



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL – CONSTRUCCIÓN

EQUIPOS DE EXCAVACIÓN MECANIZADA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

TESIS, QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
HÉCTOR ULISES MUÑOZ LÓPEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. ANDRÉS ANTONIO MORENO Y FERNÁNDEZ
Facultad de Ingeniería

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. MAYO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en I. López Molina Jorge A.

Secretario: Ing. Sáenz Fucugauchi Carlos René

1^{er}. Vocal: M. en I. Moreno y Fernández Andrés A.

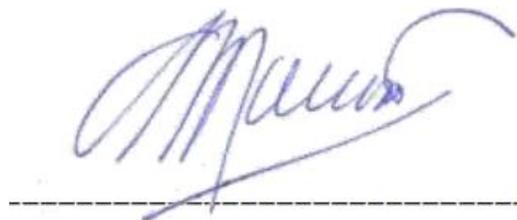
2^{do}. Vocal: M. en I. Suárez Fino José Francisco

3^{er}. Vocal: Dr. Pérez Reyes José Anselmo

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México

TUTOR DE TESIS:

M. en I. Moreno y Fernández Andrés A.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Moreno', is written above a horizontal dashed line.

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la oportunidad de continuar preparándome, académica y profesionalmente.

A mis profesores, por bríndame su apoyo y conocimientos a lo largo de mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por apoyarme y darme la oportunidad de concluir mis estudios.

A mis seres queridos, por siempre estar a mi lado e impulsarme para realizar y terminar esta maestría.

INDICE

INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	8
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. GENERALIDADES.....	12
Minería.....	12
2. EQUIPOS DE EXCAVACIÓN MECANIZADA.....	20
Rozadoras	21
Herramientas de corte rozadoras.....	23
Criterios para la selección de una máquina rozadora	24
Características específicas del equipo.....	26
TBM (tunnel boring machine).....	27
Herramientas de corte TBM	28
TBM de viga principal	29
TBM escudo sencillo.....	30
TBM escudo doble.....	31
Equipos de excavación mecanizada para obras verticales y semivirtuales.....	33
EQUIPOS DE EXCAVACIÓN RAISE BORING	34
Pilot Drilling	37
Raise boring	38
Boxhole	40
Shaft boring.....	42
Blind boring	42
SHAFT BORING ROADHEADER (SBR)	42
Shaft boring machine (SBM)	43
Shaft boring cutterhead (SBC)	45
V-mole shaft boring	46
Shaft boring extensión machine (SBE)	47
Horizontal boring	47
3. TBM'S EN MINERÍA SUBTERRÁNEA – ANTECEDENTES HISTÓRICOS...	48
Métodos de acceso.....	50

Comparación de métodos mineros para acceder a un cuerpo mineral profundo	52
Acceso con perforación y voladura (P&V).....	52
Uso historico de las TBM en minería	54
Mina San Manuel	55
StillWater Mining Company (SMC).....	56
The Blitz Project	58
Túnel inclinado (Decline Tunnel). Grosvenor, Australia.	62
Túneles en Sudamérica	64
Ventajas y desventajas de uso de TBM en proyectos mineros.....	65
4. MINERÍA DEL CARBÓN, INTRODUCCIÓN AL MINADO MECANIZADO	66
Producción Y Consumo En México.	69
Región Carbonífera de Coahuila.....	70
Estadísticas del carbón en México.....	70
Importación, Exportación y balanza comercial.	71
Extracción del carbón	74
Frentes en avance	78
Frente en retirada.....	79
Componentes de la frente larga, equipos mecanizados	79
Ventilación.....	84
MINADOS DE CUARTOS Y PILARES MECANIZADO EN ROCAS.....	87
5. CASO PRÁCTICO, ANÁLISIS DE UN CONTRAPOZO RANURA	88
Caso convencional (perforación y voladura).....	89
Voladura 1 evento	92
Voladura en 2 o más eventos.....	94
Costos y rendimientos método convencional	98
Medio de excavación mecanizada (easer).....	102
Medio de excavación mecanizada (raise boring machine)	104
Proyecciones a diferentes años (1-10 años).....	106
COSTOS A 1 AÑO	106
Costos 5 años	108
Costos 10 años	109
Calculos equipos tipo raise boring	113

6. NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA MINERÍA	119
Equipos con telemetría, a batería, teleoperados y autónomos.....	119
Técnicas para obtener piso plano utilizando TBM en minería	121
Relleno como piso.....	122
Uso de elemento prefabricado para tener piso	123
Rimado de la obra.....	124
Uso de explosivos	124
Excavación mecanizada con sección rectangular	125
Equipo de excavación mobile miner.....	125
Excavación mecanizada con TBM viga principal forma ovalada.....	129
Excavación mecanizada con sección rectangular completa	129
Measurement while drilling (MWD)	132
Parámetros de perforación y fuerza de perforación	133
Costos mwd	137
Robots en minería	137
Mapeo con drones	137
Robots sobre neumáticos y orugas.....	138
Robots acuáticos.....	138
Softwares de integración	139
CONCLUSIONES.....	141
REFERENCIAS.....	144

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Clasificación de la minería	12
Figura 1.2 Clasificación de la minería subterránea	12
Figura 1.3 Tipos de obras en la minería subterránea.....	13
Figura 1.4 Estructura típica de una mina subterránea (Atlas Copco, 1997)	14
Figura 1.5 "Eiserner Bergmann" 1916/17 (Schmidt, Kranz et al.) (Maidl, 2008)	15
Figura 1.6 Máquina para carbón, 3m de diámetro, de Schmidt, Kranz, 1931 (Ibid.)	15
Figura 1.7 Primer TBM moderna, von J.S. Robbins, model 131-106 (Ibid.)	16
Figura 1.8 Máquina SVM 1961 4.0m diámetro (Ibid.).....	16
Figura 1.9 Arriba Midi, Abajo Mini, desarrolladas por Atlas Copco (Christopher Delabbio, 2010.).....	17
Figura 1.10 Izq. MM120, Centro MM130, Der. MM130R. (Ibid.).....	17
Figura 1.11 Robbins 41R (Wadell 1971)	18
Figura 1.12 Shaft boring machine, barreno piloto. (Op. Cit.)	18
Figura 1.13 Blind Shaft Boring Machine, izq. Funcionamiento (Maidl, 2008), der., foto (Lok Home, 2021).....	19
Figura 2.1 Clasificación de las excavaciones.....	20
Figura 2.2 Partes de una rozadora (Pérez Álvarez, Diseño y ejecución de obras subterráneas)	21
Figura 2.3 Clasificación de las rozadoras, (Tamrock, López Jimeno, 1998)	22
Figura 2.4 Sistemas de corte de rozadoras (Cornejo, 1984).....	22
Figura 2.5 Procedimiento de excavación en el frente según el tipo de cabeza de corte (Ibid.)	23
Figura 2.6 ángulos a) ataque, b) oblicuidad c) basculamiento(Ibid.)	24
Figura 2.7 Clasificación TBM para roca	27
Figura 2.8 Disco de corte (Bartz.es/Cutters)	28
Figura 2.9 Cabeza de corte para roca, (Robbins.com).....	28
Figura 2.10 Partes de una TBM de viga principal, (Robbins)	29
Figura 2.11 Ciclo de excavación TBM viga principal	29
Figura 2.12 TBM escudo sencillo (Ibid.)	30
Figura 2.13 Escudo doble, (tunnelpro.it/es/double-shield-tbm)	31
Figura 2.14 Máquina trepadora "ALIMAK" (Universidad nacional Daniel Alcides Carrión, Facultad de ingeniería 2009)	33
Figura 2.15 Clasificación de los equipos de excavación mecanizada en obras verticales	34
Figura 2.16 Métodos de rimado, (SME Handbook, 1992)	34
Figura 2.17 Mecanismos de falla en un contrapozo, (Underground Mining Technology 2017 – M Hudyma & Y Potvin).....	36
Figura 2.18 Funcionamiento máquina Raise Boring (Revista, Mining &Construction, Epiroc, pág. 23, 2020.)	36
Figura 2.19 Escariador de piloto (EPIROC)	37
Figura 2.20 Brocas tricónica, (well engineers notebook, 2nd Edition, (2001). Shell international exploration and production B.V. EP Learning and Development)	38

