del terreno, originada por la perforación de la galería.

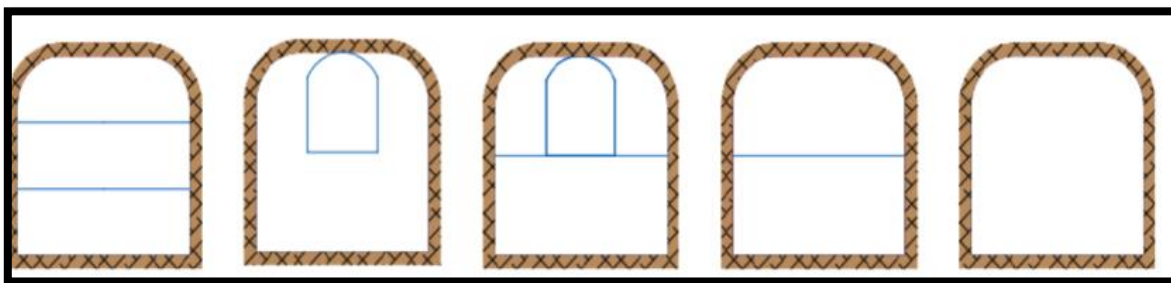
Es importante señalar que los estudios geológicos nos entregan solo probabilidades y no certezas, por lo cual debemos confiarnos y tener una gran prudencia en el curso de las obras.

#### 4.- SISTEMAS DE AVANCE

La configuración de cómo se ataca la sección de los túneles depende principalmente de cinco factores:

- Tipo de roca
- Equipo de perforación utilizado
- Tiempo disponible para la ejecución
- Tipo de sostenimiento
- Sistema de ventilación

En rocas de gran dureza, las secciones menores a 100 m<sup>2</sup> se pueden excavar a sección completa con la perforación y tronadura. En cambio, cuando las secciones son mayores o la roca es blanda se hace más complicado realizar el túnel a sección completa por lo cual la excavación se realiza por fases.

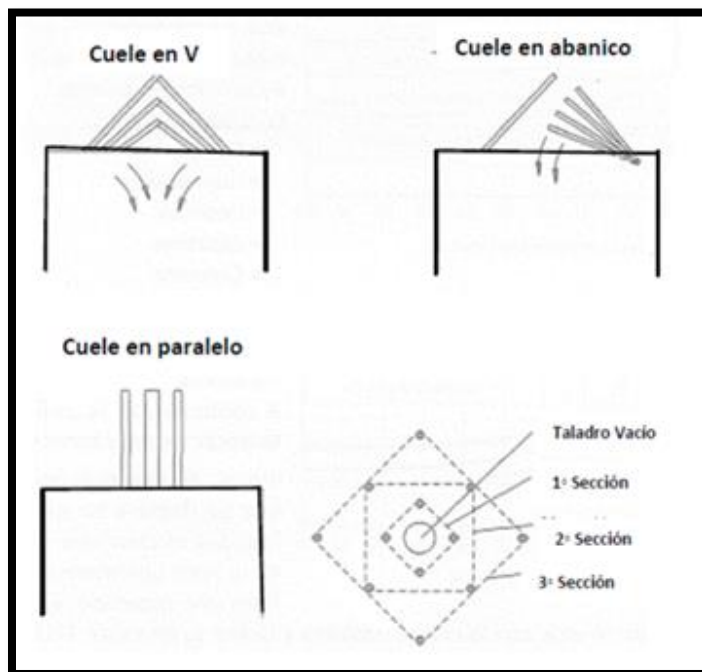


**Ilustración 5. Sistema de avance en túneles (Fuente: Manual de P y V, López Jimeno).**

En subterránea no existe ninguna superficie libre de salida, solamente el frente de ataque por lo cual se debe originar una cavidad denominada cuele con la ayuda de los taladros de arranque los cuales se encargan de romper las cargas sobrantes de la sección. Los cueles frecuentemente poseen una superficie de 1 a 2 m<sup>2</sup> y con diámetros mayores de perforación puede alcanzar hasta 4 m<sup>2</sup>.

Los cueles como se mencionó en el párrafo anterior es la primera fase de tronadura y la más importante que se realiza, ya que genera una primera abertura en la roca la cual permite a las

demás fases una superficie libre para que huya la roca y así favorecer su arranque. Existen tres tipos de cuele (ilustración 6), los cueles paralelos, cueles en V y los cueles en abanico.



**Ilustración 6. Tipos de cueles (Fuente: Manual de túneles, cap. 7).**

Los cueles en V y en abanico los que nos ayudan en la salida de la roca hacia afuera, pero la desventaja que presentan es que los taladros producen un ángulo con respecto al eje del túnel, debido a esta desventaja es que existen mayores obstáculos para realizar una adecuada perforación y además nos exige cambiar el diseño de perforación para cada longitud de avance.

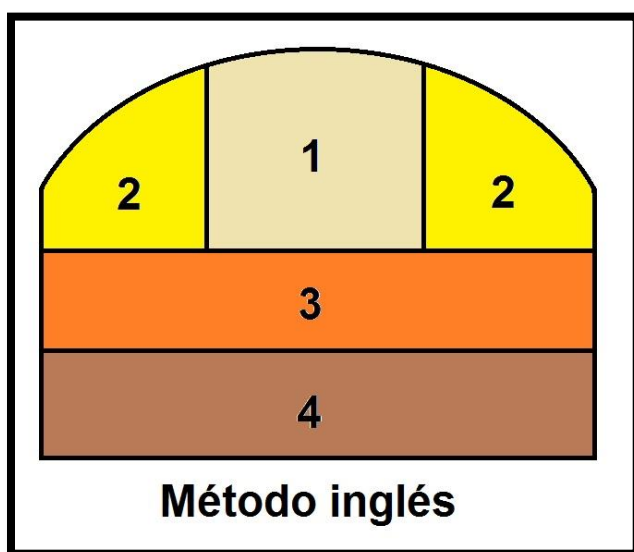
Por otro lado, se encuentra el cuele paralelo el cual debido a su simplicidad es el más usado. Consiste en un taladro vacío (barreno de expansión), sin explosivos, de mayor diámetro que el resto (de 75 a 102 mm) y, en su entorno, tres o cuatro secciones de taladros cargados que explotan continuamente siguiendo un orden predispuesto. El objetivo del barreno de expansión es brindar una superficie libre para poder evitar el confinamiento de la roca y así favorecer el arranque. Su diámetro puede variar entre 100 y 300 mm y en algunas situaciones se puede reemplazar por dos taladros vacíos de diámetro menor (2 x 75 mm).

A continuación, se presentan algunos de los métodos de avance utilizados en roca blanda para la construcción de túneles:

#### 4.1- Método Inglés

Este método se aplica en túneles de pequeñas secciones, no más de 15 m<sup>2</sup>, con el beneficio de poder modificar cualquier imprevisto que surja durante la excavación.

El proceso de excavación consta de cuatro fases (ilustración 7).



**Ilustración 7. Fases de excavación del método inglés (Fuente: El método inglés de excavación de túneles, Yepes V).**

**Fase 1:** esta fase da comienzo al proceso de excavación, con una galería centrada en la parte superior de sección pequeña de aprox. 3 m<sup>2</sup> y una longitud entre los 3 a 4 m., debido al tamaño de la sección es más fácil poder controlar cualquier imprevisto.

**Fase 2:** en esta fase se amplía la excavación realizada en la fase 1 hacia los laterales.

**Fase 3 y 4:** últimas fase, donde las excavaciones se realizan a través de franjas horizontales.

Finalizada la excavación de la sección completa del túnel, se procede a la fortificación, la cual comienza por la solera o contra-bóveda.

Este procedimiento de excavación presenta una gran ventaja la cual es que la fortificación se realiza de una sola vez, lo cual evita las posibles juntas. Por otro lado, también presenta desventajas como que la fortificación se realiza una vez finalizadas todas las fases de excavación, con lo que en cualquier momento de las fases puede producirse un fallo en el sostenimiento del túnel. En algunos casos no es necesario la fortificación por lo cual el método se lleva a cabo solamente en roca.

Producto de la desventaja mencionada anteriormente es que el material donde se realizara la excavación debe presentar un mínimo de cohesión para poder excavar la destroza y contra-bóveda en una única fase.

#### **4.2- Método Belga**

Este método se suele aplicar en túneles de un ancho máximo de 11 m (de los cuales son 8 m libres más 3 m de ambos hastiales), la excavación realizada es de forma progresiva, de manera que se retiren los elementos más estables del túnel evitando el hundimiento o la falta de estabilidad del frente.

El proceso de excavación consta de cinco fases (ilustración 8).

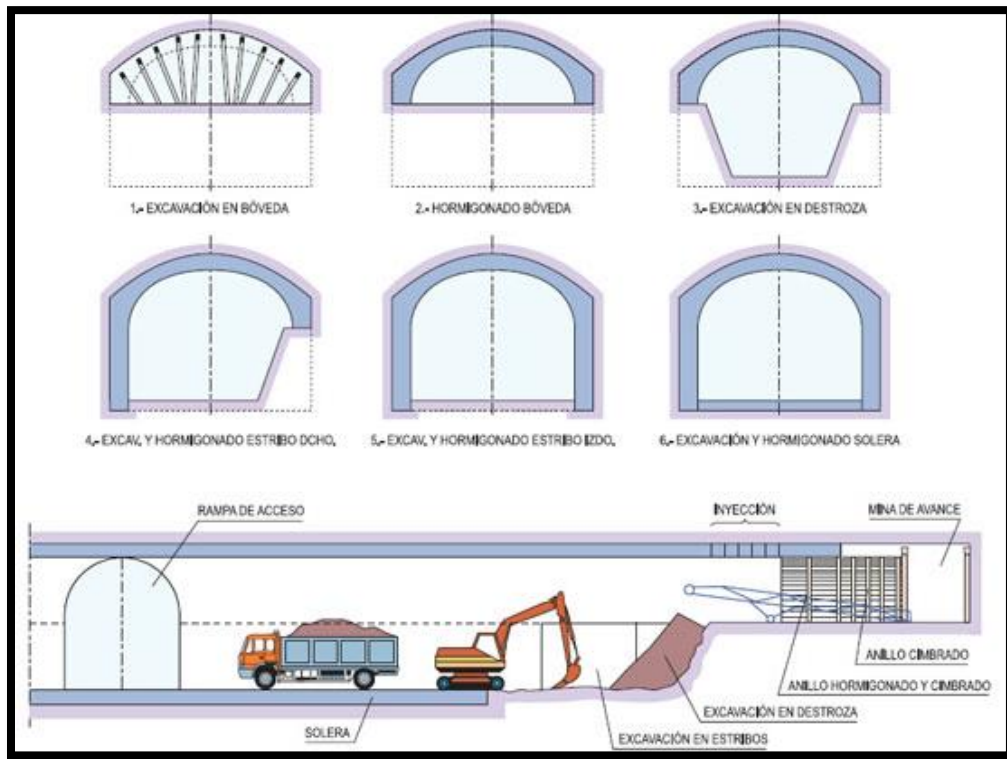


**Ilustración 8. Enumeración del orden de excavación del método belga (Fuente : Uso e importancia de los túneles ,Prezi ).**

**Fase 1 y 2:** se comienza la excavación abriendo una pequeña galería (galería de avance), que corresponde a la fase 1 (ilustración 8), para luego ir ampliándose hacia los lados poco a poco hasta tener la excavada por completo la bóveda. Luego se procede a fortificar la bóveda, con el objetivo de dar seguridad para las siguientes fases de excavación

Una de las ventajas que presenta este método es la fortificación constante que se realiza a medida que se realizan las excavaciones, lo cual no genera un peligro para los trabajadores en caso de hundimiento del túnel. También se trabaja con pequeñas secciones, regularmente inferiores a los 3 m<sup>2</sup> lo que me otorga solucionar algún problema que pudiera surgir de inestabilidad.

A continuación, se presenta un esquema de elaboración de un túnel por el método belga (ilustración 9).

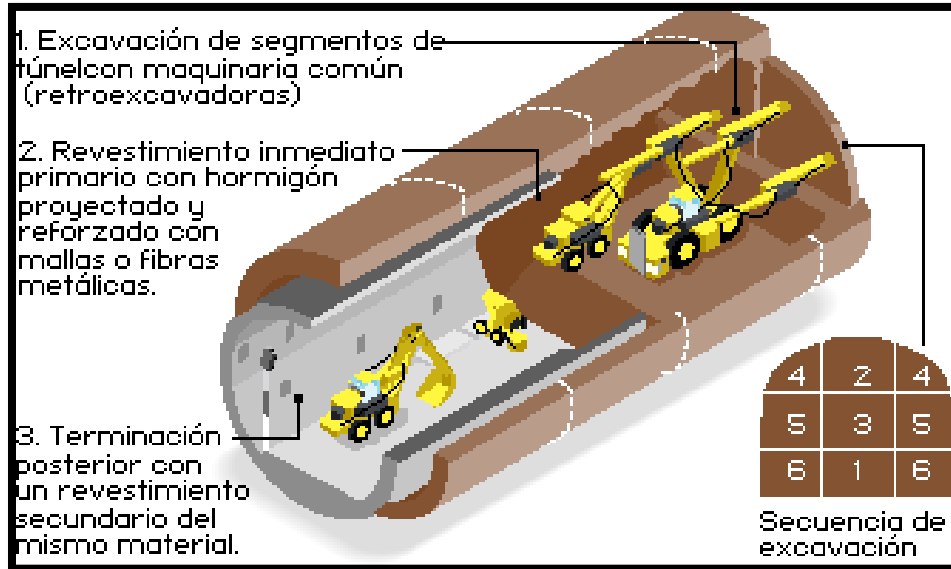


**Ilustración 9. Esquema de ejecución de un túnel por el método belga (Fuente: Método belga de construcción de túneles, Yepes V).**

### 4.3- Método Austriaco

Este método consiste en excavar grandes secciones de túneles, incluso la sección completa y permitir que la propia roca sana forme un anillo de descarga en el contorno de la excavación que reduzca las presiones a absorber por el revestimiento del túnel. Este método se caracteriza por el empleo de una galería de avance en el eje y en la base del túnel donde se dispone una vía de evacuación que se emplea durante todo el trabajo.

El proceso de excavación consta de seis etapas (ilustración N°10).



**Ilustración 10. Enumeración del orden de excavación del método austriaco (Fuente: Método de excavación austriaco, El País).**

Después de avanzar cierta distancia se procede a perforar un pozo hacia arriba y se excava en los dos sentidos una segunda galería. Luego de haber realizado la perforación de la galería superior se continúa de la misma forma que el método belga.

Las ventajas que presenta este método son sus diversos frentes de ataque los cuales aceleran la construcción del túnel, también el traslado de los escombros a la galería inferior se realiza por pozos y no presentan modificaciones con respecto a su estado original.

#### **4.4- Nuevo método Austriaco**

Este nuevo método austriaco integra un sostenimiento provisional el cual es mucho más flexible, el cual se adecua al terreno y comienza a trabajar desde el instante en que se ejecuta la excavación. Con este tipo de sostenimiento se intenta sufrir la menor alteración posible de las condiciones resistentes macizo rocoso, controlando las deformaciones del terreno que se crean producto de la descompresión al excavar y disminuir su magnitud por medio de elementos de fortificación como el shotcrete, el revestimiento utilizado es delgado semirrígido el cual se emplea rápidamente antes de que la roca se vea perjudicada por la descompresión.

### **Fases del Nuevo Método Austriaco**

1. Excavación: a plena sección o por fases.
2. Fortificación temporal luego de la excavación.
3. Medición de convergencias y deformaciones del terreno, tensión de los bulones (tornillos de tamaño grande)

Los resultados obtenidos nos pueden arrojar la implementación de un sostenimiento temporal o definitivo con un espesor adecuado que absorba las deformaciones radiales predecibles.

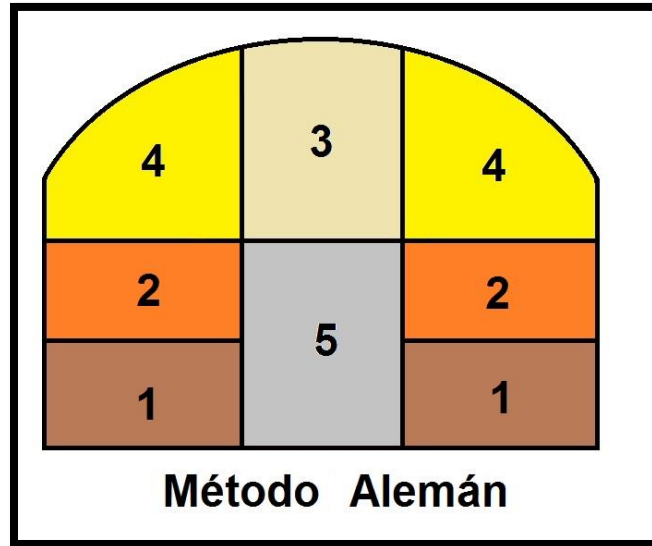


**Ilustración 11. Túnel de Albertia elaborado a través del nuevo método austriaco (Fuente: Nuevo método austriaco , Yepes V).**

#### **4.5- Método Alemán**

Este método se utiliza para la construcción de grandes túneles mayores a 50 m<sup>2</sup> y también puede ser utilizado cuando el terreno es muy malo y resulta peligroso excavar parte de la bóveda para elaborar los hastiales. Dentro de las ventajas que presenta este método se encuentra la rapidez al reaccionar en caso de surgir agua, en terrenos sueltos o capas arenosas.

El proceso de excavación consta de cinco etapas (ilustración 12).



**Ilustración 12. Enumeración del orden de excavación del método alemán (Fuente: Método alemán de construcción de túneles, Yepes V).**

**Fase 1 y 2:** se inicia la excavación con dos galerías de avance, las cuales se realizan por trechos de 25 a 30 m dependiendo el tipo de terreno, luego se fortifican los hastiales con hormigón con el fin de asegurar estabilidad para las próximas excavaciones.

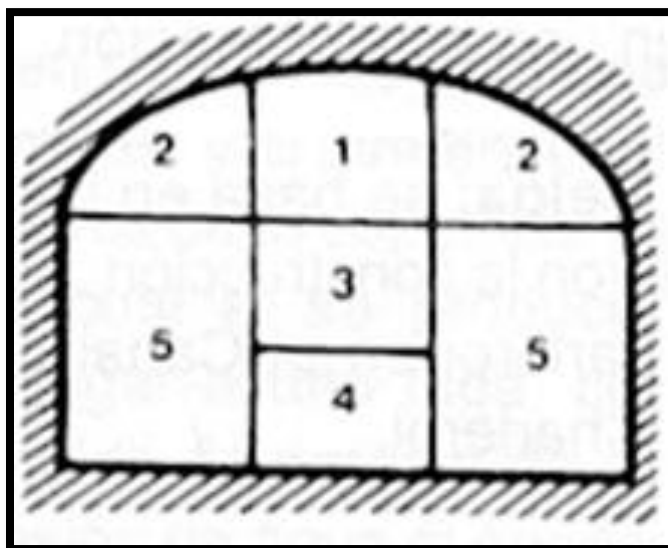
**Fase 3y 4:** luego en esta fase se procede a la excavación de la bóveda por completo y posteriormente al recubrimiento de esta, la cual es sostenida por los hastiales.

**Fase 5:** última fase del método donde se realiza la excavación de la destroza, en caso de ser necesario se excava y reviste la solera.

#### **4.6- Método Italiano**

Este método se base en sacar solo el medio arco y la galería central por donde se evacua la marina, luego se concreta el medio arco para posteriormente arrancar el material que quedo por zonas y también se va concretando los muros, es un método similar al método belga, se diferencia en que lo último a ejecutar son los muros.

El proceso de excavación consta de cinco etapas (ilustración 13).



**Ilustración 13.**Enumeración del orden de excavación del método italiano (Fuente: Túneles, Ceres (2010)).

Se utiliza en terrenos muy blandos donde se suelen excavar pequeñas áreas, una gran desventaja del método italiano es su alto costo y se ha reemplazado por el método de escudo el cual es único para terrenos blandos.

A continuación, se presentan los métodos de avances utilizados en roca dura o competente en la construcción de túneles:

#### **4.7- Sección completa**

Este método se emplea para desarrollar el avance en una sola vez por lo cual el avance de las frentes del túnel se realiza a una mayor velocidad. No es recomendable utilizar este método en secciones muy mayores a 100 m<sup>2</sup> y tampoco para zonas donde existe una alta tensión tectónica donde existe un alto riesgo de explosión de la roca. Una gran desventaja que presenta es su alta inversión inicial en equipos y problemas en emplear algunos tipos de soporte.

Existen jumbos que logran abarcar toda la sección incluso en secciones mayores a los 100 m<sup>2</sup>, en caso de no contar con estos equipos se genera una plataforma con el material de la tronadura anterior para así alcanzar a abarcar toda la sección.

#### **4.8- Doble sección**

Este método consiste en dividir la sección en dos y tronarlas por separado, el orden no influye en nada. La tronadura de la sección superior del túnel es muy parecida a la tronadura de sección completa, se coloca sostenimiento en caso de requerirlo. Las ventajas que presenta este método es su bajo costo y también que se utiliza mucho donde no existen maquinarias o jumbos.

Cuando se dispara primero la sección superior, la tronadura de la sección inferior posee una cara libre y se ejecuta como una tronadura en banco.

#### **4.9- Galería piloto**

La galería piloto cumple la función del cuele que es generar una cara libre, esta puede ubicarse en el centro, abajo o arriba. Este método es utilizado en túneles de un área superior a 50 m<sup>2</sup>, el tamaño es de 0.45 a 0.4 veces la sección del túnel. Cuando la galería piloto se realiza en el centro, se utiliza una perforación radial la cual debe ser inspeccionada, ya que puede producir una forma irregular del túnel.

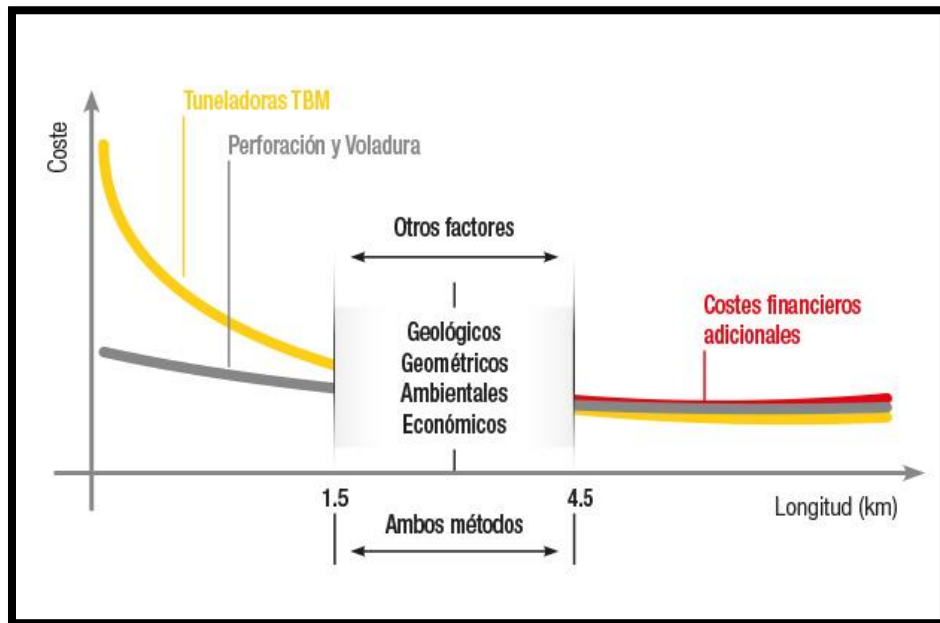
## 5.- MÉTODOS DE EXCAVACIÓN

### Métodos de excavación

1. Métodos convencionales: perforación y tronadura (drill & blast), el cual es el sistema más usual y de mayor flexibilidad.
2. Métodos mecanizados: TBM (Tunnel Boring Machine), es el sistema más rápido cuando la roca es competente. Se utilizan para la construcción de túneles de grandes desarrollos longitudinales debido que las maquinas generan una sección circular continua y no pueden sortear radios de curvatura demasiado pequeños.