Figura 2.21 Método convencional, down reaming, boxhole, fuente (Mechanical excavation in mining and civil industries, Nuh Bilgin, et. al. 2014).....	39
Figura 2.22 Equipo Easer L, desarrollado por EPIROC (Fuente: https://www.epiroc.com/es-mx/products/raiseboring)	39
Figura 2.23 Equipo BBM (Boxhole boring machine) (Fuente: https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/boxhole-boring-machine-bbm/)	40
Figura 2.24 Shaft boring Roadheader (SBR) fuente(https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/shaft-boring-roadheader-sbr/).....	42
Figura 2.25 Ciclo de excavación SBR fuente (WEBINAR ITA, Herrenknecht Mining, Pioneering Underground Technologies Mechanied Shaft & Raise Excavation, Patrick Rennkamp, 2020)	43
Figura 2.26 Giros de la cabeza de corte SBM (Op. Cit.)	44
Figura 2.27 Shaft boring machine Ibid.....	44
Figura 2.28 Sistema de bombeo SBC (Op. Cit.).....	45
Figura 2.29 Shaft boring Cutterhead (SBC) Op. Cit.	46
Figura 2.30 Shaft Boring Extension Machine (SBE) op. cit.	47
Figura 2.31 Horizontal boring. (Raise boring equipment, brouche, Sandvik)	47
Figura 3.1 Arreglo para lanzamiento TBM pendiente negativa. (SME)	49
Figura 3.2 Cámara de montaje Minas los Bronces, Chile.	50
Figura 3.3 Acceso al yacimiento profundo (OZ Minerals, 2013).....	52
Figura 3.4 Comparación de métodos TBM. P&V. Ibid.....	53
Figura 3.5 Desarrollo de la mina San Manuel (Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development, M. Cigla,).....	55
Figura 3.6 Proyecto bloque Este, Mina Stillwater. (Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine)	56
Figura 3.7 Trazo Blitz Túnel (Ibid)	59
Figura 3.8 Robbins MB244-313-2 Blitz túnel (Ibid.).....	59
Figura 3.9 Convergencia en el Túnel provocada por el dique. Agosto 2014 (Johnson Josh et. al. 2016).....	60
Figura 3.10 Condición del cielo, septiembre 2014, (Ibid.)	60
Figura 3.11 Caídos de roca y cemento, producto de las vibraciones	61
Figura 3.12 Sistemas de soporte y sostenimiento, zonas de falla (dique) Ibid.....	61
Figura 3.13 TBM a prueba de explosiones The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining (Robbins Co.).....	62
Figura 3.14 Túnel 1,100m, -16.5% Mina Grosvesor (https://www.therobbinscompany.com)	63
Figura 3.15 Sistema de extracción alternativo The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining (Robbins Co.)	63
Figura 3.16 Tuneladora híbrida usada en mina Los Bronces (SME)	64
Figura 4.1 Tipos de carbón (https://tippos.net/tipos-de-carbon/)	68
Figura 4.2 Clasificación y usos del carbón mineral (Secretaría de Economía, 2014)	68

Figura 4.3 Localidades de carbón en México (Fuente: S.G.M. 2018)	69
Figura 4.4 Cuencas carboníferas. Ibid.....	70
Figura 4.5 Participación de los minerales no metálicos en México Ibid.....	70
Figura 4.6 Producción nacional de carbón Ibid.	71
Figura 4.7 Distribución de la generación eléctrica por tipo de tecnología 2018 (CONUEE, información del PRODESEN 2019, SENER.)	71
Figura 4.8 Importación de productos metálicos y no Metálicos (Anuario Estadístico de la minería mexicana, 2018)	72
Figura 4.9 Exportación de productos metálicos y no Metálicos (Ibid.).....	72
Figura 4.10 Balanza comercial en MDD. Gráfico propio con información del SIAVI	73
Figura 4.11 Balanza comercial en Ton. Gráfico propio con información del SIAVI	73
Figura 4.12 Acceso mediante tiro inclinado (Howard L. Introductory Mining Engineering. 2002.)	74
Figura 4.13 Socavón de acceso a la mina. (Ibid.)	75
Figura 4.14 Tiro Vertical. Acceso personal y extracción material. (Ibid.)	75
Figura 4.15 con cabeza rectangular Fuente:Sandvik (izq.) y con rozadora Fuente:Alpine (der.).....	75
Figura 4.16 Cañón banda Fuente: heavy duty insight Wordpress.....	76
Figura 4.17 Arreglo de los cañones generales y secundarios Vista planta (U.S. Energy Information Administration). 1995. Longwall Mining.).....	77
Figura 4.18 Frentes en avance. Fuente: Underground Mining Methods. Hustrulid 1982	78
Figura 4.19 Frentes en retirada Fuente: Real-World Automation: New Capabilities for Underground Longwall Mining Peter B Reid	79
Figura 4.20 Componentes de una frente larga (https://www.newcastleonhunter.org/)	79
Figura 4.21 Transportadores de avance blindado (https://mining.komatsu/es)	80
Figura 4.22 Cortadora de 1 tambor (Russell Vale mine, Robert Peet, 2016)	80
Figura 4.23 Cortadora de doble tambor (Caterpillar)	81
Figura 4.24 Cepillo Fuente: tristasafety.com	81
Figura 4.25 Ademe caminante (https://mining.komatsu/es)	82
Figura 4.26 Transportadora tipo andamio (Ibid.)	83
Figura 4.27 Quebradora (Ibid.)	83
Figura 4.28 Desgasificación del metano. Coal-bed Methane (CBM) drainage from Underground Coal Mines Partha Das Sharma	86
Figura 4.29 Minero continuo (Sandvik) Figura 4.30 Minado de cuartos y pilares (Indian Institute of Technology) 87	
Figura 5.1 Geometría contrapozo ranura	88
Figura 5.2 Simba S7 (Epiroc)	89
Figura 5.3 Diseño de cuña.	90
Figura 5.4 Cuña, 2do Cuadro.	90
Figura 5.5 Diseño de la plantilla de barrenación	91
Figura 5.6 Tiempos de voladura en 1 evento	92

Figura 5.7 Cargado de barrenos 1 evento o 1 voladura	93
Figura 5.8 Tiempos por barreno para cada evento	94
Figura 5.9 Secuencia de voladura en 3 eventos	95
Figura 5.10 Barrenos vistos desde arriba o rompimiento	95
Figura 5.11 Desviación de los barrenos en su longitud total (Izquierda) Mal resultado de contrapozo (Derecha).....	96
Figura 5.12 Barrenos vistos desde el rompimiento (izquierda) y en intersección con la obra inferior (Derecha)	97
Figura 5.13 Robbins 34RH, https://www.epiroc.com/en-uk/products/raiseboring/robbins-34rh	104
Figura 5.14 Tiempo en horas para realizar contrapozo ranura, diferentes métodos	105
Figura 5.15 Costo en dólares para realizar contrapozo ranura, diferentes métodos	105
Figura 5.16 Costos y proyecciones de diferentes métodos de excavación	111
Figura 5.17 Porcentaje de costos asociados a los diferentes equipos.	112
Figura 6.1 Sistema a control remoto Scoop Tram (García, Epiroc, 2019).....	119
Figura 6.2 Ejemplo de una plantilla de barrenación precargada Equipo autónomo (Ibid).....	120
Figura 6.3 Comparación equipos a diesel-batería (Ibid.).....	121
Figura 6.4 Sección transversal con relleno como piso (Dennis Ofiara, The future of tunnel for underground mines 2020)	122
Figura 6.5 Piso con cemento hidráulico (Ibid.)	122
Figura 6.6 Piso con elemento prefabricado (Ibid.).....	123
Figura 6.7 Mina Grosvenor 15% pendiente. Piso prefabricado (Ibid.)	123
Figura 6.8 Excavación con equipo auxiliar para rimar piso (Ibid.)	124
Figura 6.9 Equipo Jarva Slot Machinem Minería del Carbón (Ibid.)	125
Figura 6.10 Equipo 55V, mecanismos principales de operación (Ibid.).....	125
Figura 6.11 Equipos Mobile Miner a)22H, b)40V, c)55V (https://www.epiroc.com/)	126
Figura 6.12 Perfiles máximos de los equipos Mobile Miner (Łukasz Bołoz, 2020)	126
Figura 6.13 Secciones excavada con mobile miner 22H (izq) y método convencional (Der) Johnny Lyly, et. al. Epiroc, 2018)	127
Figura 6.14 Sistemas principales equipo mobile miner (op. cit.)	128
Figura 6.15 TBM Robbins viga principal, modificada para excavar secciones ovaladas. (op. cit.)	129
Figura 6.16 Partes Máquina MDM 5000 (Lok, 2021).....	130
Figura 6.17 Sección excvada por la Máquina MDM5000 (Robbins.com).....	131
Figura 6.18 Izq Sección TBM 6.5m Diámetro. Der. Sección rectangular 5.0 m x 4.5m, mismo piso de trabajo (op. cit.)	131
Figura 6.19 Pantalla de control del jumbo WL3C de Atlas-Copco donde se señalan los parámetros medidos (González, España, 2015).....	133

Figura 6.20 Mapeo de los diferentes parámetros medidos sin contar velocidad de rotación (Norwegian Tunnelling Society, 2019)	135
Figura 6.21 Izq. interpretación geológica y a la derecha mapeo con MWD (Norwegian Tunnelling Society 2019).....	136
Figura 6.22 izq. Levantamiento con sistema Lidar, Der. Uso de drones en mina LKAB (https://www.emesent.io/).....	138
Figura 6.23 Robot Grounhos (izq), Robot anti-incendios (der) (Sebastian Thrun, et. al., 2003) (Página web, Tangshan Kaicheng Electronic).....	138
Figura 6.24 Robot UX-1 Chakravorty, A. (2019).....	139
Figura 6.25 Sistema Mobilaris-Mina Digitalizada (Epiroc, Cortez, 2020).....	140
Figura 6.26 Visualización digital de la mina en tiempo real (Mobilaris.com)	140

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características equipos MM120, MM130, MM130R. (Ibid.).....	17
Tabla 2.1 Potencia requerida para la RCS de la roca, (Laureano, 1984)	24
Tabla 2.2 Rendimiento de rozado. (Ibid.)	25
Tabla 2.3 Coeficiente de eficiencia. Ibid.	26
Tabla 2.4 Condiciones de trabajo. Ibid.	27
Tabla 2.5 Comparación de métodos, Complemento de (The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining Ryan Gratias,2014)	32
Tabla 2.6 Datos técnicos equipos de excavación Terratec (Fuente: http://www.terratec.co/files/TERRATEC-RBM-Brochure.pdf)	41
Tabla 3.1 Comparación de diferentes factores entre P&V y TBM en minería (Ryan Gratias, Op. Cit.)	51
Tabla 3.2 Uso de TBMs en proyectos mineros (Brox, 2013).....	54
Tabla 3.3 Especificaciones máquina Robbins, Ibid.	55
Tabla 3.4 Geología en túnel Strillwater (Ibid.)	56
Tabla 3.5 Especificaciones Tuneladora Stillwater (Ibid.)	57
Tabla 3.6 Especificaciones 2da Tuneladora (Ibid.).....	57
Tabla 3.7 Lista de proyectos en la SCM excavados con TBM de 1998-2012 (The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining, R. Gratias)	58
Tabla 3.8 Productividades en proyectos mineros (SME, 2013).....	64
Tabla 4.1 Reservas probadas en millones de toneladas Fuente: EIA	69
Tabla 4.2 Países Importadores y Exportadores de carbón a México Fuente: SIAVI (Sistema de Información Arancelaria Vía Internet).....	71
Tabla 4.3 Balanza comercial Carbón, MDD (SIAVI).....	72
Tabla 4.4 Balanza comercial Carbón, Toneladas (SIAVI)	73
Tabla 4.5 Comparación entre máquinas cortadoras.....	82
Tabla 4.6 Costos de los equipos para minado tipo LongWall. (Mustafa, 2017).....	84
Tabla 5.1 Corrección para ajustar plantilla	91
Tabla 5.2 Costos explosivos.....	98
Tabla 5.3 Costos por voladura total de chimenea	98
Tabla 5.4 Características operación equipo barrenación larga	99