Para determinar cuál es el método de excavación más adecuado para aplicar existen algunas reglas generales:

- Longitudes de excavación mayores a 4.5 km se empleará una TBM.
- Longitudes de excavación menores a 1.5 km se empleará la técnica de perforación y tronadura.



**Ilustración 14. Costo según longitud del túnel excavado para los métodos con TBM y perforación y tronadura (Fuente: Putzmeister).**

Es importante señalar que las reglas mencionadas anteriormente son a grandes rasgos, ya que pueden existir factores que cambien estas reglas por lo cual es importante realizar un estudio detallado para cada caso.

Por otro lado, para longitudes de excavaciones comprendidas entre 1.5 km y 4.5 km los costos de ejecución son similares, por lo que debe tenerse en cuenta factores de orden geológico, geométrico, ambiental y de tiempos de ejecución.

### **5.1- Perforación y tronadura**

Este método corresponde a una técnica muy común que se sigue utilizando con mucha frecuencia en la actualidad, producto de las grandes ventajas que posee frente a las excavaciones mecánicas con tuneladoras; este método puede ser empleado en diversos tipos de rocas y secciones de trabajo además se adapta a numerosos trabajos, movilidad de los equipos y posee una baja inversión inicial.

Con respecto a las secciones, puede la excavación ser completa o por fases por galería de avance. Los jumbos pueden cubrir secciones de grandes dimensiones y formas para perforar el frente, también se pueden emplear en la perforación para la fortificación y en el caso de ir instalados sobre un chasis de neumáticos presentan gran movimiento con una gran capacidad de desplazamiento de un frente a otro.

Las desventajas que presenta el arranque con explosivos en comparación con los frentes mecánicos es que sus perfiles de excavación son en gran medida más irregulares y además las alteraciones que puede sufrir el macizo rocoso restante pueden ser grandes si las tronaduras no se disparan con las técnicas de contorno del perímetro los cuales afectan los costos de sostenimiento y revestimiento.

Ciclo de perforación y tronadura consta de los siguientes pasos:

1. Perforación del frente, siguiendo un patrón junto con una profundidad apropiada para el avance previsto en la tronadura.
2. Retiro del equipo perforador.
3. Carga del explosivo y retirada del personal.

4. Detonación de las cargas.
5. Ventilación para eliminar humo, polvo y vapores.
6. Desescombro y desprendimiento de la roca suelta.
7. Realización de la entibación provisional si es necesario.



**Ilustración 15. Ciclo de perforación y tronadura (Fuente: Putzmeister).**

La duración del tiempo de ciclo de excavación de un túnel a sección completa dura aproximadamente de 1 a 2 relevos dependiendo la sección y el tipo de sostenimiento necesario. Los tiempos se distribuyen de la siguiente forma:

- Perforación: 10-30 %
- Carga del explosivo: 5-15 %
- Tronadura y ventilación: 5-15 %
- Desescombro y saneamiento: 15-35 %
- Sostenimiento :10 a 65%

El tiempo que se designa para el sostenimiento en la sección de avance puede superar en el peor de los casos el 50% de la duración del ciclo.

**Tabla 1. Ventajas y desventajas de la perforación y tronadura (Fuente: Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros, Construcción Minera).**

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Sección del túnel</b>	Variedad de secciones	-
<b>Aplicación</b>	Fácil adaptación a cambios geológicos	Problema de uso bajo el nivel freático
<b>Personal y seguridad</b>	-	Manejo de explosivos y efecto de vibraciones
<b>Sostenimiento</b>	-	Reiterado uso de revestimiento
<b>Equipamiento</b>	El equipamiento puede ser empleado para otros propósitos.	-
<b>Avance</b>	-	Avance entre 5 m/d a 7 m/d
<b>Costo</b>	Bajo costo de construcción	-

## **5.2- TBM (Tunnel Boring Machine)**

Desde el inicio de la década de los 50, la TBM se han empleado para diversos planes en los proyectos mineros tanto greenfields como expansiones, incorporando transporte de material, drenaje, accesos, exploración y conducción de aguas. No obstante, la utilización de estas máquinas en minería no ha resultado fácil debido a que está sujeta fundamentalmente al riesgo geológico.

Las TBM corresponden a un cilindro conformado por planchas de acero que se encuentran soldadas entre ellas, poseen un diámetro levemente mayor que el exterior del revestimiento del túnel. Una de sus principales características es que tienen diversas maneras de atacar las caras de los túneles perforados a través de la roca, también dependen de las condiciones de la roca. En el caso de que el UCS sea mayor a 150 MPa suele ser más complicado la utilización de este método, otro factor importante de la roca es la abrasividad la cual depende

del contenido de cuarzo , tamaño de grano , resistencia y porosidad de la roca ;al presentar una alta abrasividad gasta rápidamente los discos.

Podemos señalar diversos proyectos mineros que utilizaron TBM en la construcción de túneles y que resultaron exitosos y económicamente rentables, estos se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2.Utilización de TBM en proyectos mineros (Fuente: Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros, Construcción Minera).**

PROYECTO	UBICACIÓN	AÑO <sup>1</sup>	LONGITUD, KM	DIMENSIÓN, M
Step Rock Iron	Canadá	1957	0,30	2,74
Nchanga	Zambia	1970	3,2	3,65
Oak Grove	EEUU	1977	0,20	7,4
Blyvoor	Sud África	1977	0,30	1,84
Fosdalen	Noruega	1977	670	3,15
Blumenthal	Alemania	1979	10,6	6,5
Westfalen	Alemania	1979	12,7	6,1
Donkin Morien	Canadá	1984	3,6	7,6
Autlan	México	1985	1,8	3,6
Kiena	Canadá	1986	1,4	2,3
Stillwater EB	EEUU	1988-91	6,4	4
Fraser (CUB)	Canadá	1989	1,5	2,1
Rio Blanco	Chile	1992	11,0	5,7
San Manuel	EEUU	1993	10,5	4,6
Cigar Lake	Canadá	1997	> 20	4,5
Port Hedland	Australia	1998	1,3	5,0
Stillwater EB	EEU	1998-01	11,2	4,6
Mineral Creek	EEUU	2001	4,0	6,0
Amplats	Sud Africa	2001	0,35	2,4
Monte Giglio	Italia	2003	8,5	4,9
Tashan Coal	China	2007		4,9
Ok Tedi	PNG	2008	4,8	5,6
Los Bronces	Chile	2009	8,0	4,2
Stillwater Blitz	EEUU	2012-13	6,8 <sup>2</sup>	5,5
Grosvenor Coal	Australia	2013	1,0 <sup>2</sup>	8,0
Oz Minerals	Australia	2013	11,0 <sup>2</sup>	5,8
Northparkes	Australia	2013	2,0 <sup>2</sup>	5,0
El Teniente	Chile	2014	6,0 <sup>2</sup>	10,0

A continuación, en la tabla 3 se pueden observar las consideraciones claves para emplear las TBMs en proyectos mineros, también se incluyen una serie de aspectos esenciales a considerar. Cuando se presentan sobreesfuerzos mayores, que implican estallidos de roca el sistema de soporte utilizado es el TBM McNallyMR.

**Tabla 3. Consideraciones técnicas claves (Fuente: Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros, Construcción Minera).**

<b>Consideraciones claves</b>	<b>Descripción</b>
<b>Condiciones geológicas</b>	Resistencia de la roca, alteración, origen y orientación de las fallas, minerales degradables.
<b>Potencial de sobreesfuerzos</b>	Columna litoestática, razón de esfuerzos in situ
<b>Acceso al sitio</b>	Limitaciones en la pendiente de los caminos de acceso para el transporte de las partes principales de la TBM.
<b>Requerimientos para el lanzamiento de la TBM</b>	Cavernas de lanzamiento para minimizar el riesgo de inestabilidad en terrenos con roca altamente meteorizada.
<b>Alineamiento e inclinación del túnel</b>	Pendiente máxima típica $\approx 4\%$ . Requerimientos especiales para pendientes mayores.
<b>Experiencia del contratista</b>	Revisión de la experiencia en proyectos similares utilizando TBM.
<b>Programa de construcción y adquisiciones</b>	Entre 12 a 14 meses para la fabricación de una TBM típica. Realizar una pre-compra puede ser ventajoso
<b>Dimensión mínima de la TBM</b>	La dimensión mínima de la TBM es de 4,5 m de diámetro para la instalación de soporte en condiciones de roca de mala calidad (caso de una TBM abierta).
<b>Soporte final y revestimiento</b>	El hormigón proyectado es una solución rentable.
<b>Uso de hormigón como revestimiento</b>	Dovelas prefabricadas de hormigón ofrecen ahorros significativos en el programa de construcción (enfoque “un solo paso”)
<b>Manejo y disposición de marinas</b>	Es posible utilizar la marina proveniente de la TBM como base del pavimento. Es común el uso de correas transportadoras en el caso de túneles de gran longitud para el manejo de marinas
<b>Logística</b>	El requerimiento de energía varía desde 4 MW para TBM pequeñas hasta 8 MW para TBM de grandes dimensiones.

Para aplicar la TBM en la construcción de túneles se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Distribución de los principales tipos de roca a encontrar en el trazado, su resistencia, calidad y durabilidad.
- Medir e identificar las zonas importantes de falla y cizalle.
- Existencia de unidades de rocas débiles, presencia de unidades formadas por rocas débiles, potencial de sobreesfuerzos y condiciones de convergencias extremas
- Requerimientos para la instauración del soporte inicial y final.

- Las especificaciones técnicas mínimas para la TBM son:
  - Requerimiento de energía mínima para poder excavar de forma eficaz las rocas muy duras ( $UCS > 250 \text{ MPa}$ );
  - Capacidad de sobreexcavación a través de los discos perimetrales especiales con la finalidad de evitar la obstrucción del cabezal de corte en las rocas débiles y así facilitar el recambio de cortadores.
  - Máquinas perforadoras para pernos, las cuales se ajustan en los dos lados de la TBM justo atrás del cabezal de corte.
  - Brazo mecánico para simplificar la instalación de los marcos metálicos.

**Tabla 4. Ventajas y desventajas de la TBM (Fuente: Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros, Construcción Minera).**

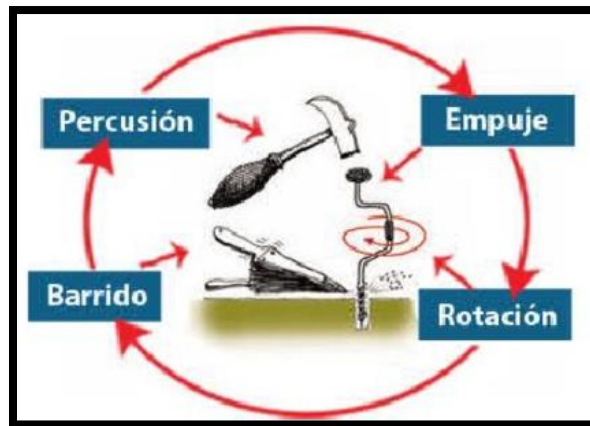
	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Sección del túnel</b>	Circular y su excavación es igual a la predicha	Restringida a secciones circulares de constante diámetro
<b>Aplicación</b>	Terreno blando y excavaciones bajo el nivel freático	Complejo ajuste para diversos tipos de terreno; curvas con radio mayor a 300 m
<b>Personal y seguridad</b>	Adecuada seguridad, ya que se exige poco personal para el frente de excavación	Personal capacitado y las capacitaciones son de larga duración
<b>Sostenimiento</b>	Soporte inmediato de la zona excavada	-
<b>Equipamiento</b>	Alta calidad en la línea de elaboración	Equipamiento no variable
<b>Avance</b>	Los avances dependen del tipo de roca	-
<b>Costo</b>	-	Alto costo de construcción

## 6.- CLASIFICACIÓN DE LAS PERFORACIONES

La perforación de rocas es la primera operación por realizar en el ciclo de desarrollo de las labores mineras, la cual se fundamenta en concentrar una alta energía en una pequeña superficie con el objetivo de vencer la resistencia de la roca a perforar con lo cual es factible albergar cargas explosivas y también los accesorios iniciadores.

A modo general la perforación consiste en una combinación de cuatro acciones:

1. **Percusión:** los impactos originados por los golpes del pistón producen ondas de choque las cuales se transfieren a la broca a través del varillaje.
2. **Rotación:** con este movimiento se hace girar la broca para que los impactos se provoquen sobre la roca en diferentes posicionamientos.
3. **Empuje:** para poder mantener en contacto la broca con la roca.
4. **Barrido:** fluido de barrido que posibilita arrancar el detrito que se encuentra en el fondo de la perforación.



**Ilustración 16. Combinación de las cuatro acciones en la perforación (Fuente: Perforación, Gonzales, F (2016)).**

Se necesita una fuente energía para el proceso de perforación, dependiendo el tipo de energía que se emplee, se definen diferentes métodos de perforación, por ejemplo: mecánicos, térmicos, hidráulico, etc.

El objetivo principal de la perforación es generar un espacio dentro de esta cuyos propósitos pueden ser variados, algunos de estos se presentan a continuación:

1. Conseguir una muestra del subsuelo (perforación prospectiva).
2. Colocación de cargas explosivas y generar roca quebrada ya sea mineral o estéril.
3. Obtención o drenaje de agua del subsuelo.
4. Alcanzar y utilizar energía geotérmica.
5. Instalación ductos o líneas de suministro de agua, combustible, electricidad, gas, etc.
6. Generar una serie de excavaciones horizontales y verticales utilizando equipos no convencionales que perforan a sección completa sin explosivos.
7. Explotación de yacimientos de petróleo y/o gas.

### **Componentes principales del sistema mecánico de perforación**

- Perforadora, la cual corresponde a la fuente de energía mecánica.
- Varillaje, por el cual se trasmite dicha energía.
- Broca o bit, la que ejerce sobre la roca la energía.
- Barrido, es el que realiza la limpieza y evacuación del detrito elaborado.

## **6.1- Según el método mecánico de perforación**

### **6.1.1- Métodos rotopercutivos**

Son ampliamente empleados en labores subterráneas y también en trabajos menores en minería a cielo abierto (precorte), tanto si el martillo se ubica en la cabeza o en el fondo de la perforación. Se combinan en este método las acciones de percusión, rotación, empuje y barrido.

**Tabla 5. Gama de diámetros más comunes para minería a cielo abierto y subterránea (Fuente: Manual P y T, López Jimeno, C).**

Tipo de perforadora	Diámetro de perforación (mm)	
	Subterránea	Cielo abierto
Martillo en cabeza	38- 65	50- 127
Martillo en fondo	100- 165	75- 200

Las ventajas que presenta el método rotopercutivos son:

- Se aplica a todo tipo de roca.
- Utilizar una amplia gama de diámetros de perforación que abarcan desde 1” hasta 8”.
- Para la perforación mecanizada los equipos presentan una gran movilidad.



**Ilustración 17. (A) Perforación con martillo en cabeza ( TopHammer) , (B) Perforación con martillo en fondo (Down The Hole) ( Fuente :Tecnologías de excavación de rocas del módulo 2 , Berger , E).**

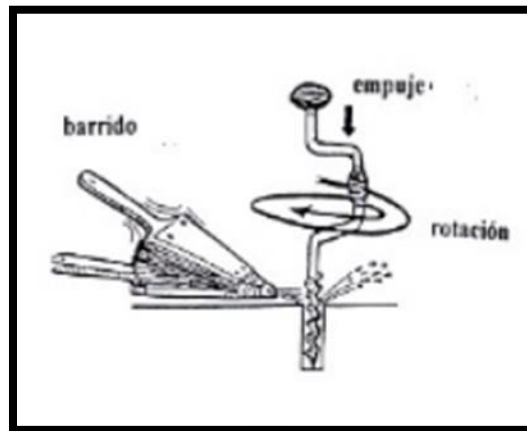
### 6.1.2- Métodos rotativos

En los métodos rotativos no existe la acción de percusión, este método nos permite generar pozos de diámetros mayores en minería a rajo abierto y conseguir altas velocidades de penetración. Se clasifican en dos dependiendo el tipo de penetración que se realice en la roca:

1. Trituración (triconos), este tipo de penetración se aplica en rocas de dureza media a alta. Se genera a través de la transferencia de la energía de rotación y avance por medio de un conjunto de tubos de perforación hacia la broca que se encuentra en contacto con la roca triturada.
2. Corte (brocas especiales), este tipo de penetración se aplica en rocas blandas. Las mismas fuerzas que en la trituración intervienen generando astillas.

#### Variables que deben ser controladas por el operador

- Empuje sobre la roca
- Velocidad de rotación
- Desgaste en la broca
- Diámetro del pozo
- Caudal de aire para el retiro del detritus



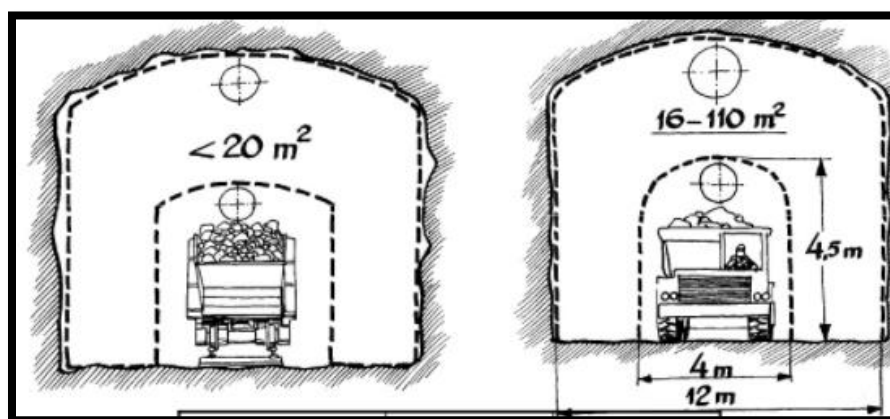
**Ilustración 18. Combinación de las tres acciones que actúan en la perforación rotativa (Fuente: Perforación de rocas, Slideshare).**

## 6.2- Según el tipo de maquinaria

Se clasifican en dos grandes grupos, el tipo de perforación que se utilizará dependerá de la sección del túnel que se desea construir.

**Tabla 6. Tipos de perforaciones a utilizar según distintas secciones de túneles (Fuente: Perforación y tronadura subterránea Guzmán,R. (2012)).**

Diámetro de perforación (mm)	Sección (m <sup>2</sup> )	Tipo de perforación
27-40	< 10	Manual
35-45	10 – 30	Mecanizada 1 brazo
38-51	> 30	Mecanizada 2 brazos



**Ilustración 19. Diferentes secciones de túneles (Fuente: Perforación y tronadura subterránea Guzmán,R. (2012)).**

### 6.2.1- Perforación Manual

Se utilizan equipos ligeros y de pequeñas dimensiones los cuales son operados por perforistas, este tipo de perforación se emplea para trabajos pequeños y cuando existen problemas de espacio para una maquinaria de dimensiones mayores o cuando este sea más costoso.



**Ilustración 20. Perforación manual (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 2 , Berger , E).**

### 6.2.1- Perforación Mecanizada

En este tipo de perforación los equipos van colocados sobre estructuras que se denominan orugas, desde donde el operador inspecciona todos los parámetros de perforación.

	<b>Rocket Boomer 104</b>	<b>Rocket Boomer 281</b>	<b>Rocket Boomer 282</b>	<b>Rocket Boomer M2 C</b>
<b>Coverage</b>				
<b>Rock drill</b>	1 x COP 1838ME	1 x COP 1838ME	2 x COP 1838ME	2 x COP 1838ME
<b>Boom</b>	1 x BUT 4	1 x BUT 2B	2 x BUT 2B	2 x BUT 32
<b>Feed</b>	1 x BMH 2825 - BMH 2837	1 x BMH 2831 - BMH 2849	2 x BMH 2831 - BMH 2849	2 x BMH 6812 - BMH 6818
<b>Total feed length</b>	max. 5257 mm	max. 6507 mm	max. 6507 mm	max. 7102 mm
<b>Total hole depth</b>	max. 3406 mm	max. 4625 mm	max. 4625 mm	max. 6268 mm
<b>Drilling system</b>	DCS 18-104	DCS 18-280	DCS 18-280	RCS
<b>Electric system</b>				
<b>Main motors</b>	1 x 55 kW	1 x 55 kW	2 x 55 kW	2 x 75 kW
<b>Required power</b>	63 kW	63 kW	125 kW	168 kW

**Ilustración 21. Jumbos de perforación frontal utilizados dependiendo la sección del túnel (Fuente: Atlas Copco).**

## 6.3- Accesorios de perforación

### 6.3.1. Roscas

La finalidad de las roscas es unir las culatas, manguitos, varillas y las brocas durante el proceso de perforación, se clasifican en:

- a) **Roscas R:** este tipo de rosca se emplea para barrenos que poseen varillas entre 22 a 38 mm y también se utilizan en perforadoras potentes de rotación independiente.
- b) **Roscas T:** esta rosca se puede utilizar casi en la gran mayoría de las diversas perforaciones y se aplica en diámetros de varilla entre 28 a 51 mm.
- c) **Roscas C:** se emplea en equipos de 51 mm que poseen grandes barras.
- d) **Roscas GD o HL:** es un tipo de rosca que se encuentra entre la rosca de tipo R y T y es apta para aplicarla en diámetros entre los 25 a 57 mm.

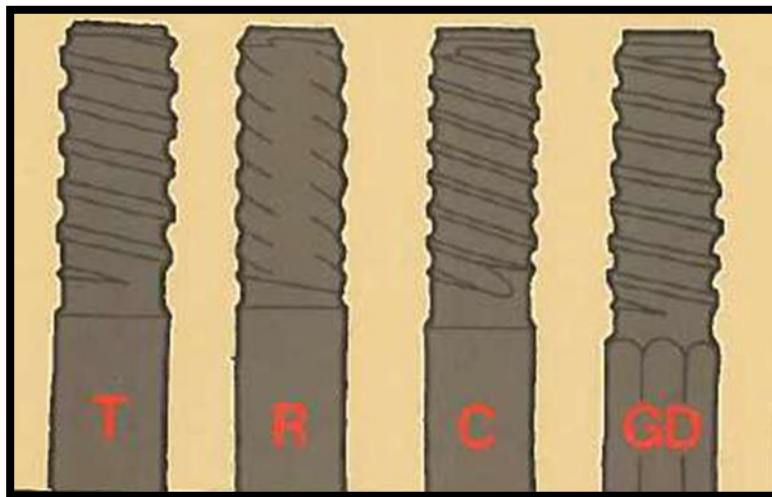


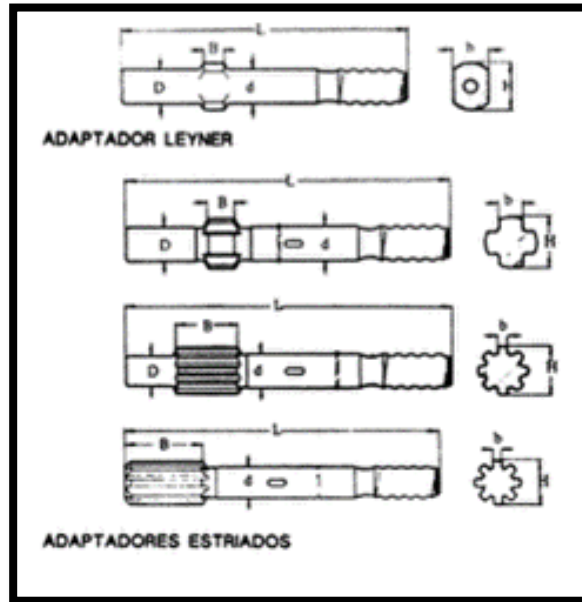
Ilustración 22. Tipos de roscas (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3, Berger, E).