Tabla 5.5 Rendimiento acero de barrenación.....	100
Tabla 5.6 Costos asociados al consumo de energía, equipo de barrenación larga	101
Tabla 5.7 Costos asociados P&V	101
Tabla 5.8 Tiempos estimados en realizar la obra con P&V	101
Tabla 5.9 Características equipo de excavación mecanizada tipo Easer.....	102
Tabla 5.10 Costos y rendimientos del acero, equipo de excavación mecanizada	102
Tabla 5.11 Costos asociados al consumo de energía, equipos de excavación mecanizada.....	103
Tabla 5.12 Costos asociados excavación mecanizada equipo Easer	103
Tabla 5.13 Tiempos estimados de excavación.....	103
Tabla 5.14 Características equipo excavación mecanizada tipo raise boring	104
Tabla 5.15 Costos y rendimientos acero, equipo raise boring machine	104
Tabla 5.16 Costos asociados al consumo de energía, equipos de excavación mecanizada RBM	104
Tabla 5.17 Costos y Tiempos estimados excavación con RBM.....	105
Tabla 5.18 Costos anuales en acero y energía para P&V.....	106
Tabla 5.19 Costo anual P&V	106
Tabla 5.20 Costos anuales en acero y energía para excavación mecanizada tipo Easer.....	107
Tabla 5.21 Costo anual Easer	107
Tabla 5.22 Costos anuales en acero y energía para RBM.....	107
Tabla 5.23 Costo anual RBM	107
Tabla 5.24 Costo 5 años, P&V	108
Tabla 5.25 Costos 5 años, Easer	108
Tabla 5.26 Costo 5 años, RBM	109
Tabla 5.27 Costo 10 años, P&V	109
Tabla 5.28 Costos 10 años, Easer	110
Tabla 5.29 Costo 10 años, RBM	110
Tabla 5.30 Costos asociados a 10 años	111
Tabla 5.31 metros de obra excavado a 10 años	111
Tabla 5.32 Índices de penetración estimados por Bilgin 1989	117
Tabla 6.1 Tasa de penetración [mm/min] en condiciones óptimas (Alfredo Bertrand, Epiroc, 2019).....	127
Tabla 6.2 Características mobile miner 40V (Asliddin Maxmadoliev, et.al. 2020)	128
Tabla 6.3 comparativa de diferentes métodos de exploración (Parmesh Kumar, Epiroc, 2014).....	132
Tabla 6.4 Valores Típicos de Medición MWD para un túnel de 100m (op. cit.) ...	134
Tabla 6.5 Costos Asociados al Sistema MWD (Epiroc, Op. Cit.).....	137

RESUMEN

El presente trabajo muestra un breve panorama de lo que representa la industria minera en nuestro país, cómo es que se clasifica la minería, en cuanto a la minería subterránea se refiere, se clasifican sus métodos de explotación y las obras requeridas para poder explotar cuerpos minerales.

Se muestran los antecedentes de los equipos de excavación mecanizada en esta industria y sus aplicaciones correspondientes, estos equipos se pueden clasificar según el tipo de obra y su funcionamiento, pasando por equipos de excavación horizontal y hacia equipos de excavación vertical, ambos para satisfacer las necesidades de explotación de una mina subterránea.

Estos equipos son una herramienta que ha cobrado relevancia en los últimos años, y se han utilizado para llegar a nuevos cuerpos minerales y profundizar los actuales con el fin de poder explotarlos con menor tiempo de preparación y mayor seguridad en la operación.

Este trabajo recolecta información sobre experiencias con estos equipos, algunos de ellos fueron exitosos sin inconvenientes, y equipos que tuvieron grandes dificultades para concluir el trabajo, a su vez las soluciones implementadas.

En el capítulo 4, se redacta el proceso de la extracción del carbón en minería subterránea, cuales son las condiciones de explotación y como es posible minar un gran porcentaje del yacimiento sin la necesidad del uso de explosivos.

En el capítulo 5, se realiza una comparación entre métodos de excavación, para el desarrollo de una obra vertical, entre método convencional (perforación y voladura) y método mecanizado (equipo tipo Raise Boring Machine), se analizan ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

INTRODUCCIÓN¹

La minería ha sido parte muy importante de la historia económica, política, social y cultural de nuestro país, así mismo un pilar de su presente y un punto nodal para un crecimiento responsable y respetuoso en el futuro.

El sector minero-metalúrgico, en nuestro país representó el 8.2% del Producto Interno Bruto (PIB) industrial y el 2.4% del PIB. de acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2018.

En el año 2018 y 2019 el empleo en el sector minero-metalúrgico presentó un incremento de 2.0% y 0.6% con respecto al año previo, con 379 mil 020 y 381 mil 456 empleos directos respectivamente.

De manera global, al cierre de 2018, y 2019 se generaron 7 mil 454 y 2 mil 346 empleos nuevos respectivamente, contra los 20 mil nuevos empleos, que, en promedio por año, se estuvieron generando durante 2010, 2011 y 2012. Al mes de enero de 2020, generó 381 mil 456 empleos directos y genera más de un 2.3 millones de empleos indirectos, de acuerdo con el reporte del Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS)

La industria de la minería y su cadena productiva, tienen una contribución importante en México y geológicamente la geografía es importante por su riqueza mineral. México se encuentra dentro de los 13 principales productores a nivel mundial de 24 minerales, y es líder mundial en la producción de plata, ocupa el prestigioso segundo lugar en la producción de fluorita, tercero en la producción de wollastonita; cuarto en la producción de bismuto y celestita; quinto sitio en la producción mundial de molibdeno, plomo y diatomita; sexto en la producción de cadmio, selenio, zinc, feldespato y yeso; séptimo en la producción de oro, barita y sal; noveno en cobre; décimo en tungsteno y manganeso; duodécimo sitio en caolín y grafito; y décimo tercer sitio en hierro.

Este año (2020), México se posicionó en 2do lugar con el presupuesto de exploración más alto de América Latina y 5to a nivel mundial, también es el 5° lugar en la atracción de inversiones para minería durante 2018, de acuerdo a la firma S&P Global Market Intelligence.

En cuanto a inversión directa se refiere, el sector minero invirtió 4,897 millones de dólares en 2018, lo que significó un aumento de 13.8% en comparación con lo invertido en 2017; el sector continúa manteniéndose como una de las ramas productivas que atrae mayor inversión al país.

En 2018 El saldo de la balanza comercial minero-metalúrgica de nuestro país registró un superávit comercial, con un saldo positivo.

¹ Datos tomados del INEGI, SEGOB, CAMIMEX, SGM.

1. GENERALIDADES

MINERÍA

Actualmente la minería se puede clasificar la minería en 4 tipos principales:

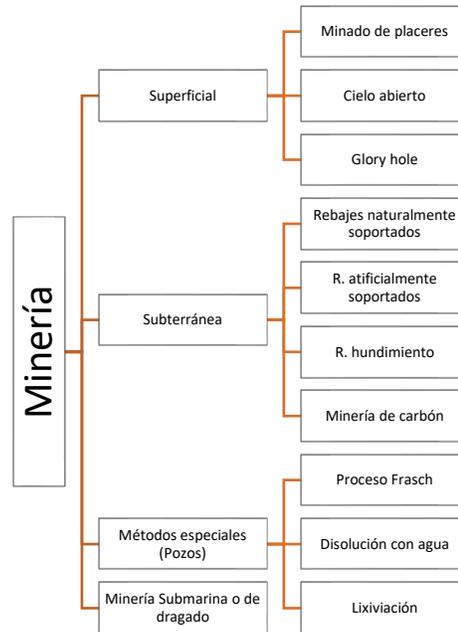


Figura 1.1 Clasificación de la minería

Respecto a la minería subterránea, a continuación, se muestra una clasificación más detallada, según su método de explotación.

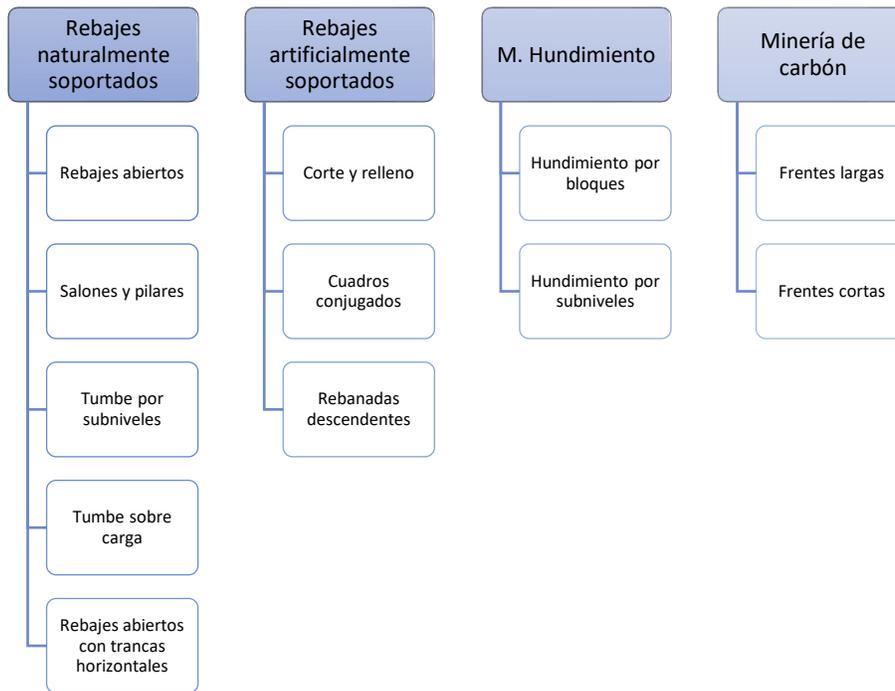


Figura 1.2 Clasificación de la minería subterránea

MINERÍA SUBTERRÁNEA METÁLICA

Obras principales en minería subterránea

A grandes rasgos las obras subterráneas en minería se pueden clasificar de la siguiente manera:

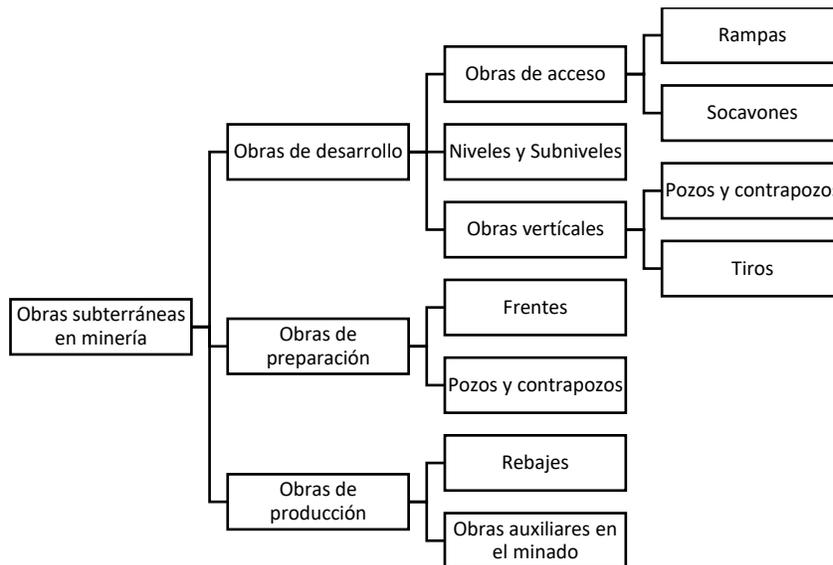


Figura 1.3 Tipos de obras en la minería subterránea

La minería subterránea requiere una gran cantidad de obras de desarrollo, estas obras son excavadas con la función principal de llegar al cuerpo mineral que se encuentra en el subsuelo. Estas obras son:

- Portal de entrada o bocamina
- Rampas
- Tiros
- Accesos
- Contrafrentes

Las obras de preparación se refieren a las obras necesarias para comenzar la explotación del cuerpo minera una vez alcanzado una elevación requerida con las obras anteriormente mencionadas. Estas obras se excavan en mineral, aunque se esté produciendo mineral no pueden ser clasificadas como obras de producción ya que su principal función es delimitar el bloque mineral y prepararlo para su explotación. Algunas de las obras de preparación son:

- Contrapozos ranura
- Frente con rumbo al cuerpo mineral
- Cruceros
- Contrapozos metaleros
- Subniveles de preparación

A su vez existen otro tipo de obras auxiliares, estas tienen múltiples propósitos, algunos de ellos son:

- Ventilación
- Transportar mineral o tepetate de un nivel a otro
- Conducto de servicios de agua y aire comprimido al interior de la mina
- Obras necesarias para colocar equipos de exploración
- Obras de bombeo

En la Fig.1.4 se observa un esquema representativo de las obras necesarias requeridas en una mina subterránea para explotar un cuerpo mineral.