### 6.3.2. Adaptadores

Los adaptadores corresponden a una pieza que se fija a la perforación para transferir la energía de impacto y la rotación del varillaje, se clasifican en:

- a) **Adaptadores de arrastre Leyner:** se emplea con varillas de 25 y 32 mm.
- b) **Adaptadores de arrastre total:** se utiliza en perforadoras neumáticas con pistones de 100 y 120 mm

c) **Adaptadores estriados:** este adaptador se aplica a varillas de 38, 44 y 50 mm.



**Ilustración 23. Adaptadores de leyner y estriados (Fuente: Manual de P y T de López Jimeno, C).**

### 6.3.3. Varillaje

Corresponden a los elementos que extienden la sarta, los cuales pueden ser:

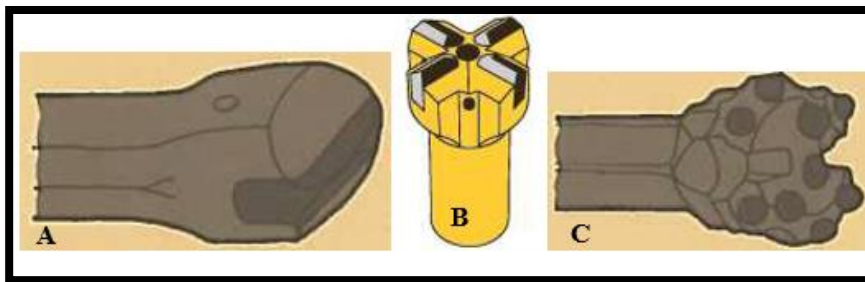
- Varillas o barras
- Tubos.

Las varillas se utilizan cuando se perfora con martillo en cabeza y pueden tener secciones hexagonales o redonda. Las varillas presentan roscas externas macho y son acopladas por manguitos.



**Ilustración 24. Tipos de varilla. (Fuente: P y T de Lopez Jimeno ,C).**

Barrenas integrales con culata se dividen dependiendo la forma de la boca y la forma de los insertos, las primordiales son: barrenas tipo cincel, barrenas de insertos múltiples y barrena de botones.



**Ilustración 25. (A) Barrenas tipo cincel, (B) Barrenas de insertos múltiples y (C) Barrena de botones (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3, Berger, E).**

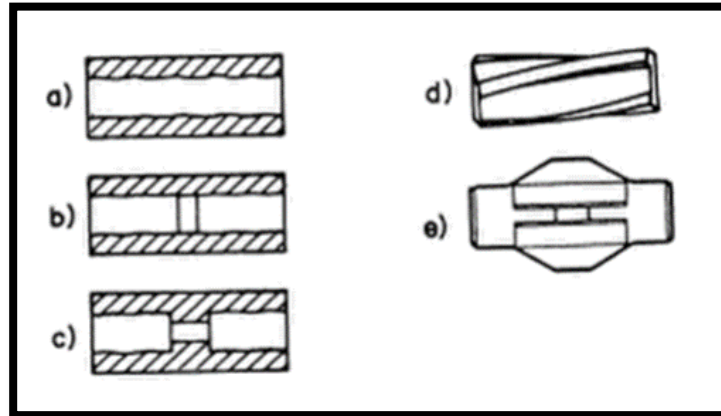
#### 6.3.4. Manguitos

La finalidad de los manguitos es juntar las barras hasta adquirir el largo anhelado, el ajuste debe ser capaz de garantizar el contacto de los extremos y además que la transferencia de energía sea eficaz.

##### Tipos de manguitos

- Manguitos simples
- Manguitos con semipuentes

- Manguitos con puente
- Manguitos con estrías
- Manguitos con aletas de gran diámetro



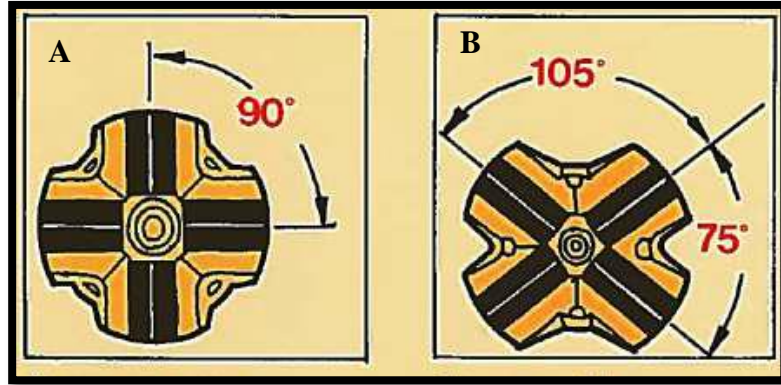
**Ilustración 26. (a) simple, (b) semipunte, (c) puente, (d) estrías y (e) aletas de gran diámetro (Fuente: Manual de P y T de López Jimeno, C).**

### 6.3.5. Brocas

#### a) Brocas de pastillas:

- **Brocas en cruz:** están conformadas por cuatro plaquitas de carburo de tungsteno organizadas en ángulo recto.
- **Brocas en X:** están fabricadas por cuatro plaquitas de carburo de tungsteno formando entre ellas ángulos de  $75^\circ$  y  $105^\circ$ .

Se elaboran comenzando con diámetros de 35 mm, en las brocas en cruz pueden alcanzar hasta los 57 mm y en las brocas en x pueden iniciar desde los 64 mm.



**Ilustración 27. (A) Broca en cruz y (B) Broca en X (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3, Berger, E).**

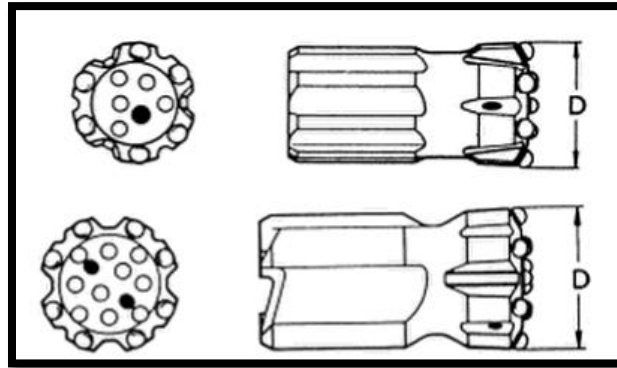
- b) **Brocas de botones:** están constituidos por unos botones o insertos cilíndricos de carburo de tungsteno repartidos por encima de la superficie. Son elaborados en diámetros que se pueden encontrar entre los 50 mm hasta los 125 mm. Las ventajas que presentan las brocas de botones es su alta velocidad de avance con respecto a las brocas de pastillas y además presentan una alta resistencia al desgaste.



**Ilustración 28. Broca de botones (Fuente: Broca de perforación de botones , Direct Industry).**

- c) **Brocas especiales:** las brocas con diseño son denominadas como:
- Brocas retractiles
  - Brocas de escariar

- Brocas de centro hundido
- Brocas balísticas.

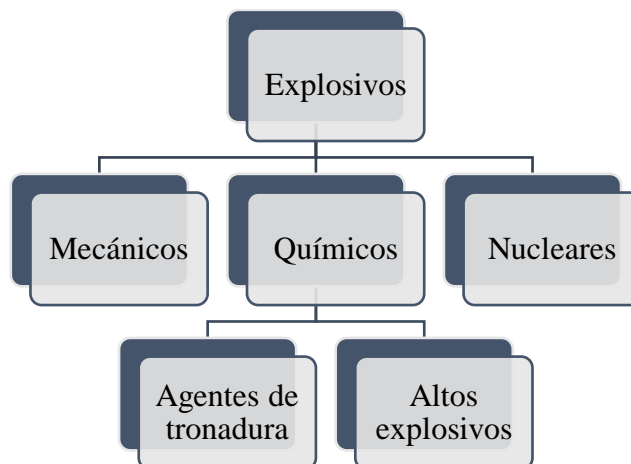


**Ilustración 29. Brocas retractiles (Fuente: Manual de P y T de López Jimeno, C).**

## 7.- TRONADURA

### 7.1- Explosivos

Los explosivos corresponden a una mezcla de sólidos, o de sólidos y líquidos, el cual es capaz de generar una descomposición rápida y violenta, donde se libera una gran cantidad de energía y se obtiene como resultado una conversión a grandes volúmenes de gas. En la ilustración 29 se pueden observar la clasificación de los explosivos.



**Ilustración 30. Clasificación de los explosivos (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3, Berger, E).**

## 7.2- Características generales de los explosivos

Las características generales de los explosivos son las que nos ayudaran a elegir el explosivo más adecuado para la tronadura, estas son:

### 7.2.1- Estabilidad química

Es la capacidad que posee el explosivo para mantenerse químicamente estable durante un tiempo determinado, la estabilidad de fábrica con la que viene el explosivo se mantendrá intacta si las condiciones de almacenamiento son adecuadas.

Las causas de pérdida de estabilidad en los explosivos se originan por un tiempo extenso de almacenamiento o también porque las condiciones de almacenamiento no son las adecuadas.

### 7.2.2- Sensibilidad

La sensibilidad de un explosivo se define como la mayor o menor facilidad que presenta un explosivo para ser detonado. Se tiene los explosivos que son muy sensibles, los cuales detonan sin dificultades al detonador y a la onda explosiva que se genere en las cercanías, estos nos aseguran pocos fallos en los taladros, pero su probabilidad de accidente es mayor. Por otro lado, se encuentran los insensibles los que son todo lo opuesto.

Existe por otro lado la sensibilidad a la propagación donde se encuentran dos tipos:

- **Diámetro crítico**, corresponde al rango donde la onda de propagación no se propaga o si lo hace es con una velocidad muy por debajo del régimen, los factores que influyen en el diámetro crítico son la densidad y el confinamiento de los explosivos en los taladros
- **Simpatía**, es el fenómeno que se produce cuando un cartucho al detonar induce en otro próximo su explosión.

### **7.2.3- Velocidad de detonación (VOD)**

Esta característica del explosivo es la más importante, la velocidad de detonación del explosivo es directamente proporcional a la potencia.

La detonación del explosivo corresponde a una transformación casi instantánea de la materia sólida que lo compone en gases. La transformación se hace a elevadas temperaturas con un gran desprendimiento de gases aproximadamente 10.000 veces su volumen.

Los factores que afectan la VOD son:

- Tipo de roca
- Diámetro
- Confinamiento
- Densidad

### **7.2.4- Potencia explosiva**

La potencia corresponde a la capacidad de un explosivo de fragmentar y desplazar la roca. Es la máxima energía disponible de un explosivo, para desplazar el medio confinante.

Por un lado, la potencia depende de la composición del explosivo, pero este se puede mejorar con una apropiada técnica de tronadura. Una de las técnicas más aplicadas para medir la potencia del explosivo es el péndulo balístico por el cual se mide la potencia del explosivo en porcentaje en relación con la goma pura, a la que se le concede por acuerdo la potencia del 100%.

### **7.2.5- Densidad de encartuchado**

La densidad de encartuchado depende en gran medida de la granulometría de los componentes sólidos, y tipo de materias primas destinadas en su fabricación.

Es primordial que en el fondo de los taladros este totalmente lleno de explosivos, si estos tuvieran una densidad menor a 1 y los taladros tuvieran agua física los cartuchos flotarían siendo imposible la carga del taladro.

#### **7.2.6- Resistencia al agua**

Se distinguen tres clasificaciones:

- 1. Resistencia al contacto con el agua**, característica por la que un explosivo no necesita una envuelta especial para mantener sus propiedades de uso intactas un tiempo mayor o menos, por lo cual puede utilizarse en taladros con agua.
- 2. Resistencia a la humedad**, si el terreno presenta agua se empleará gomas, riogees, etc. los cuales se comportan muy bien en presencia de agua.
- 3. Resistencia al agua bajo presión de la misma**, se refiere a que el explosivo no solo soporte el contacto con agua, sino que también tolere altas presiones producto de las grandes profundidades. Los explosivos empleados en este caso contienen como aditivos metales pesados, los cuales le otorgan características muy especiales.

#### **7.2.7- Volumen de gases**

El volumen de gases corresponde a los gases, vapor de agua, polvo en suspensión entre otros productos resultantes de una explosión. También presentan gases dañinos como el óxido de carbono, vapores nitrosos, etc.

El gran problema de la presencia de estos gases es en la minería subterránea, más aún si no existe una buena ventilación del lugar, ya que puede generar inconvenientes o intoxicaciones graves a las personas encargadas de inspeccionar la tronadura.

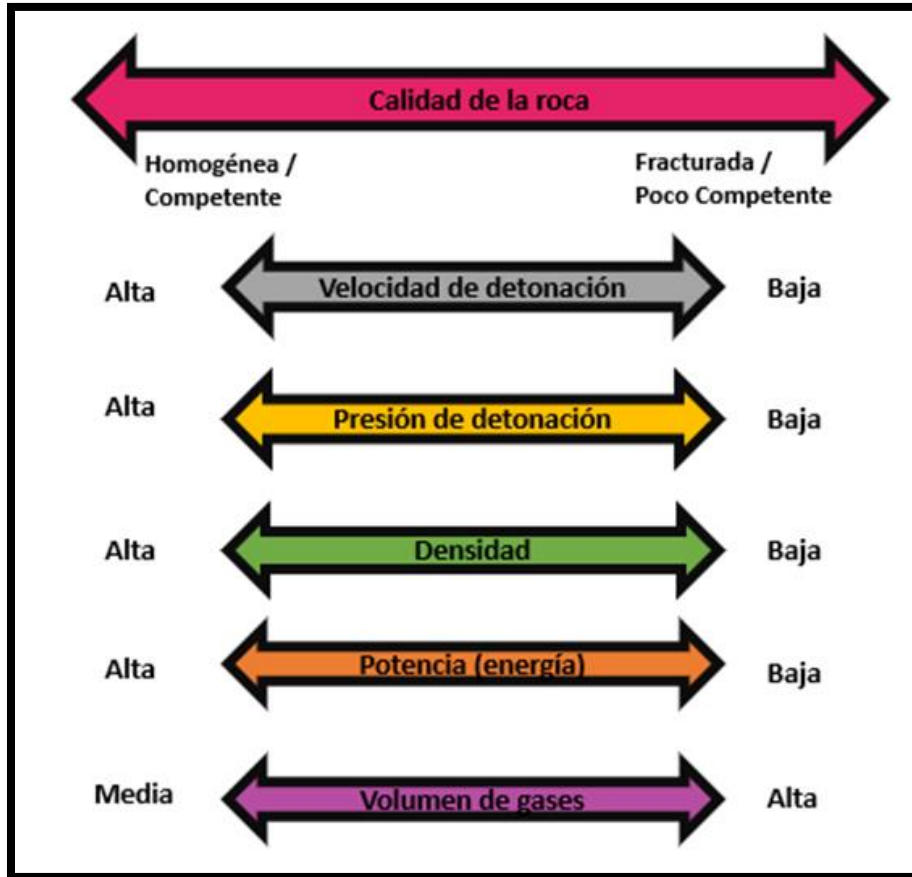


Ilustración 31. Consideraciones para la selección de explosivos (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3 de Berger, E).

### 7.3- Tipos de Explosivos

#### 7.3.1- Dinamita

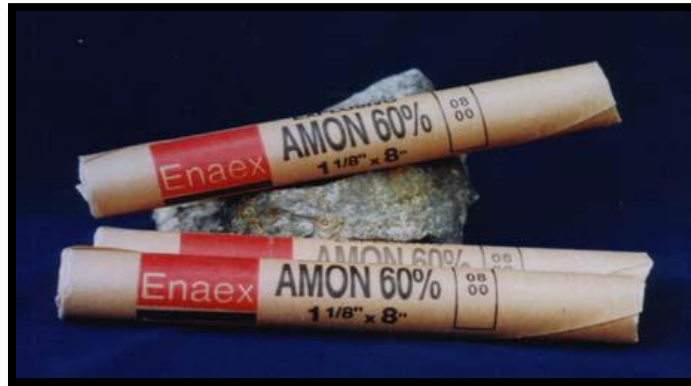
La dinamita es un alto explosivo sensible al detonador, compuesto en su mayoría por la nitroglicerina que es un elemento sensibilizador, mezclado con combustible y oxidantes, todos en medidas adecuadas para mantener un balance de oxígeno.

#### Tipos

- **Gelatinas (Amongelatina 60%)**

La Amongelatina 60% corresponde a una dinamita amoniacal la cual presenta grandes características como su alta velocidad de detonación, alta densidad y una gran resistencia al agua, lo que genera un producto de elevada energía

para producir un efecto rompedor excelente en cualquier tipo de terreno sobre todo en rocas tenaces y de gran dureza, con excepción de las minas de carbón.



**Ilustración 32. Amongelatina 60% (Fuente: Enaex).**

- **Semigelatinas (Tronex Plus)**

El Tronex Plus es una dinamita de tipo semigelatinas, posee una gran velocidad de detonación inclusive en condiciones de poco confinamiento, por lo cual se aplica generalmente como carga principal en desarrollo de galerías y tunelería, también se utiliza en diámetros pequeños como iniciador de Anfo. Es utilizada en minería a rajo abierto y de subterránea exceptuando las minas de carbón.



**Ilustración 33. Tronex Plus (Fuente: Enaex).**

- **Granuladas (Permicarb, Samsonita)**

El Permicarb y Samsonita se utiliza especialmente en la minería del carbón a pesar de que suelen producirse mezclas explosivas de gas grisú y aire, ya que produce una llama de muy corta duración al momento de detonar y no genera altas temperaturas. El Permicarb se controla a través de una cámara de pruebas la cual imita las condiciones de máxima peligrosidad que pueden llegar a producirse en las minas de carbón subterráneas.



**Ilustración 34. Permicarb (Fuente: Enaex).**

### Características

- Fabricación en proceso batch (por lotes)
- Se emplea preferencialmente a pequeños diámetros de taladro subterráneo, túneles, minas cantera y obras civiles.
- Se comercializan frecuentemente en cartuchos de papel parafinado con diámetros desde 22mm hasta 75mm y longitudes de 180mm, 200mm y 340mm, embalados en cajas de cartón de 25kg.

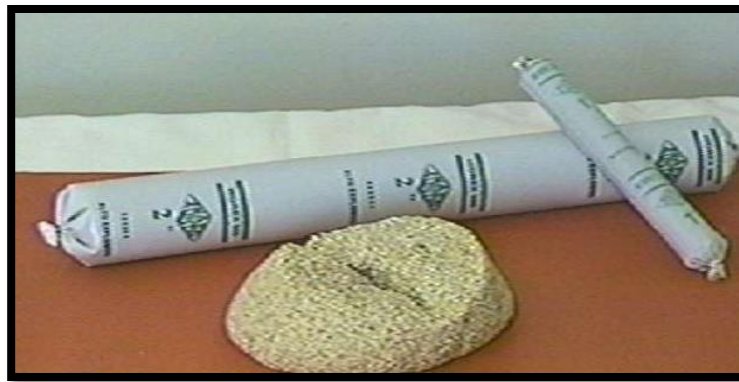
### **7.3.2- Slurries y Aquageles**

Son mezclas húmedas en forma de suspensiones, sus aditivos les permiten presentar la forma de geles.

## Tipos

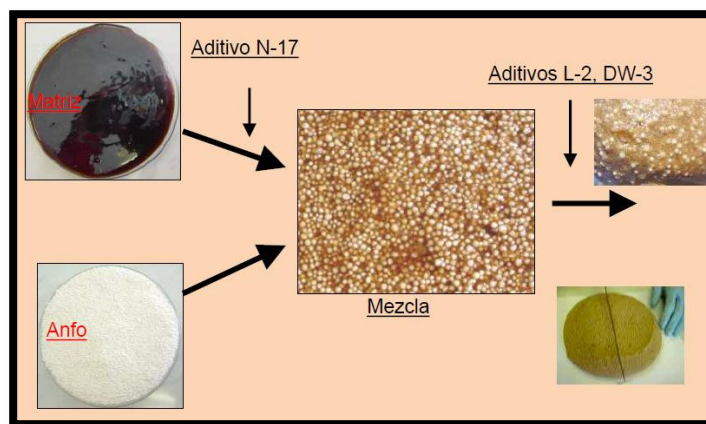
- **Aquageles de pequeño diámetro**

El Hidrex es de densidad variable el cual posee un amplio rango de densidades, fue diseñado especialmente para tronadura amortiguada, control de talud y contorno. Este explosivo sirve en zonas secas y también en presencia de agua, para poder cargarlo se realiza en forma mecanizada con equipos móviles.



**Ilustración 35. Hidrex (Fuente: Enaex).**

- **Aquageles de gran diámetro (DYNOLITE, DYNOGEL)**



**Ilustración 36. Dynolite y Dynogel (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3 de Berger, E).**

## Características

- Fabricación en proceso batch (por lotes)
- Se pueden bombear
- Control de la densidad (0.4 a 1.3 g/cc)
- Trabajos realizados en minería subterránea y de superficie

### 7.3.3- Nitrocarbonitratos

Los Nitrocarbonitratos corresponden a mezclas elaboradas en base a Nitrato de Amonio y combustibles adecuados.

## Tipos

- **Anfo premium**

El Anfo premium se utiliza preferencialmente en diámetros pequeños para el caso de la minería subterránea con zonas de buena ventilación y tronaduras de superficie. Son aplicados en roca competente y en perforaciones sin agua.

El Anfo premium se presenta en sacos de 25 kg, de tejido de polipropileno con bolsa interior de polietileno.



**Ilustración 37. Anfo premium (Fuente: Enaex).**

- **Anfo a granel**

El Anfo a granel se utiliza en minería subterránea en sectores con buena ventilación y también en tronaduras de buena superficie principalmente cuando se desea una moderada concentración de carga. Se utiliza en perforaciones con diámetro mayor a 3”, sin presencia de agua y una ventaja importante es su bajo costo.

El Anfo a granel se entrega de forma mecanizada, de forma directa en las perforaciones de diámetros medianos a grandes, a través de camiones fabrica vaciadores (“auger” o “quadra”).



**Ilustración 38. Anfo a granel (Fuente :Enaex).**

- **Anfo aluminizado**

Los Anfos aluminizados se utilizan para tronaduras de superficie y en el caso de subterránea deben presentar los lugares una buena ventilación. Se utilizan en terrenos secos cuando se requiere una alta concentración de carga por longitud de perforación.