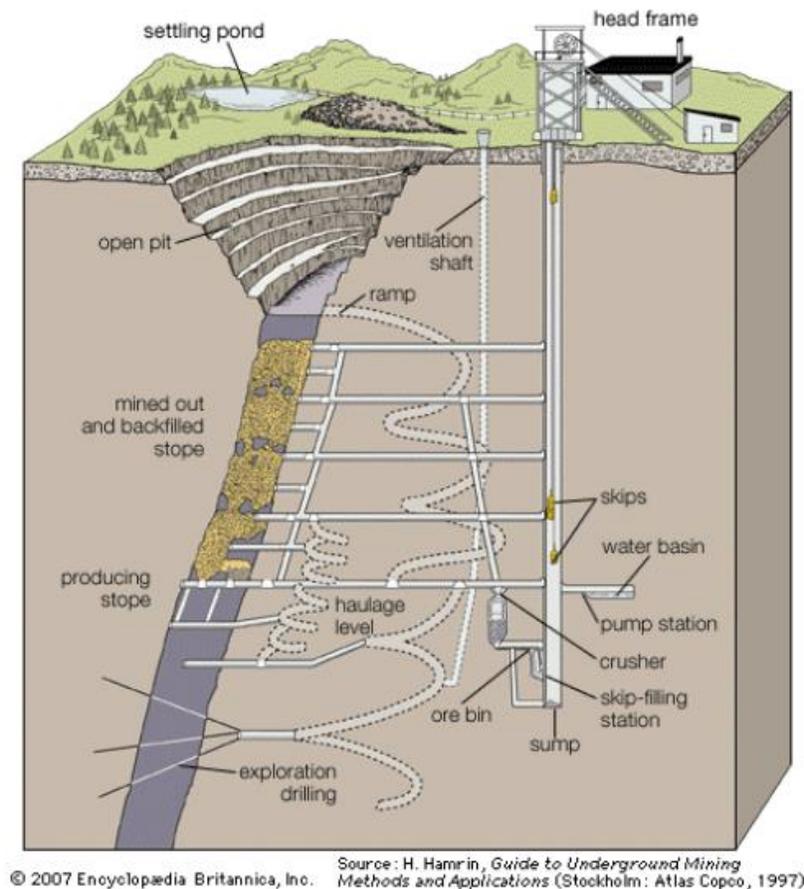


Figura 1.4 Estructura típica de una mina subterránea (Atlas Copco, 1997)

La necesidad de desarrollar máquinas que pudieran excavar estas obras sin necesidad de utilizar explosivos dio origen a las máquinas de excavación mecanizada.

Las primeras máquinas de excavación mecanizada en túneles fueron desarrolladas para excavar túneles carreteros, las primeras aplicaciones de una máquina de excavación en minería subterránea se suscitaron cerca de los años 1916/1917, una

máquina llamada Eiserner Bergmann, utilizaba una cabeza rotatoria equipada con cortadores de acero, esta excavaba una sección rectangular. (Fig. 1.5). Fue utilizada para realizar obras en roca potásica.

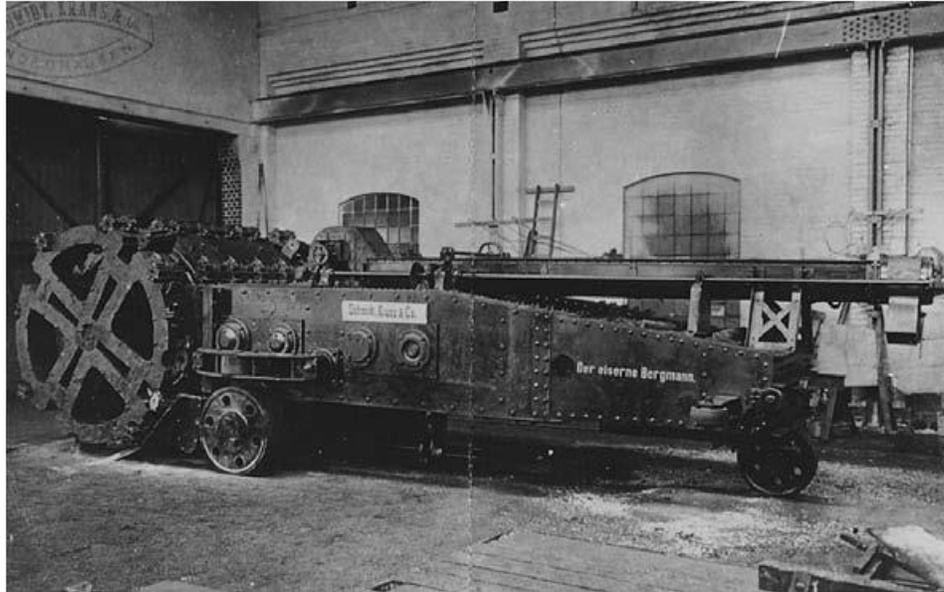


Figura 1.5 Eiserner Bergmann” 1916/17 (Schmidt, Kranz et al.) (Maidl, 2008)

La siguiente generación de máquinas de excavación para túneles en minería fue desarrollada por Schmidt, Kranz & Co. en 1931 (Fig. 1.6), Esta máquina ya contaba con un sistema back up, contaba con un carro para transportar el cable, un carro de bandas. En la cabeza de corte tenía 3 brazos equipados con cuchillas, alcanzaba tasas de excavación de 5 m por turno, se requerían 5 personas para operar la máquina, esta se utilizó en minería de carbón, no tuvo gran éxito debido al tiempo que se requería para retirar la máquina del frente de excavación.

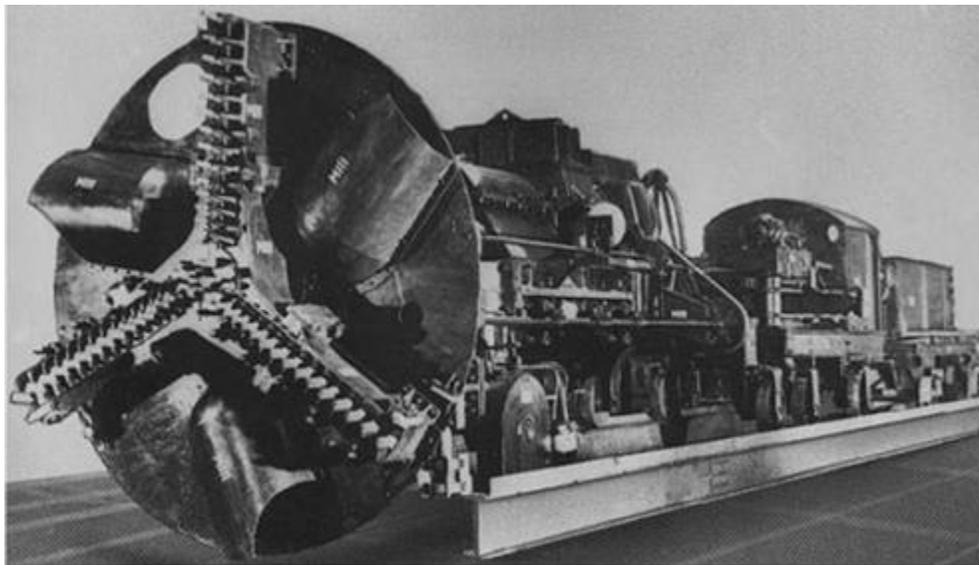


Figura 1.6 Máquina para carbón, 3m de diámetro, de Schmidt, Kranz, 1931 (Ibid.)

El parteaguas de esta tecnología sucedió cuando el ingeniero en minas James S. Robbins, en 1950, desarrolló la primer TBM con grippers y discos cortadores en la cabeza, conociéndose así el principio de las TBM como se conocen hoy en día. (Fig. 1.7) Su diámetro de excavación era de 3.3m.