Se despachan en sacos de 25 y 50 kg, de tejido de polipropileno con bolsa interior de polietileno y en minería a rajo abierto se pueden cargar mecánicamente en las perforaciones a través de camiones.



**Ilustración 39. Anfo aluminizado (Fuente: Enaex).**

- **Anfo AST**

Los Anfos AST son agentes de tronadura fabricados con nitratos de amonio, de sodio y/o de calcio, los cuales se diseñan principalmente para tronaduras con diámetros superiores a las 2” en minería subterránea. Son ideales para minería subterránea y superficie, en terreno sin presencia de agua, en el caso de utilizarse en minería subterránea debe existir una buena ventilación.

El Anfo AST se ofrecen en sacos de 25 y 50 kg. de tejido de polipropileno con bolsa interior de polietileno y se elaboran a pedido.

- **Anfo liviano**

El Anfo liviano se fabrica con nitrato de amonio grado explosivo enaex, tienen una menor densidad y mayor sensibilidad en comparación con los anfos normales debido a que contienen en su fórmula elementos reguladores de densidad. Esta característica es necesaria para lograr una baja concentración de carga por longitud de perforación, optimizando la distribución de energía para reducir el daño al contorno.

Se presentan en sacos de 25 y 50 kg de tejido polipropileno con bolsa interior de polietileno y se elaboran a pedido.



**Ilustración 40. Anfo liviano (Fuente: Enaex).**

#### **7.3.4- Iniciadores y rompedores ADP**

Es un producto a base de pentrita (PETN) y TNT, mezcla que se denomina pentolita.

##### **Tipos**

- **Iniciadores cilíndricos**

Los iniciadores cilíndricos APD (Alto Poder de Detonación), son cargas explosivas de una alta potencia y poseen una alta seguridad producto de su insensibilidad a los golpes o roces. Este iniciador es el más eficiente de los que se fabrican y es recomendable para diámetros medianos y grandes.



**Ilustración 41. Iniciadores cilíndricos APD-P (Fuente: Enaex).**

- **Rompedores cónicos**

Los rompedores cónicos APD (Alto Poder de Detonación), son cargas explosivas de alta potencia y tienen una gran seguridad ya que, son insensibles a los golpes o roces. Es muy eficaz para disminuir los bolones en el caso que no sea factible realizar perforaciones en las labores subterráneas o rajo abierto y es útil también para eliminar material atascado en chimeneas y piques.

### Características

- Fabricación en proceso batch (por lotes)
- Alta velocidad de detonación (VOD) (sobre 7.000 m/s)
- Mayor resistencia (comparativa) al fuego, impacto y fricción
- Poseen efecto direccional (rompedores)

### **7.3.5- Emulsiones**

Es un sistema que contiene dos fases líquidas naturalmente inmiscibles entre sí, una de las cuales es dispersa como pequeñas gotas dentro de la otra.

## Tipos

- **Emulsiones de pequeño diámetro**

EMULEX corresponde a una emulsión explosiva envasada en diámetro pequeño, es sensible al fulminante N°8, tiene un rango amplio de aplicación en las tronaduras exceptuando en las minas de carbón.



**Ilustración 42. Emulex (Fuente: Enaex).**

- **Emulsiones diámetro intermedio**

EMULTEX E corresponde a una emulsión explosiva envasada de diámetro intermedio, no es sensible al fulminante N°8, es diseñado para cargar diámetros intermedios en faenas con gran cantidad de agua en los tiros largos, donde no es posible vaciar o cargar de forma mecanizada.

- **Emulsiones de gran diámetro**

EMULTEX N y G son a granel, se compone de la mezcla de Anfo y emulsión matriz para perforación de diámetros de 6" o más. En el caso del EMULTEX G es gasificado químicamente en el momento del carguío, el cual le concede muy buenas propiedades de detonación y permite modificar su densidad, y, por lo tanto, el factor de carga, conforme a las necesidades del terreno.

Esta emulsión se bombea en forma mecanizada al fondo las perforaciones, con camiones tipo Quadra, se recomienda cuando existe presencia de agua y el volumen de consumo lo justifica.



**Ilustración 43. Camiones tipo Quadra (Fuente: Enaex).**

### **Características**

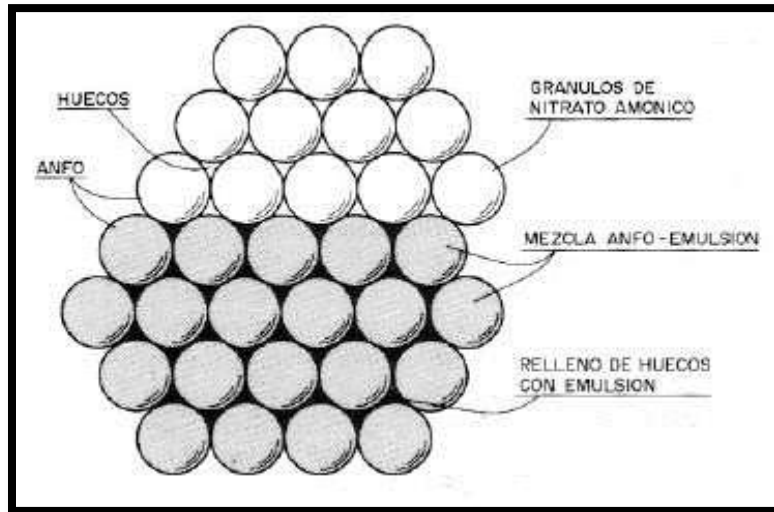
- Estabilidad – transporte y bombeo
- Alta resistencia al agua
- Se pueden formular del tipo encartuchados, bombeables y vaciables
- Control de la densidad a través de gasificación química y microesferas
- Control de VOD a través de adición de microesferas
- Menor tiempo de vida útil, normalmente seis meses
- Facilidad de mezcla con el Anfo para formar el Anfo pesado

### **7.3.6- Anfo pesados**

El Anfo pesado es una mezcla de emulsión base con Anfo. El Anfo presenta unos huecos intersticiales los cuales pueden ser ocupados por explosivos líquidos como la emulsión que actúa como una matriz energética (ilustración 43).

Es importante señalar que las propiedades del explosivo dependerán netamente de los porcentajes de mezcla que presenten, dentro de las ventajas que podemos mencionar

podemos señalar: mayor energía, mejores características de sensibilidad, gran resistencia al agua y la posibilidad de efectuar cargas con variación de energía a lo largo del barreno.



**Ilustración 44. Estructura del Anfo pesado (Fuente: Explosivos: Tipos y propiedades de Watanabe,J (2014)).**

Su fabricación es fácil, la matriz de emulsión puede ser elaborada en una planta fija y transportada en un camión cisterna hasta un depósito de almacenamiento o ser bombeada a un camión mezclador. Las mezclas de emulsión con nitrato amónico y gas oil se pueden preparar in-situ gracias a los camiones y en proporciones adecuadas. (ilustración 45).

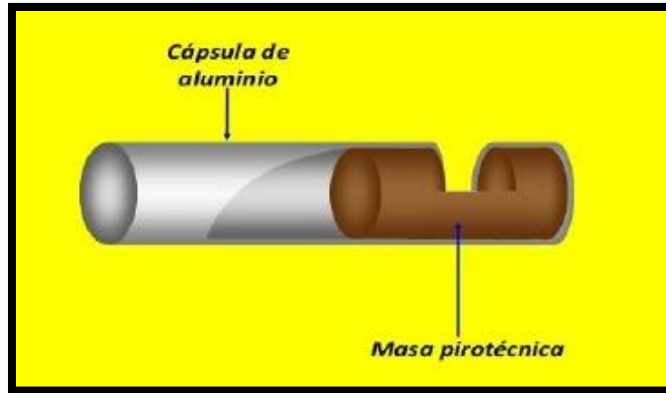


**Ilustración 45. Características de carga y resistencia al agua de diferentes tipos de Anfo pesado (Fuente: Du Pont, 1986).**

## 7.4- Accesorios de tronadura

### 7.4.1- Fulminante simple N°8

El Fulminante Simple N° 8 es uno de los componentes del sistema tradicional de voladura. Está conformado por un casquillo cilíndrico de aluminio cerrado en uno de sus extremos, en cuyo interior lleva una carga primaria de un explosivo sensible a la chispa y otra carga secundaria de alto poder explosivo (ilustración 45). El Fulminante Simple N° 8 tiene todas las garantías para un buen funcionamiento, siempre y cuando, se cumplan con las recomendaciones de un adecuado fijado a la mecha de seguridad, controlando principalmente la impermeabilidad en el lugar donde se encuentra el referido fijado. A continuación, se presenta en la Tabla 7 sus principales características técnicas.



**Ilustración 46. Componentes del fulminante N°8 (Fuente: Agentes de voladura sensible al fulminante N°8, Salazar,K. (2017) ).**

**Tabla 7. Características técnicas del fulminante simple N°8. (Fuente: Explosivo en métodos a cielo abierto, Perez, I. , Pinto,G., Quintanilla,J &Araya,C. (2015)).**

<b>Características técnicas</b>	<b>Especificaciones</b>
<b>Longitud del fulminante (mm)</b>	48.50 ± 0.10
<b>Diámetro externo (mm)</b>	6.10 ± 0.10
<b>Diámetro interno (mm)</b>	5.40 ± 0.10
<b>Volumen trauzi (m<sup>3</sup>)</b>	23.36
<b>Resistencia al impacto (2kg en 1 metro)</b>	Si cumple
<b>Carga explosiva total (mg)</b>	900
<b>Sensibilidad a la chispa de la mecha de seguridad</b>	Buena

#### **7.4.2- Mecha de seguridad**

Es un componente principal del sistema tradicional de iniciación. Su estructura está conformada por diferentes capas de materiales, los que se encargan de garantizar la continuidad de la combustión y compactación además de proteger el núcleo central de la pólvora, el que transfiere el fuego hasta el detonador a una velocidad pareja.

Finalmente, el recubrimiento final de material plástico permite que tenga una resistencia a la humedad, a la abrasión, a los esfuerzos mecánicos y una excelente impermeabilidad, también en las condiciones más severas como es el caso de evitar que el fuego se traspase de un tramo de mecha de seguridad a otro cuando estén cerca con el fin de minimizar la producción de las chispas laterales.

Recomendaciones al momento de ser ensamblado para iniciar de forma correcta el detonador común:

- La mecha de seguridad debe cortarse perpendicular a su eje.
- Evitar la caída del núcleo de pólvora de la mecha de seguridad producto de una manipulación brusca de las puntas cortadas u otro caso.
- Al momento de colocar la mecha de seguridad en contacto con el detonador tener cuidado de no dejar espacios vacíos.



**Ilustración 47. Mecha de seguridad (Fuente: Tecnovoladuras).**

**Tabla 8. Características de la mecha de seguridad (Fuente: Famesa).**

<b>Características Técnicas</b>	<b>Especificaciones</b>
<b>Núcleo de pólvora (g/m)</b>	6.00
<b>Tiempo de combustión a.n.m (s/m)</b>	150 ± 10%
<b>Longitud de la chispa a.n.m (mm)</b>	50
<b>Diámetro externo (mm)</b>	5.20
<b>Color del recubrimiento plástico</b>	Blanco
<b>Impermeabilidad</b>	Buena
<b>Resistencia a la tensión durante 3 minutos (kg)</b>	30

### 7.4.3- Mecha rápida

Es uno de los componentes del sistema tradicional de tronadura, se utiliza en complemento con la mecha de seguridad de cierta longitud, donde en los extremos se encuentra sujetos el fulminante simple y el conector de ignición. El circuito de conexión de la mecha rápida se realiza introduciéndola en la ranura de los conectores y asegurándola respectivamente con el collar plástico incorporado, luego de haber realizado esto la mecha esta lista para ser activada a través de un fósforo u otro agente externo.

El objetivo principal de la mecha rápida es eliminar el chispeo manual de la mecha de seguridad, con el fin de evitar la exposición de los operadores a los humos producidos por la combustión.

Factores que determinan la longitud de la mecha rápida usada entre dos taladros:

- Tipo de trabajo
- Tiempo de combustión de la mecha rápida
- El circuito de conexión
- Tiempo de combustión de la mecha de seguridad



**Ilustración 48. Mecha rápida (Fuente: Famesa).**

**Tabla 9. Características técnicas de la mecha rápida (Fuente: Famesa).**

<b>Características Técnicas</b>	<b>Especificaciones</b>
<b>Peso promedio del material pirotécnico (g/m)</b>	5.00
<b>Diámetro externo promedio</b>	1.90
<b>Peso total promedio</b>	6.50
<b>Tiempo de combustión a.n.m</b>	30 – 45
<b>Cobertura</b>	Plástica

#### **7.4.4- Detonador ensamblado**

El detonador ensamblado es utilizado en conjunto con la mecha de rápida con la que se efectúa el circuito de encendido de una tronadura planificada, dentro de las ventajas que presenta usar este detonador se encuentran: evitar el chispeo manual de la mecha de seguridad y la eliminación de los posibles problemas que se pudieran generar en la preparación de los detonadores ensamblados en la mina.

Accesorios que componen el detonador ensamblado:

- 1. Fulminante simple N°8**
- 2. Mecha de seguridad**, el largo que se usará dependerá de la profundidad del taladro y del circuito de conexión establecido.
- 3. Conector de ignición**, en un extremo de la mecha de seguridad se encuentra el conector de ignición junto con su collar plástico y en el otro extremo el fulminante simple.

**Tabla 10. Longitud y cantidad de piezas por caja de cada componente del detonador ensamblado (Fuente: Famesa).**

Componentes	Longitud de la mecha seguridad metros	Cantidad de piezas por caja
Fulminante simple N°8	2.1	350
Mecha de seguridad	2.4	350
Conector de ignición	2.7	300

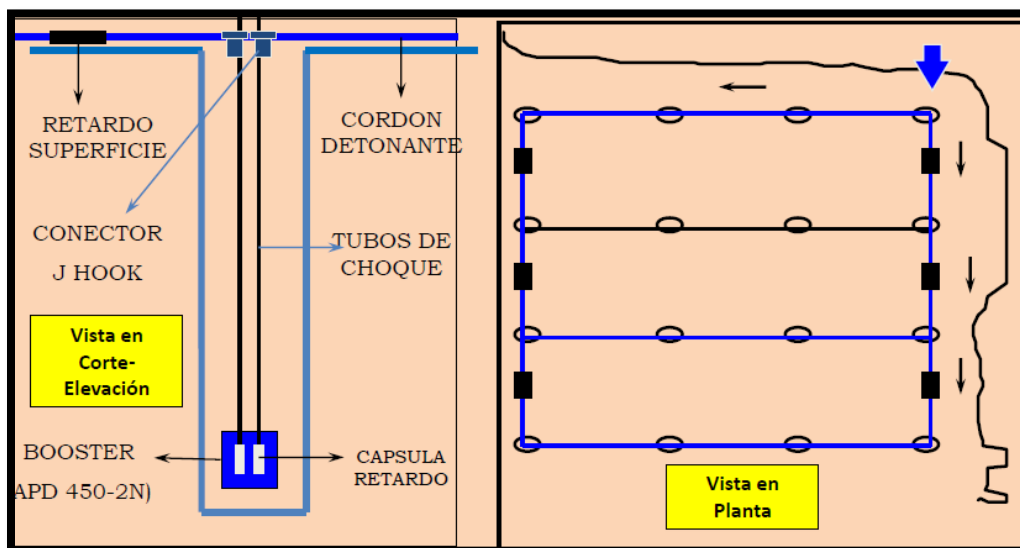
### 7.4.5- Detonador no eléctrico

En el sistema no eléctrico la iniciación se propaga a través del cordón detonante, tubos de choque (noneles) o una combinación de ambos. Este sistema se divide en dos subgrupos:

#### 7.4.5.1- Tradicional

Corresponde a un sistema mixto, compuesto principalmente de dos partes:

- Cordón detonante en superficie, en conjunto con conectores de retardo de superficie.
- Tubo de choque en el pozo, en conjunto con la capsula de retardo.

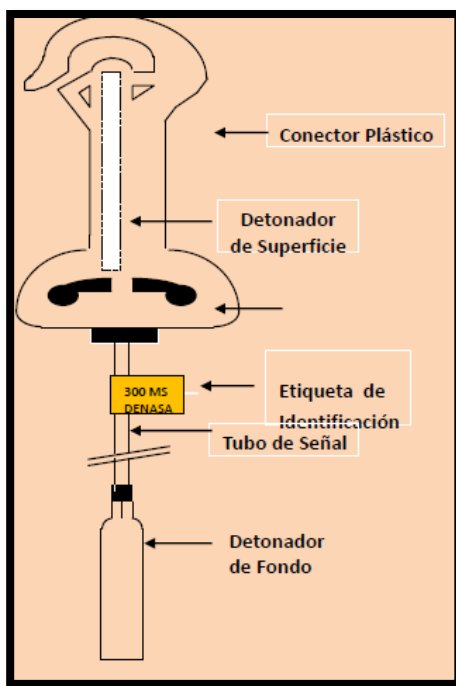


**Ilustración 49. Vista en corte-elevación y vista en planta del detonador no eléctrico- Tradicional (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3, Berger, E).**

#### 7.4.5.2- Silencioso

Constituido por dos elementos:

1. El detonador EZ-DET<sup>m.r.</sup> formado por:
  - Un tubo de señal, con largo de acuerdo a la geometría del disparo.
  - Un detonador PRIMADET<sup>m.r.</sup>, de un tiempo de retardo adecuado a la aplicación y destinado a iniciar la carga de fondo del tiro.
  - Un detonador PRIMADET<sup>m.r.</sup> pero de baja potencia y alojado en un conector plástico.
  - Etiquetas de identificación, las que indican el largo del tubo de señal y el tiempo nominal de retardo de ambos detonadores.
2. La líneas troncales EZ<sup>m.r.</sup> (LTEZ<sup>m.r.</sup>), usadas para crear puentes entre corridas y para cerrar circuitos en superficie



**Ilustración 50. Componentes del detonador no eléctrico – silencioso (Fuente: Tecnologías de excavación de rocas del módulo 3 de Berger, E).**

#### **7.4.6- Detonador eléctrico**

Su principal característica es la casi nula dispersión del tiempo de retardo asignado lo cual lo diferencia significativamente de los otros detonadores usados para la iniciación de los tiros. Su uso es más masivo en rajo abierto por un tema de costo, sin embargo, también se ha usado en minas subterráneas.

BlastWeb es capaz de disparar cinco tipos diferentes de iniciadores:

- El detonador electrónico DigiShot™ Plus, usado en áreas de producción.
- El detonador electrónico subterráneo QuickShot™ Plus, usado para iniciar túneles.
- El detonador electrónico subterráneo NetStart™, diseñado para iniciar el cordón detonante.
- El detonador electrónico subterráneo NetShock™, utilizado para iniciar el tubo de choque

#### **7.4.7- Línea silenciosa**

Corresponde a un sistema de iniciación no eléctrico conformado por detonador instantáneo, unido a un tubo de choque para transmisión de señal. Se puede utilizar en minería subterránea, rajo abierto y obras civiles, la cual permite la iniciación a distancia entregando mayor seguridad en su uso. Dentro de las ventajas que presenta es que no está sujeto a las condiciones atmosféricas u ondas electromagnéticas.

Gracias a la utilización de los conectores la operación resulta más simple y rápida ya que, su composición incluye una capsula de aluminio de 54 mm, una carga de baja potencia con la capacidad para la iniciación de 4 tubos de choque de la línea EXEL y cordones detonantes.



**Ilustración 51. Línea silenciosa (Fuente: IPG).**

**Tabla 11. Presentación y embalaje de la línea silenciosa (Fuente: Línea silenciosa, Exsa).**

<b>Compr. de tubo (m)</b>	<b>Unidades/caja</b>	<b>Peso neto</b>	<b>Peso bruto</b>
500	1	2.94	4.52
700	1	4.25	5.25

#### **7.4.8- Cordón detonante**

Es un cordón formado por un núcleo central de explosivo recubierto por una serie de fibras sintéticas y una cubierta exterior de plástico, que conforman en conjunto un cordón flexible, resistente a la tracción e impermeable.

#### **Principales características**

- Su función es lograr transmitir una onda de choque desde un punto a otro.
- Producto de su gran potencia es capaz de iniciar los explosivos encartuchados tales como dinamitas, pentolitas y emulsiones.
- Dependiendo de la concentración lineal del PETN en Chile se comercializan cordones de 1.5, 3, 5, 8,10, 50 gr/m y otros.

**Tabla 12. Tipos de cordones detonantes (Fuente: Tecnología de excavación de rocas del módulo 3, Berger, E).**

Tipos y características	Pentrita (gram/pie)	Pentrita (grs/mt)	Diámetro (mm)	Empaque (mts/caja)	Empaque (kgs/caja)
<b>Primacord reforzado</b>	50	10	5.6	700	15
<b>Primacord E-Cord</b>	25	5	5.1	1000	15
<b>Primacord detacord</b>	15	3	4.0	1000	13
<b>Primacord primaline</b>	8	1.5	4.0	1600	18
<b>Sísmico S-200</b>	200	40	8.2	300	20
<b>Sísmico S-150</b>	150	30	7.1	400	22
<b>Denacord 10</b>	50	10	4.4	1000	18
<b>Denacord 5</b>	25	5	3.5	1400	16
<b>Denacord 3</b>	15	3	3.3	1800	18
<b>Denacord 2</b>	8	1.5	3	1800	16

#### 7.4.9- Booster

El Booster corresponde a un explosivo potente compuesto por tetranitrato de pentaeritritol (Pent) y TNT , el cual posee una alta densidad, velocidad y presión de detonación, por lo que la columna explosiva que será activada con éste maximizará su desarrollo energético, lo cual redundará favorablemente en el resultado de la voladura.



**Ilustración 52. Booster (Fuente: Enaex).**

## 8.- FORTIFICACIÓN

La estabilidad de las obras subterráneas y de los túneles dependerá de la calidad de la roca, sección de la labor entre otros, en la mayoría de los casos se requiere reforzar con el fin de que quede garantizada la estabilidad a corto y largo plazo, así como su adecuada funcionalidad durante su vida útil.

Para definir el diseño más adecuado de fortificación, se pueden emplear algunos de los sistemas de clasificación geotécnica para macizos rocosos, tales como, el RMR de Beniaowski, RMR de Laubscher , el Q de Barton , MRMR (Modified RMR) el cual agrega esfuerzos in situ e inducidos y efectos de tronadura y alteración por exposición ; otros basados fundamentalmente en las propiedades mecánicas y/o estructurales de las masas rocosas como el GSI , tanto el RMR como el GSI son ampliamente utilizados para el diseño y cálculo de estabilidad de las excavaciones a cielo abierto como subterráneas.

Los objetivos del revestimiento o fortificación son:

- Evitar los derrumbes.
- Proteger a los trabajadores y maquinaria.
- Evitar la deformación del macizo rocoso.
- Resguardar el acceso a las distintas labores.
- Impermeabilizar la labor.
- Mantener la estabilidad.

Por un lado , tenemos el concepto de sostenimiento , el cual es un refuerzo provisional del terreno durante el tiempo de ejecución de la obra subterránea, en cambio el revestimiento o fortificación es el refuerzo definitivo o final que debe garantizar la estabilidad , durabilidad y adecuada funcionalidad de la obra subterránea a largo plazo , en otras palabras es la actividad que se enfoca principalmente en el mantenimiento del vacío que se genera al realizar una excavación de explotación subterránea.