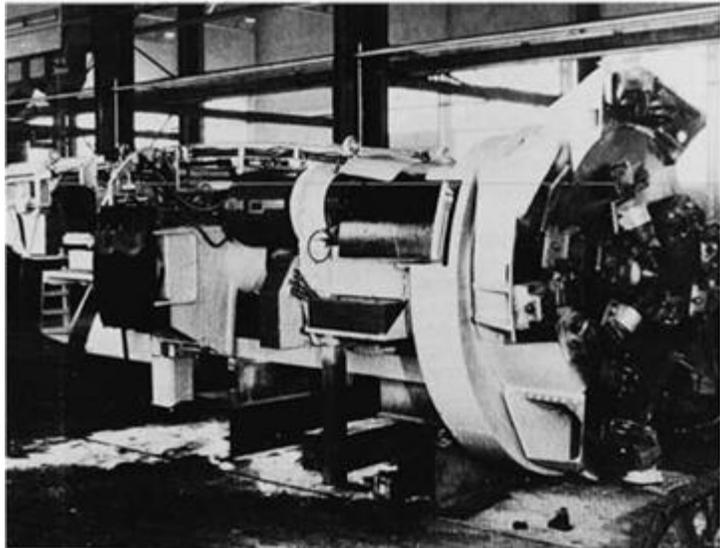


Figura 1.7 Primer TBM moderna, von J.S. Robbins, model 131-106 (Ibid.)

Dentro de la minería de carbón, la tecnología se continuó desarrollando y alrededor de los años 60's por "The Bade Company" creó la máquina SVM, su tecnología utilizaba una cabeza de corte dividida en 3 anillos que rotaban en contrasentido, utilizaba rodillos dentados como medio de corte, el diámetro de la cabeza de corte era de 4.0m. Esta tecnología no tuvo éxito en roca dura. (Fig.1.8)

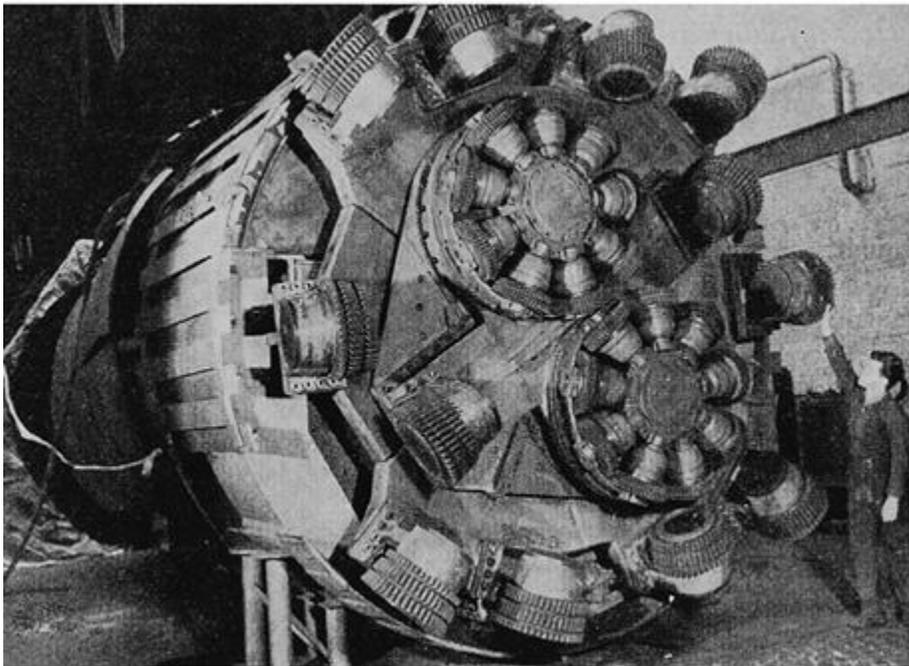
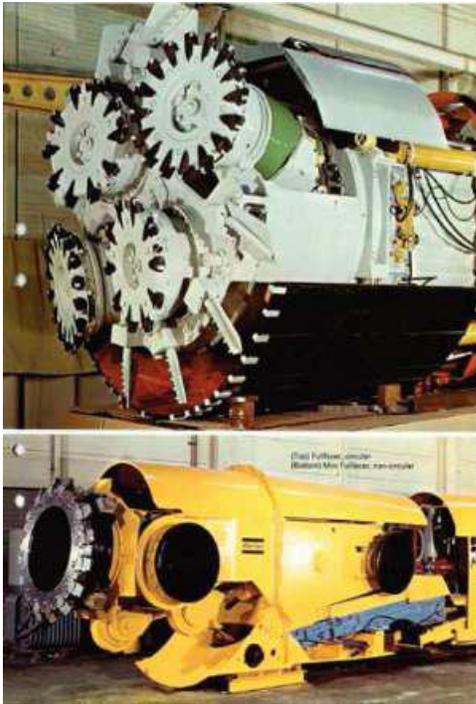


Figura 1.8 Máquina SVM 1961 4.0m diámetro (Ibid.)



En los años 70's Atlas Copco, basándose en la investigación del profesor Wohlmeyer donde el método de excavación se basaba en picas con puntas largas de tungsteno, que rotaban a una velocidad muy baja, pero con mucha fuerza de empuje para desgarrar la roca, de esta tecnología las máquinas Midi y Mini fueron concebidas. Tenían problemas para excavar en roca dura. (Fig.1.10)

Figura 1.9 Arriba Midi, Abajo Mini, desarrolladas por Atlas Copco (Christopher Delabbio, 2010.)

Robbins y Atlas Copco continuaron desarrollando tecnología de excavación mecanizada para implementar en minería, en el año 1992, Robbins diseño la MM120, que podía excavar secciones rectangulares, favorables para la minería, un año después Atlas Copco adquiere la Robbins y desarrollan la máquina MM130, con un perfil de corte más grande y con tecnología avanzada para excavar en roca dura. Finalmente, Atlas Copco vendió en 1998 a Bortec el desarrollo de la tecnología TBM y continuó con tecnología Shaft Boring Machine (SBM) y el desarrollo de otros equipos para la industria minera.



Figura 1.10 Izq. MM120, Centro MM130, Der. MM130R. (Ibid.)

	MM120	MM130	MM130R
Altura del túnel [m]	3.7	4.1	6.1-8.1
Ancho del túnel [m]	4.9 - 7	5.5 - 7.9	9.0 - 12
Diámetro de la cabeza de corte [m]	3.7	4.1	4.1
Potencia de la cabeza de corte [kW]	300	500	500
Velocidad de la cabeza de corte [rpm]	12.7	15	15
Número de cortadores	20	18	18
Carga por cortador [kN]	35	23	23
Longitud de corte [m]	0.75	0.75	0.75
Mejor rendimiento consistente	0.15 m/h	83 m/mes	0.5 m/h

Tabla 1.1 Características equipos MM120, MM130, MM130R. (Ibid.)