El sostenimiento responde a exigencias progresivas de resistencia, como son:

- Evitar los pequeños desprendimientos, o bien el deterioro de las rocas meteorizables.
- Limitar las deformaciones incompatibles con los modelos de diseño, o bien resistir empujes ordinarios del terreno.
- Resistir los empujes extraordinarios, sean del medio “terreno freático”, en casos de presencia de niveles permanentes, sean los empujes de fallas activas o de terrenos muy plásticos o expansivos.

Al revestimiento o fortificación se le asignan exigencias funcionales, prácticamente no resistentes, como:

- Asegurar e. funcionalismo de la obra (el rozamiento de las paredes de una conducción hidráulica), o bien optimizar ciertas características de diseño como la impermeabilidad.
- Albergar, al menos en parte, las instalaciones de explotación o bien propiciar la estética de la obra.

**Reglamento de Seguridad Minera (D.S N°132, capítulo sexto, artículo 157), indica que:**

*“Los trabajos subterráneos deben ser provistos, sin retardo, del sostenimiento más adecuado a la naturaleza del terreno y solamente podrán quedar sin fortificación los sectores en los cuales las mediciones, los ensayos, su análisis y la experiencia en sectores de comportamiento conocido, hayan demostrado su condición de autosoporte consecuente con la presencia de presiones que se mantienen por debajo de los límites críticos que la roca natural es capaz de soportar”*

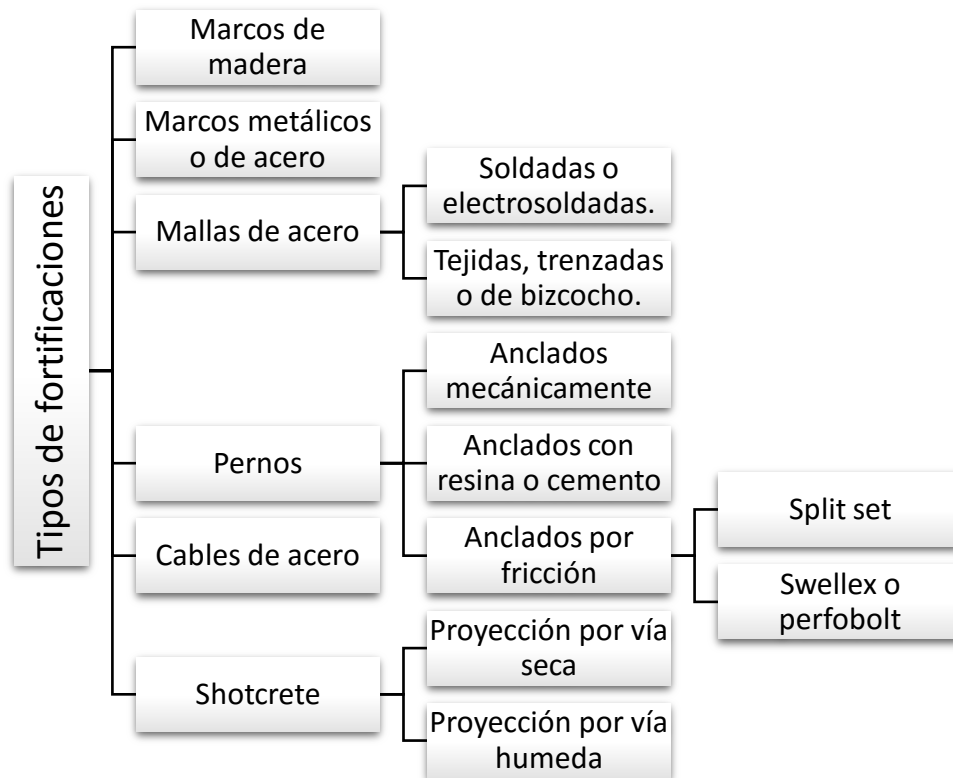
De acuerdo a la Guía Metodológica para Sistemas de Fortificación y Acuñaadura del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), el revestimiento o fortificación se clasifican en dos grandes grupos:

- a) **Fortificación rígida o pasiva:** esta sostiene la excavación sin permitir ningún movimiento de la roca y también deben ser lo suficientemente resistente para sostener los bloques que puedan caerse. Este tipo de fortificación se utiliza actualmente en la

entrada o boca de la mina, donde por razones de mala calidad de la roca o explotaciones hundidas antiguas, se ha perdido totalmente las propiedades resistentes de la roca. En esta clasificación podemos encontrar los marcos de madera o acero.

- b) **Fortificación flexible o activa:** es el sistema que sostiene las paredes y techo de la labor, se permiten deformaciones de la roca con lo cual se logra aliviar los esfuerzos y al momento de deformarse mejoran sus propiedades resistentes.

A continuación, se señalan (ilustración 53) y describen de manera más detallada las fortificaciones que existen para las obras subterráneas y túneles:



**Ilustración 53. Tipos de fortificaciones para túneles (Fuente: Elaboración propia).**

### 8.1-Marcos de madera

Los marcos de madera fue el método más usado durante la minería del siglo pasado, en la actualidad es el más usado a nivel de pequeña minería y en la minería subterránea del carbón debido a su bajo costo, facilidad de manejo y colocación. Por otro lado, hoy en día en la gran

minería tiene un uso restringido a algunos complementos con otros sistemas de sustentación o a sectores muy peligrosos que requieren una fortificación pasiva y temporal.

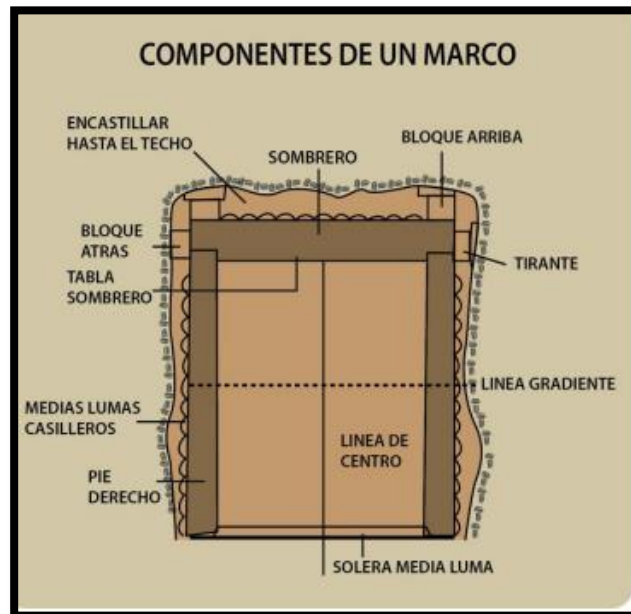
Para la elección de la correcta madera se deben considerar dos factores primordiales:

1. Las condiciones ambientales en las que se utilizará, la cual puede variar desde húmedo hasta seco, influir en los cambios de peso, propiedades mecánicas y durabilidad.
2. Las demandas a las que puede someterse, las cuales pueden variar desde compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, o también esfuerzo de corte, flexión, tracción.

### 8.1.2. Componentes del marco de madera

Los marcos de madera se componen de tres partes principales:

1. Sombrero o viga en posición horizontal,
2. Dos postes (pie derecho o vertical), las que sostienen al sombrero.
3. Solera, la cual se sitúa entre los postes en el piso de la labor.



**Ilustración 54. Componentes de un marco de madera (Fuente: Guía N° 5 de operación para la pequeña minería de fortificación y Acuñaadura, Sernageomin).**

Las siguientes reglas deben tomarse en consideración a la hora de la instalación de los marcos:

- Desquinchar, acuñar y limpiar la labor.
- Para el apoyo de los postes será necesario realizar un herido de mínimo 10 cm para poder afianzarlos al piso.
- Situar la solera, en algunos casos sin descuidar la línea de gradiente.
- Encajar entre el sombrero y poste. Al momento de prensar el poste al sombrero este debe estar asegurado mediante la aplicación de un taco en forma de cuña u otro medio igual de eficiente.
- En las labores de confluencia pronunciada (levante de techos), para completar la fortificación deben colocarse tendidos de madera entre el techo y el sombrero, estos se afirmarán a presión.
- La unión del poste al sombrero debe realizarse de tal manera que se logre el mejor contacto directo entre las piezas unidas, idealmente sin intercalar las cuñas entre las superficies de contacto.
- En el caso de labores inclinadas (chiflones, rampas, etc.) para una correcta instalación de los postes, su base debe quedar instalada en la bisectriz del ángulo que forma la normal al piso de la galería y la vertical al mismo punto.

**Tabla 13. Ventajas y desventajas de los marcos de madera (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo.</li> <li>• Facilidad de manejo e instalación.</li> <li>• Buenas condiciones de flexibilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altamente combustible.</li> <li>• Degradable fácilmente por organismos parasitarios (ej.: hongos, insectos, etc).</li> <li>• Corta vida útil.</li> </ul>

## **8.2-Marcos metálicos o de acero rígido**

A inicios de la década de los 40 se inició y desarrolló el marco metálico, el cual reemplazo de manera gradual los marcos de madera, puesto que son mucho más sencillos y rápidos de colocar y ceden muy poco, ya que no se destruyen tan fácil como la madera. Los marcos metálicos son utilizados especialmente bajo condiciones elevadas de inestabilidad, donde las presiones son demasiado altas para otro tipo de sostenimiento.

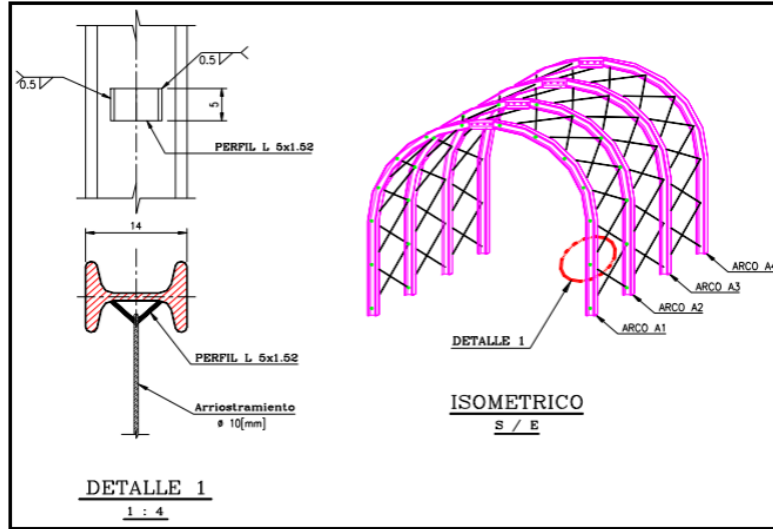
Se trata de una fortificación de tipo definitivo y pasivo, ya que modifican el exterior de la labor y actúan al momento de que el macizo rocoso comienza a padecer deformaciones o sollicitaciones.

Estos marcos de acero (ilustración 56 y 57) se conforman por dos o más piezas metálicas de sección H, L, U. La configuración de estos marcos puede estar formada por elementos curvos o seguir líneas rectas como la enmaderación. Para realizar la unión de las piezas se soldán placas metálicas a los extremos de las piezas del marco para luego unirlos a través de los pernos.

Las partes principales de un marco son:

- Dos pies derechos o postes verticales o inclinados.
- Una corona o viga (1,2 o 3 piezas)

En cambio, los túneles construidos para acueductos, de sección circular, los diseños de los marcos son totalmente circulares conformados por cuatro piezas convexas que constituyen la sección deseada. Una de las grandes ventajas es que la parte convexa se apoya sobre el terreno y no logra doblarse.



**Ilustración 55. Detalles del marco de acero (Fuente: Fortificación de Minas, Sernageomin).**



**Ilustración 56. Marco de acero (Fuente: Marco de acero, Industria Minera).**

**Tabla 14. Ventajas y desventajas de los marcos metálicos o de acero rígido (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incombustible (acero).</li> <li>• Reutilizable.</li> <li>• Gran resistencia a la humedad, temperatura, agua y gases.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de transporte es alto.</li> <li>• Más sensible a la corrosión que otros materiales.</li> <li>• Material más caro.</li> </ul>

### **8.3-Mallas de acero**

Estas mallas de acero son elaboradas con un alambre de acero especial de una gran resistencia, con diferentes espesores, los cuales permiten una mayor distancia entre anclajes. Es importante indicar que el alambre se encuentra protegido contra la corrosión por una combinación especial cuatro veces mejor que el galvanizado habitual.

#### **Uso**

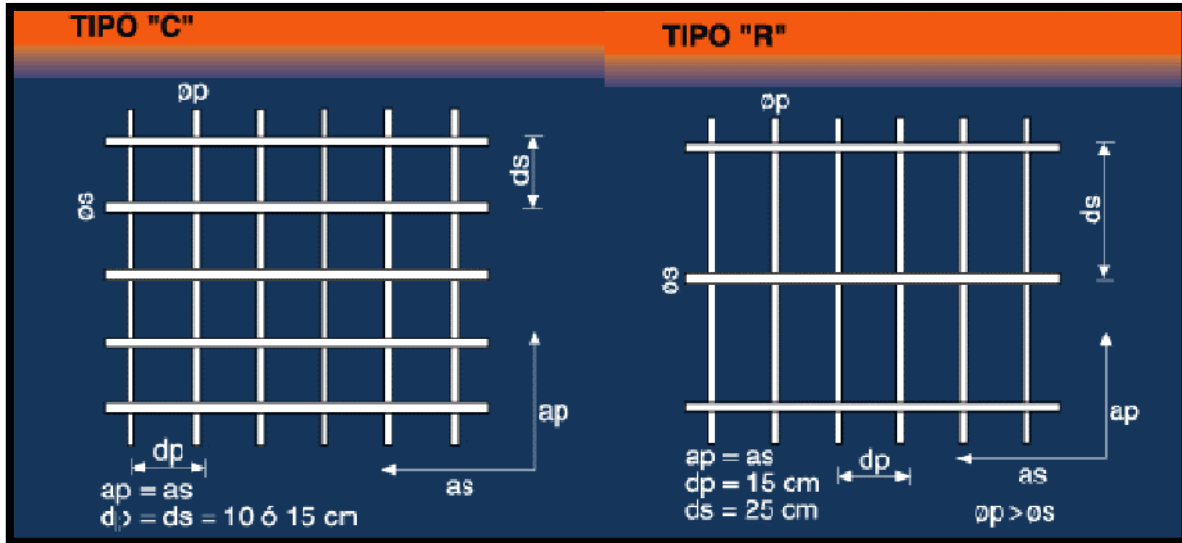
- Zonas comprometidas producto de estallido de rocas o donde el macizo rocoso se encuentra muy alterado y, por tanto, fragmentado.

En la construcción minera subterránea se utilizan asiduamente los siguientes tipos de mallas:

1. Mallas mineras soldadas o electrosoldadas.
2. Mallas mineras tejidas, trenzadas o de bizcocho.

Las mallas soldadas o electrosoldadas se singularizan principalmente por tener pesos y medidas conocidas, presentan uniones mucho más sólidas y terminaciones de una alta calidad, las secciones de acero se mantienen sin cambios, ya que poseen uniones soldadas que no se corren. Las principales ventajas que poseen es que son fáciles y rápidas de instalar, lo cual ahorra tiempo y dinero; también nos entrega la posibilidad de colocar shotcrete en una etapa posterior.

Son elaboradas a partir de alambres o barras de acero unidas a través de soldaduras de punto, son usadas como revestimiento de túneles o también como armadura para estructuras de hormigón armado. Su comercialización puede ser a través de paneles, las cuales son rígidas y son recomendadas en sectores de altos esfuerzos.



**Ilustración 57. Ilustración 58. Mallas Electrosoldadas (Fuente: Fortificación de Minas, Sernageomin).**

En cambio, las mallas tejidas, trenzadas o de bizcocho se reconocen por su flexibilidad y dependiendo de la configuración de fabricación pueden absorber grandes cantidades de energía. Una de las ventajas que posee es su eficacia en la contención de bloques pequeños inestables, provocados por eventos sísmicos y otros.

Se construyen a partir de un alambre en forma de espiral que se enlaza o teje con otro igual, los cuales pueden tener protecciones contra la corrosión mediante una película de zinc (galvanizados) o recubrimiento de plástico (este no es utilizado en la minería por el riesgo de inflamación).

**Ejemplo**

***Malla 100-06, la cual nos indica:***

- Rombo es de 100 mm de abertura
- Alambre utilizado es de calibre N°6

### Procedimiento para la colocación de la malla bizcocho en una labor subterránea:

1. Dimensionar los lados y la superficie a enmallar.
2. Instalar la malla en el terreno con planchuelas y tuercas con pernos helicoidales o clavijas separadas.
3. Primero se instala con un perno en la mitad de la labor.
4. Finalmente se colocan los pernos de sujeción hacia los costados.

Se recomienda instalarla en tramos de 1.0 –1.5 m, con un patrón de pernos de 1.5-2.0 m la malla soporta 2.5 t x m2. Su uso con shotcrete es inapropiado, debido al considerable rebote.



**Ilustración 58.**Malla tejida o de bizcocho (Fuente: Fortificación de Minas, Sernageomin).

**Tabla 15.**Ventajas y desventajas de las mallas (Fuente: Elaboración propia).

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• La malla es muy económica y de rápida instalación.</li><li>• Es fácil aumentar el reforzamiento de techo con una cantidad extra de planchuelas y tuercas.</li><li>• Es de fácil reparación.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La malla no puede transmitir el exceso de carga de la roca fracturada sin fallar.</li><li>• Es fácilmente dañada por la proyección de Rocas de las tronaduras cercanas.</li></ul>

## **8.4-Pernos**

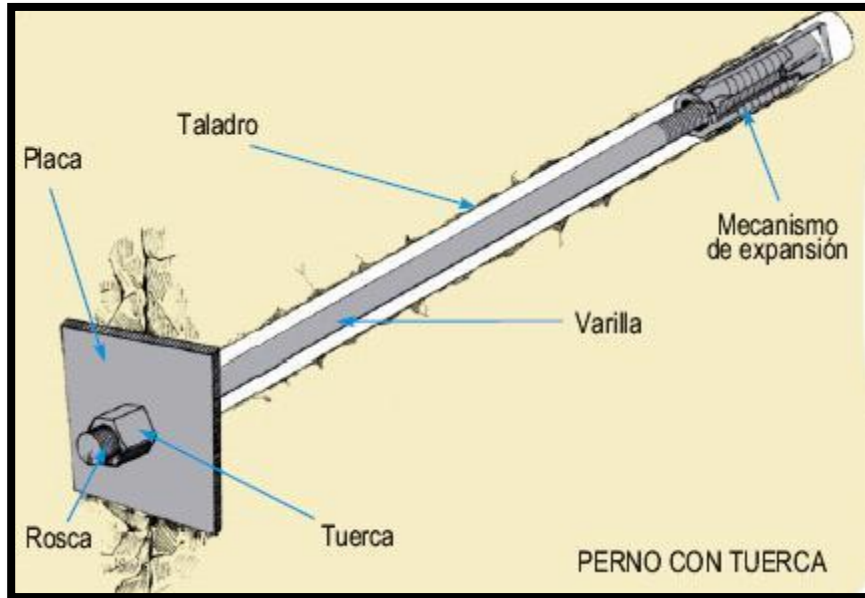
### **8.4.1-Pernos anclados mecánicamente**

Es uno de las más comunes dentro de los tipos de anclaje mecánico. Su funcionamiento es muy simple, al introducir el perno en la perforación y girarlo, las cuñas de la cabeza de expansión se abren, por el accionamiento de una contratuerca, y de esta forma queda sujeta en las paredes de la perforación.

No es recomendable utilizarlo en rocas muy duras, existen muy pocas excepciones ya que, la cabeza de expansión puede que no penetre adecuadamente en las paredes de la perforación y con el tiempo puede resbalar.

Los pernos de anclaje constan de las siguientes partes:

- Cabeza de expansión
- Perno de anclaje
- Plancha metálica (4'x 4'y 1/4" de espesor): planchuela y la tuerca del perno



**Ilustración 59. Perno con tuerca (Fuente: Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea, Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2005)).**

**Datos técnicos**

- Calidad del acero:  $700 \text{ N/mm}^2 = 70 \text{ Kp/mm}^2 = 102 \text{ Kpsi}$
- Diámetro del perno: 16 mm
- Punto de deformación:  $140 \text{ kN} = 14 \text{ ton} = 15.5 \text{ ton (USA)}$
- Carga de rotura:  $180 \text{ kN} = 18 \text{ ton} = 20 \text{ ton (USA)}$
- Peso del perno sin plancha:  $2 \text{ kg/m} = 1.35 \text{ lb/pie}$
- Largo del perno: el largo que se necesite
- Diámetro del taladro:  $35\text{-}38 \text{ mm} = 1 \frac{3}{8}''$

**Tabla 16. Ventajas y desventajas de los pernos anclados mecánicamente (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relativamente de bajo costo.</li> <li>• Trabaja de forma inmediata.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su uso está limitado a rocas moderadamente duras a duras.</li> <li>• Difícil de instalar.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Con un relleno posterior de cemento, puede servir el perno como fortificación permanente.</li> <li>• Rocas duras el perno puede soportar cargas altas y ser versátil.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debe ser monitoreado después de su instalación.</li> <li>• Pierde capacidad debido a tronaduras cercanas o cuando la roca se fractura alrededor de la zona de expansión.</li> </ul>
---	--

#### 8.4.2- Pernos anclados con resina o cemento.

Los pernos anclados con resina o cemento han sido usados en los últimos 40 años en minas y construcciones civiles. El modelo más utilizado es el perno o varilla de fierro o acero, con un extremo biselado, que es confinado dentro del taladro por medio de cemento (en cartuchos o inyectados), resina (en cartuchos) o resina y cemento.

Existen tres mecanismos para lograr el correcto anclaje entre la varilla y la roca a lo largo de la longitud completa del elemento de refuerzo:

1. Adhesión química
2. Fricción
3. Fijación

Es importante destacar que los mecanismos más importantes son la fricción y fijación, ya que la eficiencia de los pernos está en función de la adherencia entre el fierro y la roca proporcionada por el cementante, este cumple la función de proteger al perno contra la corrosión y así aumentar su vida útil.

Tipos de pernos más utilizados:

- **Varilla de fierro corrugado:** generalmente de 20 mm de diámetro, su capacidad de anclaje es del orden de 12 TM.
- **Barra helicoidal:** de 22 mm de diámetro, con longitudes que varían de 5' a 12', su capacidad de anclaje supera las 18 TM, posee forma de rosca continua

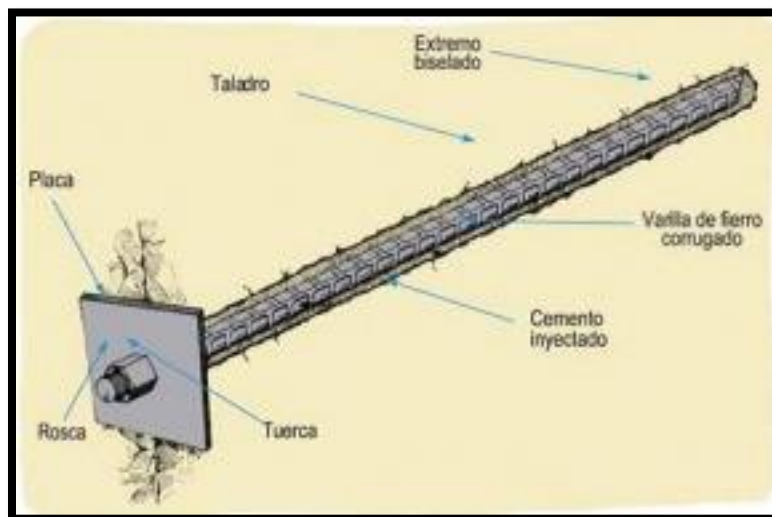
a lo largo de toda su longitud lo cual permite el reajuste de la placa contra la pared rocosa y su mayor diámetro le atribuye una mayor resistencia.

### Uso

- Se pueden utilizar tanto para rocas de buena calidad (sectores de altos esfuerzos) o de muy mala calidad.
- Frente a la presencia de discontinuidades abiertas y/o vacías, no es aconsejable su uso a menos que la inyección de la pasta de cemento pueda ser chequeada.

Los pernos anclados con resina o cemento constan de las siguientes partes:

- Barra de fiero de acero tratado
- Plancha metálica (4'x 4' y 1/4" de espesor): planchuela y la tuerca del perno



**Ilustración 60. Pernos anclados con resina o cemento (Fuente: Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea, Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2005)).**

### Datos técnicos

- Calidad del acero:  $570 \text{ N/mm}^2 = 58 \text{ Kp/mm}^2 = 83 \text{ Kpsi}$
- Diámetro del perno: 20 mm
- Limite elástico: 120 kN = 12 ton = 13 ton (USA)
- Carga de rotura: 180 kN = 18 ton = 20 ton (USA)
- Carga de rotura axial: 15%

- Peso del perno sin plancha:  $2.6 \text{ kg/m} = 1.75 \text{ lb/pie}$
- Largo del perno: el largo que se necesite
- Diámetro del taladro:  $35 \pm 5 \text{ mm} = 1 \frac{3}{8}"$

#### **10.4.2.1- Cemento**

Es utilizado en condiciones de ausencia de agua, al momento de emplear el cemento en cartuchos o inyectados, se necesitan varios días de curado antes que el perno trabaje a carga completa, cuando son instalados de forma correcta generan beneficios tales como su alta resistencia en condiciones de roca dura, son competentes y durables.

Es uno de los sostenimientos más barato, pero este no debe ser utilizado en taladros con agua y tampoco se debe tensar de forma inmediata.

#### **10.4.2.2- Resina**

Se puede emplear en presencia de agua, específicamente en agua ácida; también es factible de utilizar cuando los pernos son sometidos a altas tensiones desde momento tempranos. Existen dos tipos de fraguado: el fraguado rápido (menos de 30 segundos) y el fraguado lento (2 a 4 minutos), el perno trabaja aproximadamente 5 minutos a carga completa, permitiendo así pretensar el perno e instalarlo en presencia de filtraciones de agua.

La presentación de las resinas es en cartuchos con el catalizador separado de la resina, el fraguado se genera por la mezcla producida por efecto de la vuelta del perno al momento de introducir al taladro. Su costo es mayor en comparación a los pernos cementados, pero posee grandes beneficios como proporcionar una alta capacidad de carga en circunstancias de roca dura, resistente a la corrosión y a las vibraciones del terreno y también ofrece acción de refuerzo inmediato luego de su instalación.

### 10.4.2.3- Cemento y resina.

También se pueden instalar las varillas combinando la resina de fraguado rápido con el cemento. El beneficio de realizar esta mezcla es la disminución de los costos. Para este caso, la resina se ubica en el fondo del taladro y el resto es llenado con lechada de cemento o cartuchos de cemento.

Es importante destacar que tanto el cemento como la resina son muy sensibles al almacenamiento subterráneo por largos periodos de tiempo y tienen una vida limitada indicada por el fabricante, debido a esto es muy importante chequear constantemente la calidad del cemento y de la resina antes de utilizarlos.

**Tabla 17. Ventajas y desventajas de los pernos anclados con resina o cemento (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Rápida acción después de haber sido instalado.</li><li>• Si una resina que presenta un rápido fraguado se utiliza para adherir, el perno puede ser constantemente apretado.</li><li>• El perno puede tener alta resistencia a la corrosión en instalaciones permanentes.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Su manipulación puede ser un riesgo en algunos casos.</li><li>• Problema con los cartuchos de resina en los sectores subterráneos.</li></ul>

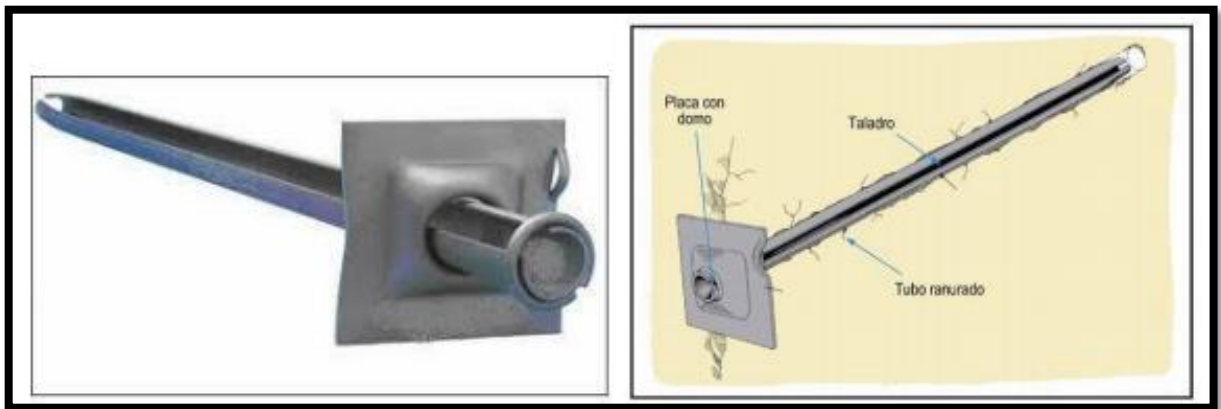
### 8.4.3- Pernos anclados por fricción

Este tipo de técnica del anclado es uno de las más reciente. Se componen de un tubo de acero plegado y la plancha de sujeción. Existen dos tipos de pernos anclados por fricción:

## 1. Split set

El Split set es utilizado principalmente para un reforzamiento temporal, por lo general combinado con algún otro sistema de refuerzo en rocas de calidad regular a mala, no es aconsejable utilizarlos en roca muy fracturada y débil. Son susceptibles a la corrosión en presencia de agua, a menos que sean galvanizados, una de su gran desventaja es su alto costo.

Este perno es un tubo con aberturas a lo largo de su extensión, un extremo lleva un anillo soldado con el fin de mantener la platina y el otro es ahusado. Cuando se introduce el perno a presión dentro de un taladro con menor diámetro, esto provoca una presión radial a lo largo de toda su extensión contra las paredes del taladro, por lo cual se cierran las ranuras de manera parcial.



**Ilustración 61. Perno Split set (Fuente: Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea, Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2005)).**

La tensión de carga en el perno se genera producto del anclaje, el cual se opone al movimiento o separación de la roca circundante al perno. El anclaje se origina por la fricción producida por el contacto con la superficie del taladro y la superficie externa del tubo con aberturas.

### **Características del perno Split set**

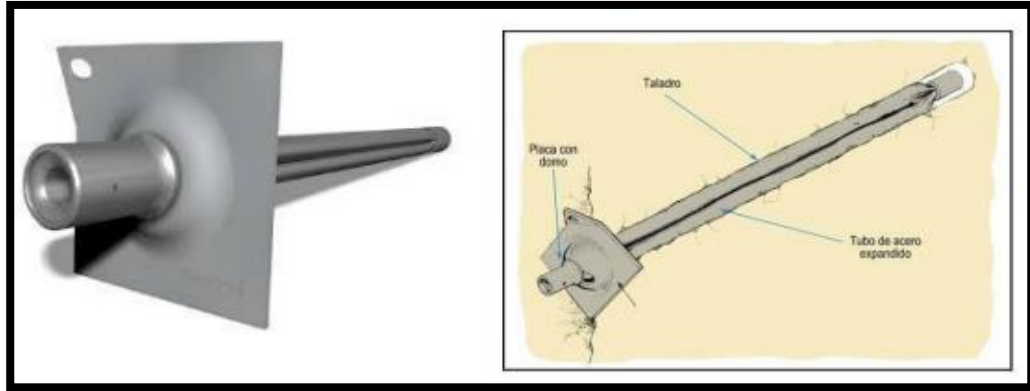
- Diámetro de los tubos ranurados: 35 a 46 mm, con longitudes de 5 a 12 pies.
- Valores de anclaje: 1 a 1.5 toneladas por pie de longitud del perno, esto depende del diámetro de la perforación efectuada, longitud de la zona de anclaje y el tipo de roca.

Es de fácil instalación, se requiere solamente una maquina jackleg o un jumbo. El diámetro del taladro es clave para su efectividad, el diámetro aconsejable para los Split sets de 39 mm es de 35 a 38 mm, con menores diámetros se hace muy complicado introducirlos y con mayores existe un gran riesgo de un anclaje deficiente.

### **2. Swellex o perfobolt**

Los swellex son un sistema alternativo a los pernos split sets, la diferencia es que estos son de mejor rendimiento en rocas de menor calidad para el refuerzo temporal. Existen diferentes tipos de estos pernos lo cual amplía el rango de utilización desde rocas duras a suaves y también en terrenos con gran fracturamiento.

Uno de sus principales problemas es la corrosión, aunque actualmente existen versiones que vienen cubiertas con una capa elástica protectora o son de acero inoxidable y poseen un mayor costo que los pernos Split sets.



**Ilustración 62. Perno Swellex (Fuente: Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea, Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2005)).**

Está conformado por un tubo de diámetro original de 41 mm y su longitud puede alcanzar valores entre 0.6 a 12 m o más (en piezas ensambladas), el cual se pliega en su fabricación para fabricar una unidad de 25 a 28 mm de diámetro, para su inserción no se necesita ninguna fuerza de empuje.

El anclaje se obtiene cuando la varilla se activa producto de la inyección de agua a alta presión (aprox. 30 Mpa o 300 bar) al interior del tubo plegado, el cual lo infla y lo pone en contacto con las paredes del taladro adaptándose a las irregularidades de la superficie del taladro. El anclaje es repartido ya que, se realiza por fricción y por ajuste mecánico.

Cuando se expande el tubo, se produce una tensión de contacto generada entre el tubo y la pared del taladro, lo cual origina dos tipos de fuerzas: una presión o fuerza radial perpendicular a su eje y otra de rozamiento estático, a lo largo de su extensión, cuya dimensión depende de la estructura de la roca y de la dimensión del taladro.

Su instalación es simple y rápida, el efecto de refuerzo es de manera inmediata, y está dotado de arandelas para colocar la malla en cualquier instante.

**Tabla 18. Ventajas y desventajas de los pernos anclados por fricción (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Simple y rápida instalación.</li><li>• Soporte inmediato luego de la instalación.</li><li>• Uso en una variedad de terrenos.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Relativamente caro.</li><li>• En instalaciones permanentes se necesita protección contra la corrosión.</li><li>• Se requiere una bomba para su instalación en el caso de los pernos swellex.</li></ul>

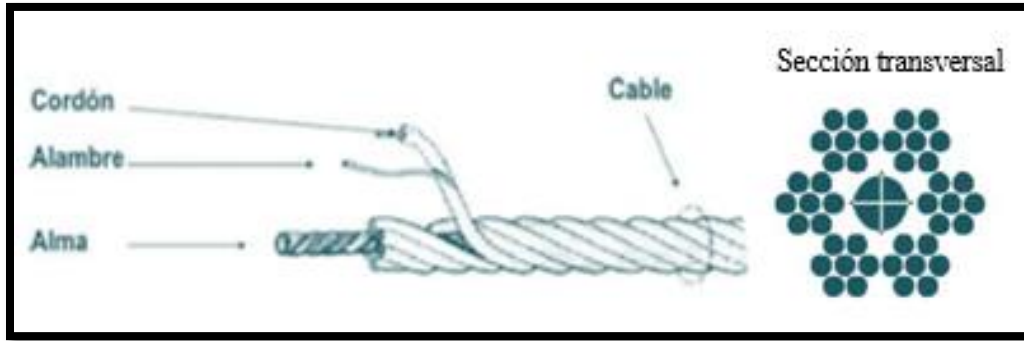
### **8.5-Cables de acero**

Los cables de acero están formados por varios alambres de acero, los que se encuentran doblados helicoidalmente, que forman una cuerda de metal apta para poder resistir los esfuerzos de tracción con capacidades adecuadas de flexibilidad.

#### **Componentes básicos para el diseño de un cable de acero normal (ilustración 63)**

1. Alambres
2. Cordones
3. Alma

Es importante señalar que los componentes pueden cambiar tanto en su complejidad como en la configuración, con el fin de generar cables con propósitos y características distintas.



**Ilustración 63. Componentes de un cable de acero (Fuente: Fortificación de Minas, Sernageomin).**

El alambre es la unidad básica de la construcción de un cable de acero, este se enrolla en el centro de diferente modo o también puede ser en capas con el objetivo de formar el cordón y estos se enrollan en otro centro que se llama alma lo que finalmente da origen al cable de acero.

Cuando ya se han instalado y anclado se pueden tensar a través de herramientas especiales, con esto se logra un reforzamiento adicional lo que genera una mejor estabilidad de la roca. Luego se cementan en toda su longitud para tener un mayor confinamiento y protección a la corrosión, la función del cemento es transferir la carga de la roca al cable y anclaje cable-macizo.

**Tabla 19. Ventajas y desventajas de los cables (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor costo por metro que el apernado.</li> <li>• Instalación de cualquier largo en áreas estrechas.</li> <li>• Alta capacidad de carga en cualquier tipo de roca.</li> <li>• Alta capacidad a la corrosión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalación especial.</li> <li>• El uso de cemento estándar requiere de varios días de fraguado, antes de que el cable pueda tomar carga.</li> </ul>

## **8.6-Shotcrete**

El shotcrete (hormigón proyectado) es utilizado de manera tradicional en la fortificación de los túneles, corresponde a un material que posee una propiedad de adherirse y trabajar de una manera solidaria con cualquier elemento sobre al cual se aplica.

Actualmente se han ido incorporando nuevos avances como las fibras sintéticas las cuales mejoran de manera significativa las propiedades del hormigón, también existen las nanotecnologías, los cables de fibra sintética que evitan la corrosión y las nuevas técnicas de anclaje.

A nivel mundial se avanza en gran medida el uso de dovelas de hormigón o en algunos casos metálicas, esto permite realizar el sostenimiento y revestimiento en forma simultánea, en conjunto de hormigones autocompactantes que son colocados con bombas o shotcrete según sea el caso. Es importante señalar que la gran mayoría de los avances en shotcrete, han apuntado a incorporar equipos de mayor rendimiento, evolucionando en la actualidad a equipos automáticos de colocación.

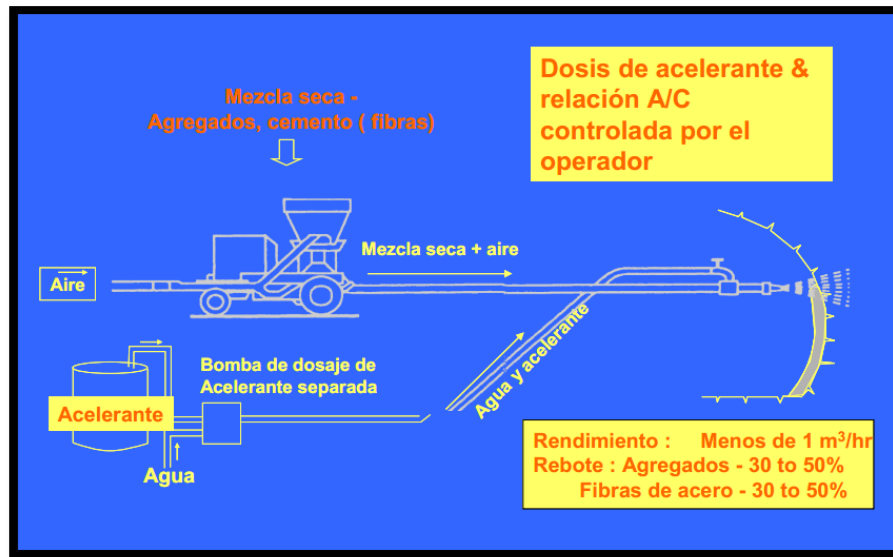
### **8.6.1-Métodos de aplicación del shotcrete**

Existen dos métodos para la aplicación del shotcrete sobre una superficie en específica, los cuales se detallan a continuación:

#### **8.6.1.1-Proyección por vía seca**

En la proyección por vía seca solo se mezclan previamente los materiales secos para luego trasladarlos a través de mangueras mediante aire comprimido, en la boquilla se suministra el agua para la hidratación. Se utiliza para aplicaciones de volúmenes pequeños (reparaciones) y en condiciones muy especiales (distancias largas, interrupciones repetidas).

Existe la opción de agregar un acelerante de forma líquida en la boquilla o otra alternativa es agregar al material seco en forma de polvo previo al bombeo.



**Ilustración 64. Proyección por vía seca (Fuente: Métodos por vía seca o vía húmeda de Muñoz, J. (2017)).**

**Tabla 20. Ventajas y desventajas del Shotcrete por vía seca (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versatilidad.</li> <li>• Simplicidad de maquinaria.</li> <li>• Número de operarios reducido.</li> <li>• Rapidez de instalación de maquinaria y su uso.</li> <li>• Se puede interrumpir la proyección sin problemas o posibles atascos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta porosidad del material instalado.</li> <li>• Necesidad de controlar el polvo formado.</li> <li>• Altos costos operativos debido al desgaste y daños en las máquinas de rotor.</li> <li>• Rebote relativamente alto.</li> </ul>

### 8.6.1.2-Proyección por vía húmeda.

En la proyección por vía húmeda los ingredientes son previamente mezclados para luego depositarlos en una bomba, desde donde se bombean a través de mangueras hasta una boquilla, esta proyección se realiza a través de la aplicación de aire comprimido a la boquilla. Se utiliza este método en todo trabajo de soporte de rocas.

Para apresurar el fraguado y la ganancia de resistencia inicial del concreto en el sustrato existen unos acelerantes que se agregan en la boquilla, gracias a esto se puede realizar una rápida instalación de soporte en obras de construcción de túneles y de excavación de rocas. También existen aditivos que permiten aumentar la duración del concreto, reducen o eliminan la corrosión, o también pueden producir un concreto de baja contracción que logra reducir o eliminar las grietas del concreto y además existe la adicción de fibras a la mezcla del concreto el cual genera un shotcrete dúctil resistente que concede el movimiento del terreno después de la aplicación.

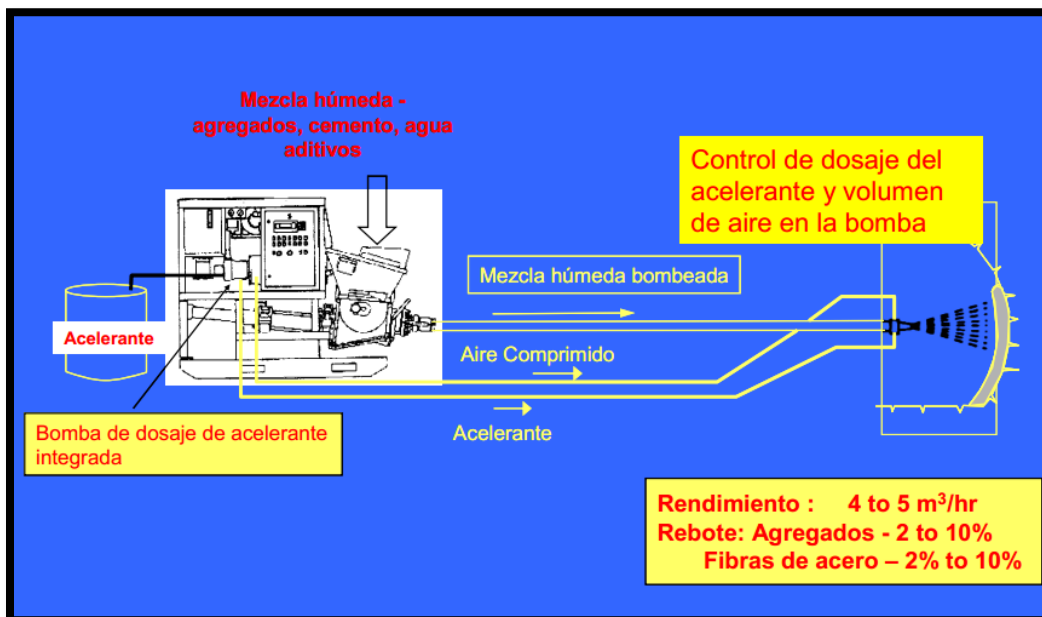


Ilustración 65. Proyección por vía húmeda (Fuente: Métodos por vía seca o vía húmeda de Muñoz, J. (2017)).

**Tabla 21. Ventajas y desventajas de la aplicación del Shotcrete por vía húmeda (Fuente: Elaboración propia).**

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor capacidad de aplicación.</li> <li>• Baja porosidad del material aplicado.</li> <li>• Mejor control de la mezcla húmeda.</li> <li>• Rebote mucho menor</li> <li>• Mejor adherencia.</li> <li>• Producción muy superior, por lo cual es más económico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mano de obra especializada.</li> <li>• Equipo más grande y costoso.</li> <li>• Mayores demandas en la calidad del agregado.</li> <li>• Distancia de transporte limitada (máx. 300 m).</li> <li>• Sólo se permiten interrupciones limitadas.</li> </ul>

### **10.6.2- Equipos**

La selección de los equipos de shotcrete depende de varios factores:

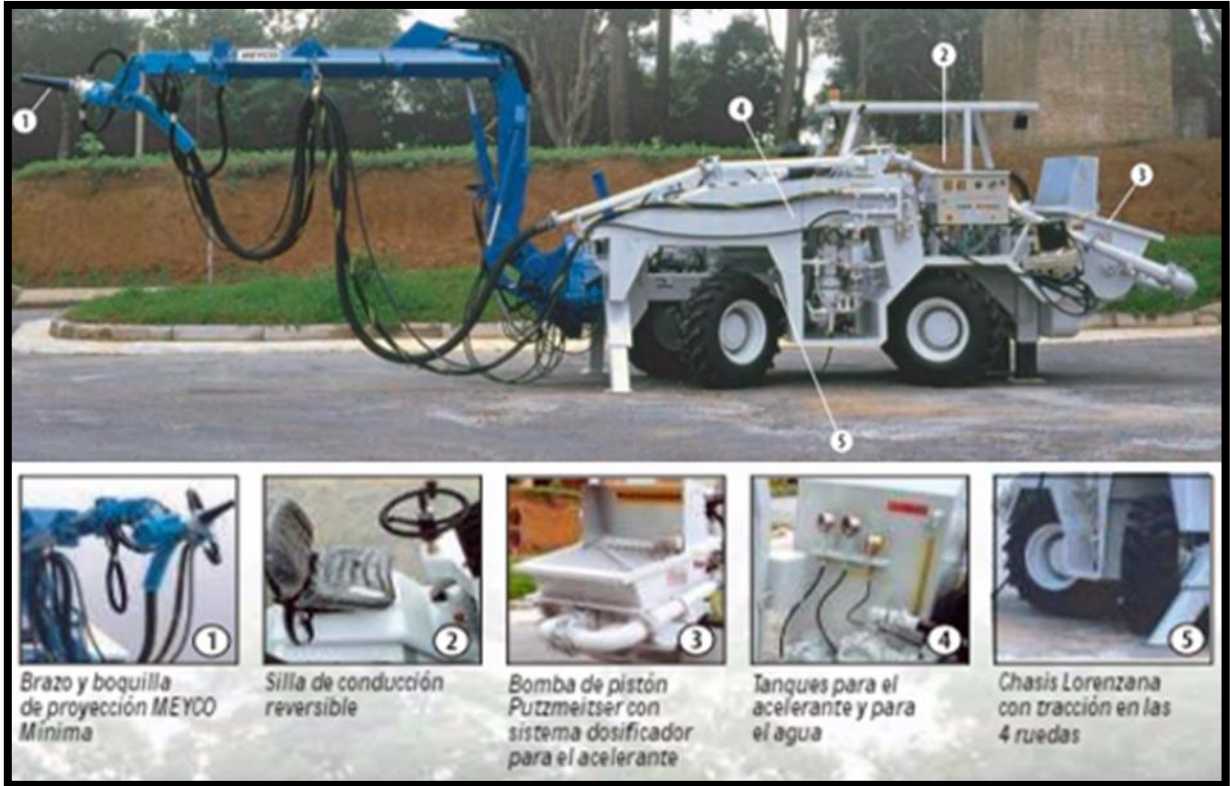
1. Especificación del proyecto
2. Tipo de aplicación
3. La velocidad de colocación del hormigón proyectado
4. Los tiempos disponibles para la proyección del hormigón.
5. Tipo de proceso de hormigón proyectado (húmedo o seco).
6. El acceso al sitio o sitios y el tamaño físico del frente de trabajo para determinar la viabilidad de varias configuraciones de equipos de hormigón proyectado.
7. Disponibilidad y calidad de los materiales de la zona.
8. El sistema de suministro de hormigón, incluyendo distancia de transporte.



**Ilustración 66. Equipo para proyección por vía seca modelo MEYCO Piccola (Fuente: Máquinas y equipos de shotcrete (capítulo 6), ICH).**



**Ilustración 67. Equipo MEYCO Road Runner para proyección por vía húmeda (Fuente: Máquinas y equipos de shotcrete (capítulo 6), ICH).**



**Ilustración 68. Equipo MEYCO Mamba que proyecta shotcrete por vía húmeda (Fuente: Degussa Construction Chemicals).**

## 9.- PROYECTO TÚNEL

A continuación, se llevará a cabo la elaboración de un proyecto de túnelería hipotético para una mina subterránea ubicada en la región de Atacama, provincia de Copiapó, comuna Tierra Amarilla (ilustración 69). Se realizará un diagrama de tronadura basado en el método de Roger Holmberg.



Ilustración 69. Localización del proyecto de tunelería (Fuente: Wikipedia).

### 9.1. Método postulado por Roger Holmberg para el diseño y cálculo de los parámetros de perforación y tronadura para minería subterránea y túnelería.

El uso de taladros de mayores diámetros y mezclas explosivas en cantidades mayores es producto de la necesidad constante de querer construir túneles de grandes dimensiones por lo cual se debe poner énfasis en los cálculos de los diseños de perforación y voladuras.

Con el fin de simplificar los cálculos, Holmberg dividió el frente en 5 secciones diferentes (A, B, C, D, E), cada una de las cuales requiere un cálculo especial; las secciones se observan a continuación:



**Ilustración 70. Partes del túnel y sus secciones establecidas por Roger Holmberg (Fuente: Diseño de voladura subterránea por método de Holmberg , Fernández ,M)**

Dónde:

- A:** sección de corte (cut).
- B:** sección de tajeo (stopping).
- C:** sección de alza (stopping).
- D:** sección de contorno (contour).
- E:** sección de arrastre (lifters).

## 9.2. Cálculo de la Malla

Parámetros	Valores
Ancho del túnel	6 m
Altura de los hastiales	5 m
Altura del arco	0.5
Diámetro de perforación “d <sub>1</sub> ”	0.045 m
Diámetro de maricón “d <sub>2</sub> ”	0.13 m
Ángulos vigía para tiros de contorno “φ”	3°
Desviación angular “α”	0.01 m/m
Error de emboquille “e”	0.02 m
Constante de la roca “c”	0.4
Factor de avance “c”	95 %
N° de Maricones	1
Explosivo	Amongelatina (60%)
Potencia relativa de peso al ANFO	1.64
Diámetro del cartucho	7/8”
Largo del cartucho	8”

### 9.2.1. Diagrama teórico

#### 1. Avance de la labor (H):

$$H = 0.15 + (34.1 * d_2 - 39.4 * d_2^2) [m]$$

Donde:

d<sub>2</sub>: Diámetro del maricón

$$H = 0.15 + (34.1 * 0.13 - 39.4 * 0.13^2)$$

$$H = 3.92 m$$

#### 2. Avance efectivo por perforación (A):

$$A = 0.95 * H [m]$$

$$A = 0.95 * 3.92$$

$$A = 3.72 m$$

#### 3. Taco (T):

$$T = 10 * d_1$$

Donde:

$d_1$ : Diámetro de perforación

$$T = 10 * 0.045$$

$$T = 0.45 \text{ m}$$

#### 4. Error de perforación (F):

$$F = (\alpha * H) + \beta$$

Donde:

$\alpha$ : Error angular (1%)

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$F = (0.01 * 3.92) + 0.02$$

$$F = 0.0592 \text{ m}$$

### 9.2.2 Cálculos para la rainura

#### PRIMER CUADRANTE

##### 1. Burden máximo ( $B_{1m\acute{a}x}$ )

$$B_{1m\acute{a}x} = 1.7 * d_2$$

Donde:

$d_2$  = Diámetro del maricón

$$B_{1m\acute{a}x} = 1.7 * 0.13$$

$$B_{1m\acute{a}x} = 0.221 \text{ m}$$

##### 2. Burden práctico ( $B_{1pract}$ )

$$B_{1pract} = (1.7 * d_2) - [(\alpha * H) + \beta]$$

Donde:

$d_2$ : Diámetro del maricón

$\alpha$ : Error angular (1%)

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$B_{1pract} = (1.7 * 0.13) - [(0.01 * 3.92) + 0.02]$$

$$B_{1pract} = 0.162 \text{ m}$$

### 3. Distancia entre Tiros ( $D_1$ )

$$D_1 = \sqrt{2} * B_{1pract}$$

$$D_1 = \sqrt{2} * 0.162$$

$$D_1 = 0.229 \text{ m}$$

### 4. Concentración de carga ( $C_C$ )

$$C_C = (55 * d_1) * \left(\frac{B_{1max}}{D_2}\right)^{1.5} * \left(B_{1m\acute{a}x} - \frac{D_2}{2}\right) * \left(\frac{c}{0.4}\right) * \left(\frac{1}{S}\right)$$

Donde:

$d_1$ : Diámetro de perforación

$d_2$  : Diámetro de maricón

$c$ : Constante de la Roca

$S$ : Potencia en peso Relativa del Anfo.

$B_{1m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$$C_C = (55 * 0.045) * \left(\frac{0.221}{0.13}\right)^{1.5} * \left(0.221 - \frac{0.13}{2}\right) * \left(\frac{0.4}{0.4}\right) * \left(\frac{1}{1.64}\right)$$

$$C_C = 0.522 \left(\frac{Kgrs}{mts}\right)$$

Como  $D_1 = 0.229 \leq \sqrt{H} = 1.98$  se necesita un nuevo cuadrante.

## SEGUNDO CUADRANTE

### 1. Abertura rectangular ( $V_2$ )

$$V_2 = \sqrt{2} * [B_{1pract} - [(\alpha * H) + \beta]]$$

Donde:

$B_{1pract}$ : Burden practico

$\alpha$ : Error angular (1%)

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$V_2 = \sqrt{2} * [0.162 - [(0.01 * 3.92) + 0.02]]$$

$$V_2 = \mathbf{0.145\ m}$$

### 2. Burden máximo ( $B_{2m\acute{a}x}$ )

$$B_{2m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{V_2 * C_c * S}{d_1 * c}} \right)$$

Donde:

$V_2$ : Abertura rectangular

$C_c$ : Concentración de carga

S: Potencia en peso Relativa del Anfo.

$d_1$ : Diámetro de perforación

c: Constante de la Roca

$$B_{2m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{0.145 * 0.522 * 1.64}{0.045 * 0.4}} \right)$$

$$B_{2m\acute{a}x} = \mathbf{0.231\ m}$$

### 3. Burden práctico ( $B_{2pract}$ )

$$B_{2pract} = B_{2m\acute{a}x} - [(\alpha * H) + \beta]$$

Donde:

$B_{2m\acute{a}x}$ : Burden Máximo

$\alpha$ : Error angular (1%)

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$B_{2pract} = 0.231 - [(0.01 * 3.92) + 0.02]$$

$$B_{2pract} = 0.172 \text{ m}$$

#### 4. Distancia entre tiros ( $D_2$ )

$$D_2 = \sqrt{2} * \left[ B_{2pract} + \left( \frac{D_1}{2} \right) \right]$$

Donde:

$B_{2pract}$ : Burden práctico

$D_1$ : Distancia entre tiros

$$D_2 = \sqrt{2} * \left[ 0.172 + \left( \frac{0.229}{2} \right) \right]$$

$$D_2 = 0.405 \text{ m}$$

Como  $D_2 = 0.405 \leq \sqrt{H} = 1.98$  se necesita un nuevo cuadrante.

### TERCER CUADRANTE

#### 1. Abertura rectangular ( $V_3$ )

$$V_3 = \sqrt{2} * \left[ B_{2pract} + \left( \frac{D_1}{2} \right) - [(\alpha * H) + \beta] \right]$$

Donde:

$B_{2pract}$ : Burden práctico

$D_1$ : Distancia entre tiros

$\alpha$ : Error angular (1%)

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$V_3 = \sqrt{2} * \left[ 0.172 + \left( \frac{0.229}{2} \right) - [(0.01 * 3.92) + 0.02] \right]$$

$$V_3 = 0.322 \text{ m}$$

## 2. Burden máximo ( $B_{3m\acute{a}x}$ )

$$B_{3m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{V_3 * C_c * S}{d_1 * c}} \right)$$

Donde:

$V_3$ : Abertura rectangular

$C_c$ : Concentración de carga

$S$ : Potencia en peso Relativa del Anfo.

$d_1$ : Diámetro de perforación

$c$ : Constante de la Roca

$$B_{3m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{0.322 * 0.522 * 1.64}{0.045 * 0.4}} \right)$$

$$B_{3m\acute{a}x} = 0.344 \text{ m}$$

## 3. Burden práctico ( $B_{3pract}$ )

$$B_{3pract} = B_{3m\acute{a}x} - [(\alpha * H) + \beta]$$

Donde:

$B_{3m\acute{a}x}$ : Burden Máximo

$\alpha$ : Error angular (1%)

$H$ : Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{3pract} = 0.344 - [(0.01 * 3.92) + 0.02]$$

$$B_{3pract} = 0.285 \text{ m}$$

## 4. Distancia entre tiros ( $D_3$ )

$$D_3 = \sqrt{2} * \left[ B_{3pract} + \left( \frac{D_2}{2} \right) \right]$$

Donde:

$B_{3pract}$ : Burden práctico

D<sub>2</sub>: Distancia entre tiros

$$D_3 = \sqrt{2} * \left[ 0.285 + \left( \frac{0.405}{2} \right) \right]$$

$$D_3 = 0.689 \text{ m}$$

Como  $D_3 = 0.689 \leq \sqrt{H} = 1.98$  se necesita un nuevo cuadrante.

### CUARTO CUADRANTE

#### 1. Abertura rectangular (V<sub>4</sub>)

$$V_4 = \sqrt{2} * \left[ B_{3pract} + \left( \frac{D_2}{2} \right) - [(\alpha * H) + \beta] \right]$$

Donde:

B<sub>3pract</sub>: Burden practico

D<sub>2</sub>: Distancia entre tiros

α: Error angular (1%)

β: Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$V_4 = \sqrt{2} * \left[ 0.285 + \left( \frac{0.405}{2} \right) - [(0.01 * 3.92) + 0.02] \right]$$

$$V_4 = 0.606 \text{ m}$$

#### 2. Burden máximo (B<sub>4máx</sub>)

$$B_{4máx} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{V_4 * C_c * S}{d_1 * c}} \right)$$

Donde:

V<sub>4</sub>: Abertura rectangular

C<sub>c</sub>: Concentración de carga

S: Potencia en peso Relativa del Anfo.

d<sub>1</sub>: Diámetro de perforación

c: Constante de la Roca

$$B_{4m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{0.606 * 0.522 * 1.64}{0.045 * 0.4}} \right)$$

$$\mathbf{B_{4m\acute{a}x} = 0.472 m}$$

### 3. Burden pr\acute{a}ctico ( $B_{4pract}$ )

$$B_{4pract} = B_{4m\acute{a}x} - [(\alpha * H) + \beta]$$

Donde:

$B_{4m\acute{a}x}$ : Burden M\acute{a}ximo

$\alpha$ : Error angular (1%)

H: Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{4pract} = 0.472 - [(0.01 * 3.92) + 0.02]$$

$$\mathbf{B_{4pract} = 0.413 m}$$

### 4. Distancia entre tiros ( $D_4$ ):

$$D_4 = \sqrt{2} * \left[ B_{4pract} + \left( \frac{D_3}{2} \right) \right]$$

Donde:

$B_{4pract}$ : Burden pr\acute{a}ctico

$D_3$ : Distancia entre tiros

$$D_4 = \sqrt{2} * \left[ 0.413 + \left( \frac{0.689}{2} \right) \right]$$

$$\mathbf{D_4 = 1.071 m}$$

Como  $D_4 = 1.071 \leq \sqrt{H} = 1.98$  se necesita un nuevo cuadrante.

## QUINTO CUADRANTE

### 1. Abertura rectangular ( $V_5$ )

$$V_5 = \sqrt{2} * \left[ B_{4pract} + \left( \frac{D_3}{2} \right) - [(\alpha * H) + \beta] \right]$$

Donde:

$B_{3pract}$ : Burden practico

$D_2$ : Distancia entre tiros

$\alpha$ : Error angular (1%)

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

H: Profundidad de los Tiros

$$V_4 = \sqrt{2} * \left[ 0.413 + \left( \frac{0.689}{2} \right) - [(0.01 * 3.92) + 0.02] \right]$$

$$V_4 = 0.988 \text{ m}$$

### 2. Burden máximo ( $B_{5max}$ )

$$B_{5m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{V_5 * C_c * S}{d_1 * c}} \right)$$

Donde:

$V_5$ : Abertura rectangular

$C_c$ : Concentración de carga

S: Potencia en peso Relativa del Anfo.

$d_1$ : Diámetro de perforación

c: Constante de la Roca

$$B_{5m\acute{a}x} = (8.8 * 10^{-2}) * \left( \sqrt{\frac{0.988 * 0.522 * 1.64}{0.045 * 0.4}} \right)$$

$$B_{5m\acute{a}x} = 0.603 \text{ m}$$

### 3. Burden práctico ( $B_{5pract}$ )

$$B_{5pract} = B_{5m\acute{a}x} - [(\alpha * H) + \beta]$$

Donde:

$B_{5m\acute{a}x}$ : Burden Máximo

$\alpha$ : Error angular (1%)

H: Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{5pract} = 0.603 - [(0.01 * 3.92) + 0.02]$$

$$\mathbf{B_{5pract} = 0.544 m}$$

### 4. Distancia entre tiros ( $D_5$ )

$$D_5 = \sqrt{2} * \left[ B_{5pract} + \left( \frac{D_4}{2} \right) \right]$$

Donde:

$B_{4pract}$ : Burden práctico

$D_4$ : Distancia entre tiros

$$D_5 = \sqrt{2} * \left[ 0.544 + \left( \frac{1.071}{2} \right) \right]$$

$$\mathbf{D_5 = 1.527 m}$$

La longitud del lado del cuadrante es **1.527 m** que es comparable a la raíz cuadrada del avance (**1.527 ≤ 1.98**), luego no se necesitan más cuadrantes.

### 9.2.3. Cálculo de las zapateras

#### 1. Burden máximo ( $B_{m\acute{a}x}$ )

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{C_c * S}{c * f * \left(\frac{E}{B}\right)}}$$

Donde:

$C_c$ : Factor de carga

S: Potencia en peso Relativa del Anfo

c: Constante de la roca

f: Factor de fijación

E: Espaciamiento

B: Burden

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.4 * 1.45 * 1}}$$

$$B_{m\acute{a}x} = 1.093 \text{ m}$$

Corregimos c en:

$$\text{➤ Si } B_{m\acute{a}x} \geq 1.4 \text{ m } \quad C = c + 0.05$$

$$\text{➤ Si } B_{m\acute{a}x} \leq 1.4 \text{ m } \quad C = c + \frac{0.07}{B}$$

Como  $B_{m\acute{a}x}$  para las zapateras es  $1.093 \leq 1.4$  entonces:

$$C = c + \frac{0.07}{B}$$

$$C = 0.4 + \frac{0.07}{1.093}$$

$$C = 0.464$$

Por lo tanto, con nuestro nuevo C procedemos a realizar el cálculo del Burden máximo.

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{C_c * S}{c * f * \left(\frac{E}{B}\right)}}$$

Donde:

$C_c$ : Factor de carga

$S$ : Potencia en peso Relativa del Anfo

$c$ : Constante de la roca

$f$ : Factor de fijaci3n

$E$ : Espaciamiento

$B$ : Burden

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.464 * 1.45 * 1}}$$

$$B_{m\acute{a}x} = 1.015 \text{ m}$$

## 2. Burden pr\acute{a}ctico ( $B_{pract}$ )

$$B_{practZapateras} = [B_{max} - (H * \sin \varphi)] - [\alpha * H] + \beta$$

Donde:

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden m\acute{a}ximo

$\varphi$  : \u00c1ngulos vig\u00eda para tiros de contorno

$\alpha$ : Error angular (1%)

$H$ : Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{pract} = [1.015 - (3.92 * \sin 3)] - [0.01 * 3.92] + 0.02$$

$$B_{practZapateras} = 0.751 \text{ m}$$

## 3. N\u00b0 de zapateras ( $N^\circ$ )

$$N^\circ(Entero) = \left\lceil \frac{A + (2 * H * \sin \varphi)}{B_{m\acute{a}x}} \right\rceil + 2$$

Donde:

$A$ : Ancho de la secci3n

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden m\acute{a}ximo

$\varphi$  : \u00c1ngulos vig\u00eda para tiros de contorno

H: Profundidad de los tiros

$$N^{\circ}(\text{Entero}) = \left[ \frac{6 + (2 * 3.92 * \sin 3)}{1.015} \right] + 2$$

$$N^{\circ}(\text{Entero}) = 8$$

#### 4. Espaciamiento de las perforaciones centrales sin las laterales ( $E_{cz}$ )

$$E_{cz} = \left[ \frac{A + (2 * H * \sin \varphi)}{(N^{\circ} \text{Entero} - 1)} \right] + 2$$

Donde:

A: Ancho de la sección

$N^{\circ}$  Entero: Número de zapateras

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

H: Profundidad de los tiros

$$E_{cz} = \left[ \frac{6 + (2 * 3.92 * \sin 3)}{(8 - 1)} \right] + 2$$

$$E_{cz} = 0.916 \text{ m}$$

#### 5. Espaciamiento de las perforaciones laterales ( $E_{el}$ )

$$E_{el} = E_{cz} - H * \sin \gamma$$

Donde:

$E_{cz}$ : Espaciamiento de las perforaciones centrales sin las laterales

$\gamma$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

H: Profundidad de los tiros

$$E_{el} = 0.916 - 3.92 * \sin 3$$

$$E_{el} = 0.711$$

## 9.2.4. Cálculo de los tiros de corona

### 1. Espaciamiento (E)

$$E = 15 * d_1$$

Donde:

$d_1$ : Diámetro de perforación

$$E = 15 * 0.045$$

$$E = 0.675 \text{ m}$$

### 2. Burden máximo ( $B_{m\acute{a}x}$ )

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{E}{0.8}$$

Donde:

E: espaciamento

$$B_{m\acute{a}x} = \frac{0.675}{0.8}$$

$$B_{m\acute{a}x} = 0.844 \text{ m}$$

### 3. Burden práctico ( $B_{pract}$ )

$$B_{practCorona} = B_{m\acute{a}x} - (H * \sin \varphi) - 0.05$$

Donde :

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

H: Profundidad de los tiros

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

$$B_{practCorona} = 0.844 - (3.92 * \sin 3) - 0.05$$

$$B_{practCorona} = 0.589 \text{ m}$$

#### 4. Número de tiros ( $N^\circ$ )

$$N^\circ = \left( \frac{\text{Longitud de arco}}{E} \right) + 2$$

Donde:

E: Espaciamiento

$$N^\circ = \left( \frac{6.109}{0.675} \right) + 2$$

$$N^\circ = 11.05 \approx 11$$

#### 9.2.5. Cálculo de los tiros de cajas

##### 1. Espacio libre ( $E_L$ )

$$E_L = h - B_{\text{practZapateras}} - B_{\text{practCoronas}}$$

Donde:

h: Altura de los hastiales

$B_{\text{practZapateras}}$ : Burden práctico de las zapateras

$B_{\text{practCoronas}}$ : Burden práctico de las coronas

$$E_L = 5 - 0.751 - 0.589$$

$$E_L = 3.66 \text{ m}$$

##### 2. Burden máximo ( $B_{\text{máx}}$ )

$$B_{\text{máx}} = 0.9 * \sqrt{\frac{C_c * S}{c * f * \frac{E}{B}}}$$

Donde:

$C_c$ : Concentración de carga

E: Espaciamiento

B: Burden

f: Factor de fijación

S: Potencia en peso Relativa del Anfo.

c: Constante de la Roca

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.40 * 1.2 * 1.25}}$$

$$B_{m\acute{a}x} = 1.075 \text{ m}$$

Corregimos c en:

$$\text{➤ Si } B_{m\acute{a}x} \geq 1.4 \text{ m } \mathbf{C} = \mathbf{c} + \mathbf{0.05}$$

$$\text{➤ Si } B_{m\acute{a}x} \leq 1.4 \text{ m } \mathbf{C} = \mathbf{c} + \frac{\mathbf{0.07}}{\mathbf{B}}$$

Como  $B_{m\acute{a}x}$  para las zapateras es  $1.093 \leq 1.4$  entonces:

$$C = c + \frac{0.07}{B}$$

$$C = 0.4 + \frac{0.07}{1.075}$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{0.465}$$

Por lo tanto, con nuestro nuevo C procedemos a realizar el cálculo del Burden máximo.

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.465 * 1.2 * 1.25}}$$

$$\mathbf{B}_{m\acute{a}x} = \mathbf{0.997 \text{ m}}$$

### 3. Burden práctico ( $B_{practCajas}$ )

$$B_{practCajas} = [B_{max} - (H * \sin \varphi)] - [\alpha * H] + \beta]$$

Donde:

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

$\alpha$ : Error angular (1%)

H: Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{pract} = [0.997 - (3.92 * \sin 3)] - [0.01 * 3.92] + 0.02]$$

$$B_{practZapateras} = 0.733 \text{ m}$$

#### 4. Número de tiros ( $N^\circ$ )

$$N^\circ(Entero) = \left[ \frac{E_L}{B_{m\acute{a}x} * \left(\frac{E}{V}\right)} \right] + 2$$

Donde:

$E_L$ : Espacio libre

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$E$ : Espaciamiento

$$N^\circ(Entero) = \left[ \frac{3.66}{0.997 * 1.25} \right] + 2$$

$$N^\circ(Entero) = 5$$

#### 5. Espaciamiento ( $E$ )

$$E = \frac{E_L}{N^\circ - 1}$$

Donde:

$E_L$ : Espacio libre

$N^\circ$ : Número de tiros

$$E = \frac{3.66}{5 - 1}$$

$$E = 0.915$$

### 9.2.6. Cálculo de tiros auxiliares

#### 1. Distancia disponible ( $D_D$ ), para los tiros que quiebran horizontalmente

$$D_D = A - D_5 - (2 * B_{practCajas})$$

Donde:

A: Ancho del túnel

$D_5$ : Distancia entre tiros del quinto cuadrante

$B_{practCajas}$ : Burden práctico de los tiros de caja

$$D_D = 6 - 1.527 - (2 * 0.733)$$

$$D_D = 3.007 \text{ m}$$

#### 2. Burden máximo ( $B_{m\acute{a}x}$ )

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{C_c * S}{c * f * \frac{E}{B}}}$$

Donde:

$C_c$ : Concentración de carga

E: Espaciamiento

B: Burden

f: Factor de fijación

S: Potencia en peso Relativa del Anfo.

c: Constante de la Roca

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.40 * 1.45 * 1.25}}$$

$$B_{m\acute{a}x} = 0.978 \text{ m}$$

Corregimos c en:

$$\text{➤ Si } B_{m\acute{a}x} \geq 1.4 \text{ m } \quad C = c + 0.05$$

$$\text{➤ Si } B_{m\acute{a}x} \leq 1.4 \text{ m } \quad C = c + \frac{0.07}{B}$$

Como  $B_{m\acute{a}x}$  para las zapateras es  $0.978 \leq 1.4$  entonces:

$$C = c + \frac{0.07}{B}$$

$$C = 0.4 + \frac{0.07}{0.978}$$

$$C = 0.472$$

Por lo tanto, con nuestro nuevo C procedemos a realizar el cálculo del Burden máximo.

$$B_{m\acute{a}x} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.472 * 1.45 * 1.25}}$$

$$B_{m\acute{a}x} = 0.900 \text{ m}$$

### 3. Burden práctico ( $B_{pract}$ )

$$B_{practAuxiliares} = [B_{max} - (H * \sin \varphi)] - [\alpha * H] + \beta$$

Donde:

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

$\alpha$ : Error angular (1%)

H: Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{practAuxiliares} = [0.900 - (3.92 * \sin 3)] - [0.01 * 3.92] + 0.02$$

$$B_{practAuxiliares} = 0.636 \text{ m}$$

### 4. Número de auxiliares ( $N^\circ$ )

$$N^\circ(Entero) = \left[ \frac{A + (2 * H * \sin \varphi)}{B_{max}} \right] + 2$$

Donde:

A: Ancho de la sección

H: Profundidad de los tiros

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

$$N^{\circ}(\text{Entero}) = \left[ \frac{6 + (2 * 3.92 * \sin 3)}{0.900} \right] + 2$$

$$N^{\circ}(\text{Entero}) = 9$$

### 5. Espaciamiento entre auxiliares (E)

$$E = \left[ \frac{A + (2 * H * \sin \varphi)}{(N^{\circ} \text{Entero} - 1)} \right] + 2$$

Donde:

A: Ancho de la sección

N° Entero: Número de zapateras

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

H: Profundidad de los tiros

$$E = \left[ \frac{6 + (2 * 3.92 * \sin 3)}{(9 - 1)} \right] + 2$$

$$E = 0.801 \text{ m}$$

### 6. Distancia disponible ( $D_D$ ), para los tiros que quiebran hacia abajo

$$D_D = A_{\text{maxTúnel}} - D_5 - B_{\text{practZapateras}} - B_{\text{practCorona}}$$

Donde:

$A_{\text{maxTúnel}}$ : Altura máxima del túnel

$D_5$ : Distancia entre tiros del quinto cuadrante

$B_{\text{practZapatera}}$ : Burden práctico de las zapateras

$B_{\text{practCorona}}$ : Burden práctico de los tiros de corona

$$D_D = 5.5 - 1.527 - 0.751 - 0.589$$

$$D_D = 2.633 \text{ m}$$

## 7. Burden máximo ( $B_{\text{máx}}$ )

$$B_{\text{máxAuxiliares}} = 0.9 * \sqrt{\frac{C_c * S}{c * f * \frac{E}{B}}}$$

Donde:

$C_c$ : Concentración de carga

E: Espaciamiento

B: Burden

f: Factor de fijación

S: Potencia en peso Relativa del Anfo.

c: Constante de la Roca

$$B_{\text{máxAuxiliares}} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.40 * 1.2 * 1.25}}$$

$$B_{\text{máxAuxiliares}} = 1.075 \text{ m}$$

Corregimos c en:

$$\triangleright \text{ Si } B_{\text{máx}} \geq 1.4 \text{ m } \quad C = c + 0.05$$

$$\triangleright \text{ Si } B_{\text{máx}} \leq 1.4 \text{ m } \quad C = c + \frac{0.07}{B}$$

Como  $B_{\text{máx}}$  para las zapateras es  $1.075 \leq 1.4$  entonces:

$$C = c + \frac{0.07}{B}$$

$$C = 0.4 + \frac{0.07}{1.075}$$

$$C = 0.465$$

Por lo tanto, con nuestro nuevo C procedemos a realizar el cálculo del Burden máximo.

$$B_{\text{máxAuxiliares}} = 0.9 * \sqrt{\frac{0.522 * 1.64}{0.465 * 1.2 * 1.25}}$$

$$B_{\text{máxAuxiliares}} = 0.997 \text{ m}$$

## 8. Burden práctico ( $B_{pract}$ )

$$B_{practAuxiliares} = [B_{max} - (H * \sin \varphi)] - [\alpha * H) + \beta]$$

Donde:

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

$\alpha$ : Error angular (1%)

H: Profundidad de los tiros

$\beta$ : Error de emboquille (2%)

$$B_{practAuxiliares} = [0.997 - (3.92 * \sin 3)] - [0.01 * 3.92) + 0.02]$$

$$B_{practAuxiliares} = 0.733 \text{ m}$$

## 9. Número de auxiliares ( $N^\circ$ )

$$N^\circ(Entero) = \left[ \frac{A + (2 * H * \sin \varphi)}{B_{max}} \right] + 2$$

Donde:

A: Ancho de la sección

H: Profundidad de los tiros

$B_{m\acute{a}x}$ : Burden máximo

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

$$N^\circ(Entero) = \left[ \frac{5.5 + (2 * 3.92 * \sin 3)}{0.997} \right] + 2$$

$$N^\circ(Entero) = 8$$

## 10. Espaciamiento entre auxiliares (E)

$$E = \left[ \frac{A + (2 * H * \sin \varphi)}{(N^\circ Entero - 1)} \right]$$

Donde:

A: Alto de la sección

N° Entero: Número de zapateras

$\varphi$  : Ángulos vigía para tiros de contorno

H: Profundidad de los tiros

$$E = \left[ \frac{5.5 + (2 * 3.92 * \sin 3)}{(8 - 1)} \right]$$

$$E = 0.844 \text{ m}$$

### 9.3- Resultados finales

Tabla 22. Resultados del diagrama teórico.

<b>DIAGRAMA TEÓRICO</b>	
<b>Avance de la labor</b>	3.92 m
<b>Avance efectivo por perforación</b>	3.72 m
<b>Taco</b>	0.45 m
<b>Error de perforación</b>	0.0592 m

Tabla 23. Resultados de los cálculos para la rainura.

<b>CÁLCULOS PARA LA RAINURA</b>	
<b>Primer cuadrante</b>	
<b>Burden máximo</b>	0.221 m
<b>Burden práctico</b>	0.162 m
<b>Distancia entre tiros</b>	0.229 m
<b>Concentración de carga</b>	0.522 kgrs/mts
<b>Segundo cuadrante</b>	
<b>Abertura rectangular</b>	0.145 m
<b>Burden máximo</b>	0.231 m
<b>Burden práctico</b>	0.172 m
<b>Distancia entre tiros</b>	0.405 m
<b>Tercer cuadrante</b>	
<b>Abertura rectangular</b>	0.322 m
<b>Burden máximo</b>	0.344 m
<b>Burden práctico</b>	0.285 m
<b>Distancia entre tiros</b>	0.689 m

<b>Cuarto cuadrante</b>	
<b>Abertura rectangular</b>	0.606 m
<b>Burden máximo</b>	0.472 m
<b>Burden práctico</b>	0.43 m
<b>Distancia entre tiros</b>	1.071 m
<b>Quinto cuadrante</b>	
<b>Abertura rectangular</b>	0.988 m
<b>Burden máximo</b>	0.603 m
<b>Burden práctico</b>	0.544 m
<b>Distancia entre tiros</b>	1.527 m

**Tabla 24. Resultados del cálculo de las zapateras.**

<b>CÁLCULO DE LAS ZAPATERAS</b>	
<b>Burden máximo</b>	1.015 m
<b>Burden práctico</b>	0.751 m
<b>N° de zapateras (N°)</b>	8
<b>Espaciamiento de las perforaciones centrales sin las laterales (E<sub>cz</sub>)</b>	0.916 m
<b>Espaciamiento de las perforaciones laterales (E<sub>el</sub>)</b>	0.711 m

**Tabla 25. Resultados del cálculo de los tiros de corona.**

<b>CÁLCULO DE LOS TIROS DE CORONA</b>	
<b>Espaciamiento</b>	0.675 m
<b>Burden máximo</b>	0.844 m
<b>Burden práctico</b>	0.589 m
<b>N° de tiros (N°)</b>	11

**Tabla 26. Resultados del cálculo de los tiros de caja.**

<b>CÁLCULO DE LOS TIROS DE CAJA</b>	
<b>Espacio libre</b>	3.66 m
<b>Burden máximo</b>	0.997 m
<b>Burden práctico</b>	0.733 m
<b>N° de tiros (N°)</b>	5
<b>Espaciamiento</b>	0.915 m

**Tabla 27. Resultados de los cálculos de los tiros auxiliares.**

<b>CÁLCULO DE LOS TIROS AUXILIARES</b>	
<b>Tiros que quiebran horizontalmente</b>	
<b>Distancia disponible (D<sub>D</sub>)</b>	3.007 m
<b>Burden máximo</b>	0.900 m
<b>Burden práctico</b>	0.636 m
<b>N° de auxiliares</b>	9
<b>Espaciamiento entre auxiliares</b>	0.801 m
<b>Tiros que quiebran hacia Abajo</b>	
<b>Distancia disponible (D<sub>D</sub>)</b>	2.633 m
<b>Burden máximo</b>	0.997 m
<b>Burden práctico</b>	0.733 m
<b>N° de auxiliares</b>	8
<b>Espaciamiento entre auxiliares</b>	0.844 m

## CONCLUSIÓN

La construcción de túneles depende fundamentalmente de dos aspectos principales: los estudios preliminares que se realizan al terreno en estudio los cuales abarcan una serie de estudios geológicos y geotécnicos del terreno, sondeos y galerías de reconocimiento; y el otro aspecto principal es el método de excavación que se empleará, el cual dependerá en un gran porcentaje de la geología del terreno.

En relación con la geología, es el punto más importante a considerar, ya que las decisiones posteriores en las siguientes etapas posteriores en la construcción de túneles dependerán tanto de la naturaleza del terreno, la resistencia que presente y de la presencia de agua que pueda existir.

Con respecto a los métodos de excavación se clasifican en dos: perforación y tronadura, las TBM. Si bien el método de perforación y tronadura es un método ampliamente utilizado en minería producto de su versatilidad con respecto a la calidad del macizo rocoso presenta algunas desventajas como es la irregularidad que puede generar en la forma inicial del túnel y además está sujeta a una buena elección de explosivo. Por otro lado, las TBM comenzaron sus inicios en proyectos de ingeniería civil pero hoy en día han adquirido más fuerza en los proyectos mineros producto de los grandes beneficios que presenta como sus altas tasa de avance en la excavación de túneles mineros, especialmente para los proyectos que se deben realizar en un menor tiempo para poder asegurar la puesta de la operación , pero es muy importante considerar en este método las condiciones geológicas del terreno a perforar, ya que en macizos rocosos con alta alteración pueden generar importantes desafíos para las TBM.

Finalmente , se elaboró un diagrama de tronadura basado en el método Roger Holmberg el cual es ampliamente utilizado en la minería subterránea producto de su facilidad y tiempo menor de implementación , es importante señalar que los cálculos realizados son en base a datos hipotéticos además este diseño no fue implementado en la construcción de un túnel por lo cual no se conocen los resultados finales que pueda presentar , ya que dependiendo la fragmentación requerida el diseño de malla puede sufrir cambios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Studylib. (2018). Historia de los túneles y su evolución histórica. Studylib. Recuperado de <http://studylib.es/doc/5416166/1.-historia-de-los-t%C3%BAneles-y-su-evoluci%C3%B3n-hist%C3%B3rica>

Pávez, A. (2015). Construcción de túneles mineros. Construcción minera, (10), pp 06-13

Seguridad Minera. (2014). Excavabilidad en túneles y minería subterránea. Revista de seguridad minera Recuperado de <http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/excavabilidad-en-tuneles-y-mineria-subterranea/>

Soto,P.(2004). Construcción de túneles mineros. Tesis de pregrado. Universidad Austral de Chile. Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2004/bmfci5718c/doc/bmfci5718c.pdf>

Casarez ,M. (2013). Construcción Subterránea. Construcción Minera, (3), pp. 8-18

Ho,C., & Navarro,A. (2017). Ingeniería de túneles. Monografías Recuperado de <https://www.monografias.com/docs113/ingenieria-tuneles/ingenieria-tuneles.shtml>

Prezi. (2017). Uso e importancia de los túneles. Prezi Recuperado de <https://prezi.com/pavsvcesplh9/uso-e-importancia-de-los-tuneles/?webgl=0>

Avaria,P. (2018). Fortificación subterránea: Firmeza y seguridad. Construcción Minera Recuperado de <http://www.construccionminera.cl/fortificacion-subterranea-firmeza-y-seguridad/#.W3w3sChKjIU>

Rosso, D. (2016). Apuntes curso de fortificación de minas. Slideshare Recuperado de <https://www.slideshare.net/JorgeMartinez412/apuntes-curso-fortificacion-de-minas>

Mejia,J. (2013). Diseño de túneles. Slideshare Recuperado de <https://www.slideshare.net/jhonymejialopez/diseo-de-tuneles>

Saavedra, A. (2018). Etapas del proceso: Construcción de túneles mineros. Construcción Minera Recuperado de <http://www.construccionminera.cl/etapas-del-proceso-construccion-de-tuneles-mineros/#.XEZFxFxKjIV>

Yepes, V. (2013). Método belga de construcción de túneles. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/12/21/metodo-belga-de-construccion-de-tuneles/>

Canto,N.(2017). Método Belga. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/document/361637811/metodo-belga>

Yepes,V.(2016). Método alemán de construcción de túneles. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/11/21/metodo-aleman-de-construccion-de-tuneles/>

Yepes,V.(2016). El método inglés de excavación de túneles. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2016/11/17/el-metodo-ingles-de-excavacion-de-tuneles/>

Yepes,V.(2016). Nuevo método austriaco. Recuperado de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2014/09/24/nuevo-metodo-austriaco/>

Montalar, E. (2010). El Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles o NATM (1948-1964). Recuperado de <http://enriquemontalar.com/el-nuevo-metodo-austriaco-de/>

Sánchez, L. (2011). Métodos de perforación de túneles. Civilgeeks Recuperado de <https://civilgeeks.com/2011/09/22/metodos-de-perforacion-de-tuneles/>

Construpedia. (2017). Estudios Previos para la Realización de Obras Subterráneas. Construmatica Recuperado de [https://www.construmatica.com/construpedia/Estudios\\_Previos\\_para\\_la\\_Realizaci%C3%B3n\\_de\\_Obras\\_Subterr%C3%A1neas](https://www.construmatica.com/construpedia/Estudios_Previos_para_la_Realizaci%C3%B3n_de_Obras_Subterr%C3%A1neas)

Alvaro, M. (2015). Master en túneles y obras subterráneas: Sondeos. Slideshare Recuperado de <https://www.slideshare.net/MabelBravo1/sondeos-en-tneles-pres>

IGME. (2010). Perforación de sondeos de investigación. Instituto Geológico y Minero de España Recuperado de [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro51\\_54/pdf/lib51/in\\_02.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro51_54/pdf/lib51/in_02.pdf)

Polo, M. (2015). Tecnología básica del concreto proyectado. Seguridad Minera, (125), pp. 28-30

López,L. (2012). Shotcrete: ¿método por vía seca o vía húmeda? Revista Seguridad Minera Recuperado de <http://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/metodo-por-via-seca-o-via-humeda/>

Cavillo,L& Diez del Sel,E. (2015). Soluciones técnicas para reparaciones urgentes en zonas de alta responsabilidad. Congreso técnico Recuperado de [http://congresotecnico2015.ficem.org/minisite/presentaciones/dia\\_3/1.pdf](http://congresotecnico2015.ficem.org/minisite/presentaciones/dia_3/1.pdf)

Vega, C & Abril,E. (2010). Concreto lanzado. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/33679933/SHOTCRETE>

Yepes, V. (2014). Construcción de túneles por el método alemán. Recuperado de <http://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2014/10/27/construccion-de-tuneles-por-el-metodo-aleman/>

Hernández,I. (2014). Proceso constructivo de sistemas de drenaje mediante el proceso de tunelaje en zonas urbanas. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Autónoma de México Recuperado de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/3181/1/TESIS.pdf>

López,M. (2015). Manual excava túneles. Slideshare Recuperado de [https://www.slideshare.net/elpumarebel/manual-excava-tuneles?qid=2a55b231-f676-4711-b727-aeb0bc20bf2c&v=&b=&from\\_search=1](https://www.slideshare.net/elpumarebel/manual-excava-tuneles?qid=2a55b231-f676-4711-b727-aeb0bc20bf2c&v=&b=&from_search=1)

Bernaola, J., Castilla,J & Herrera,J, J. (2013). Perforación y voladura de rocas en minería. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid

Estruch, M & Tapia,A. (2003). Topografía subterránea para minería y obras. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Gavilans,H&Andrade,B. (2004). Introducción a la Ingeniería de Túneles. Ecuador: Asociación de Ingenieros de Minas del Ecuador (AIME)

Minería Chilena. (2013). Túneles y minería: Hacia una fórmula ideal. Minería Chilena Recuperado de <http://www.mch.cl/2013/07/22/tuneles-y-mineria-hacia-una-formula-ideal/>

Wikipedia. (2017). Tierra Amarilla, Chile. Wikipedia Recuperado de [https://en.wikipedia.org/wiki/Tierra\\_Amarilla,\\_Chile](https://en.wikipedia.org/wiki/Tierra_Amarilla,_Chile)

Sanchez,J. (2017). Método de Roger Holmberg. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/document/359784380/Metodo-de-Roger-Holmberg>

Muñoz,J.(2012). Perforación y Voladura. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/87708733/Clase-2-Perforacion-Tunel>

Orellana,J. (2015). Fortificación con marcos, pernos y mallas. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/283224311/Fortificacion-Con-Marcos-Pernos-y-Mallas>

Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía. (2005). Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea. Perú

Brox, D & Piaggio, G. (2013). Consideraciones técnicas para máquinas TBM en proyectos mineros. Construcción Minera, (3), pp. 30-33

Quo. (2015). Breve historia del túnel. Quo Recuperado de <https://www.quo.es/tecnologia/a44867/breve-historia-del-tunel/>

Abad,A& Huisa,F.Procedimientos de excavación y sostenimiento de túneles proyecto derivación Huascacocha –Rimac. Tesis de pregrado. Universidad Ricardo Palma. Recuperado de <https://docplayer.es/77949435-Procedimientos-de-excavacion-y-sostenimiento-de-tuneles-proyecto-derivacion-huascacocha-rimac.html>

Gomes,A. (2013). Túneles y espacios subterráneos: Una industria que experimenta un gran desarrollo. EMB. Recuperado de <http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=2725&edi=133&xit=tuneles-y-espacios-subterraneos-una-industria-que-experimenta-un-gran-desarrollo>

Ctes Chile. (2016). Chile es pionero en excavación subterránea. Comité de túneles y espacios subterráneos de Chile Recuperado de <http://www.ctes.cl/chile-es-pionero-en-excavacion-subterranea/>

Inacap. (2011). Tipos de explosivos. Recuperado de <https://apmine.files.wordpress.com/2011/04/parte-45-130.pdf>

Saldaña,E. (2018). Anfos Pesados. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/document/381964504/ANFOS-PESADOS>

Watanabe,J. (2014). Explosivos: Tipos y propiedades. Monografías Recuperado de <https://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades.shtml#anfopesada>

Muñoz, J. (2017). Métodos por vía seca o vía húmeda. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/document/337247753/Metodos-Por-via-Seca-o-via-Humeda>

Berger , E (2016). Tecnologías de excavación de rocas. Módulo 3 (Explosivos, accesorios, instalaciones y equipos para voladura de rocas en minería u obras civiles superficiales y subterráneas)

Ceres. (2010). Túneles. Ceres Recuperado de [ftp://ceres.udc.es/IT\\_Obras\\_Publicas/Troncales/Procedimientos\\_Construccion\\_Maquinaria/tema\\_14\\_10\\_11.pdf](ftp://ceres.udc.es/IT_Obras_Publicas/Troncales/Procedimientos_Construccion_Maquinaria/tema_14_10_11.pdf)

Perez, I. , Pinto,G., Quintanilla,J &Araya,C. (2015). Explosivos en método a cielo abierto. Academia. Recuperado de [https://www.academia.edu/9062084/EXPLOSIVOS\\_EN\\_M%C3%89TODO\\_CIELO\\_ABIERTO?auto=download](https://www.academia.edu/9062084/EXPLOSIVOS_EN_M%C3%89TODO_CIELO_ABIERTO?auto=download)

Salazar,K. (2017). Agentes de voladura sensible al fulminante N°8. Scribd Recuperado de <https://es.scribd.com/presentation/364731635/Agentes-de-Voladura-Sensibles-y-No-Sensibles-Al-Fulminante-n>

Guzmán,R. (2012). Perforación y tronadura subterránea. Slideshare Recuperado de [https://www.slideshare.net/FranciscoArayaEspinosa/perforacin-y-tronadura-subternea-2009-v1?qid=a7be6f6e-a148-41a5-8581-6180daeedbf&v=&b=&from\\_search=1](https://www.slideshare.net/FranciscoArayaEspinosa/perforacin-y-tronadura-subternea-2009-v1?qid=a7be6f6e-a148-41a5-8581-6180daeedbf&v=&b=&from_search=1)

Gandaur,G. (2014). Métodos de perforación. Slideshare Recuperado de <https://www.slideshare.net/gandaur/mtodos-de-perforacin>

López, C. (2004). Manual de perforación y voladura de rocas. Madrid: Instituto tecnológico geominero de España