En cuanto a la excavación de obras verticales se refiere, la primera máquina de excavación que tuvo éxito en la minería subterránea fue desarrollada por Robbins con su raise boring machine 41R (Fig. 1.11), esta máquina podía desarrollar obras de 1.2 m de diámetro, su configuración ya era similar a cualquier máquina actual aplicada para ese fin, utilizando una tubería y una rima ascendente con cortadores de acero. Este equipo fue desarrollado en 1962, por Dick Robbins.

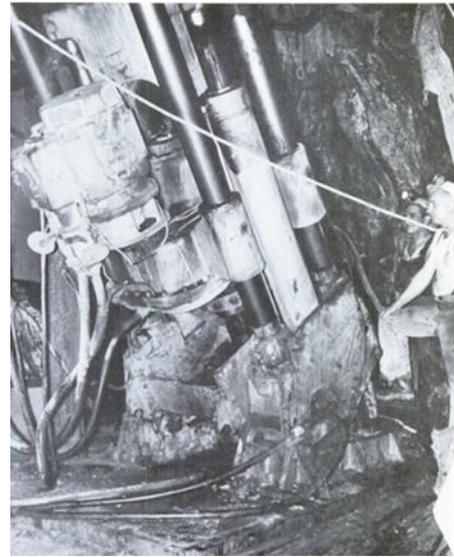


Figura 1.11 Robbins 41R (Wadell 1971)

La tecnología para desarrollar tiros y obras de mayor diámetro continuó en desarrollo, el equipo shaft boring machine con barreno piloto preperforado, este equipo no contaba con tubería para perforar, podía excavar la longitud que el barreno piloto tuviera, así que requería la necesidad de una máquina raise boring machine para realizarlo. Utilizaba un sistema de grippers y cilindros de propulsión para sujetarse y empujar la cabeza de corte, mientras esta rotaba sobre un eje paralelo a la dirección de la obra. La rezaga se transporta por gravedad mediante el barreno piloto hacia una obra previamente excavada, donde es cargada y transportada por equipos convencionales.

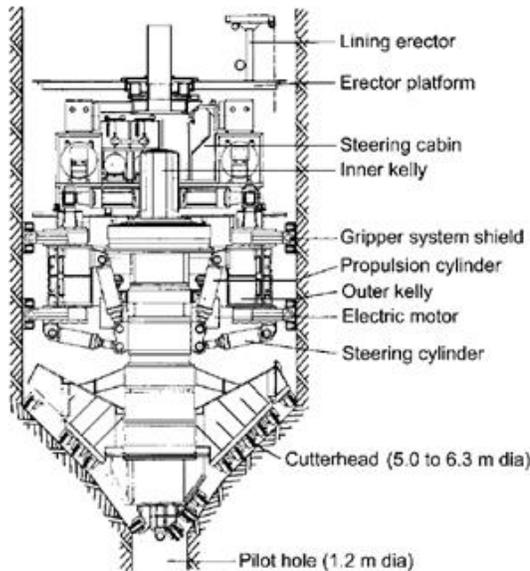


Figura 1.12 Shaft boring machine, barreno piloto. (Op. Cit.)

En 1977, se desarrolló un equipo shaft boring machine (Fig. 1.13) que no requería un barreno piloto para poder excavar, esta máquina se utilizó en la mina US steel oak grove mine en Alabama, de igual manera utilizaba el principio de excavación que la máquina anteriormente descrita, la diferencia principal radicaba en la forma de extraer el material, se requería de una almeja que depositara el material en cubetas para ser extraído mecánicamente de la obra. Pero esto hizo posible que no se requirieran 2 equipos, ni una obra adicional para realizarlo. El diámetro de excavación del equipo era de 7.4 m

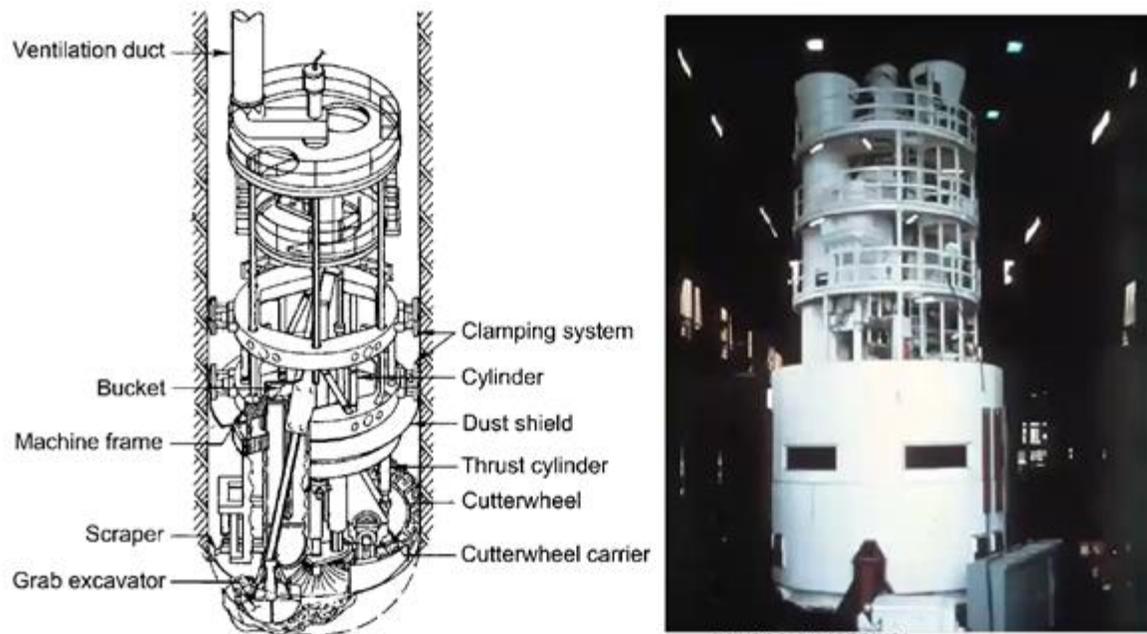


Figura 1.13 Blind Shaft Boring Machine, izq. Funcionamiento (Maidl, 2008), der., foto (Lok Home, 2021)

2. EQUIPOS DE EXCAVACIÓN MECANIZADA

Los equipos de excavación mecanizada son aquellos que desgarran o rompen el terreno donde se pretende realizar una obra subterránea mediante medios mecánicos.

Todas las máquinas que se utilizan como medios de excavación tienen los siguientes elementos:

- a) Cabeza de corte
- b) Tren motriz
- c) Sistema eléctrico e hidráulico
- d) Sistemas auxiliares
 - a. Ventilación
 - b. Lubricación
 - c. Transporte de material
 - d. Sistemas de presurización de tierras
 - e. Sistemas de sostenimiento

Para realizar una excavación en roca podemos clasificar en:

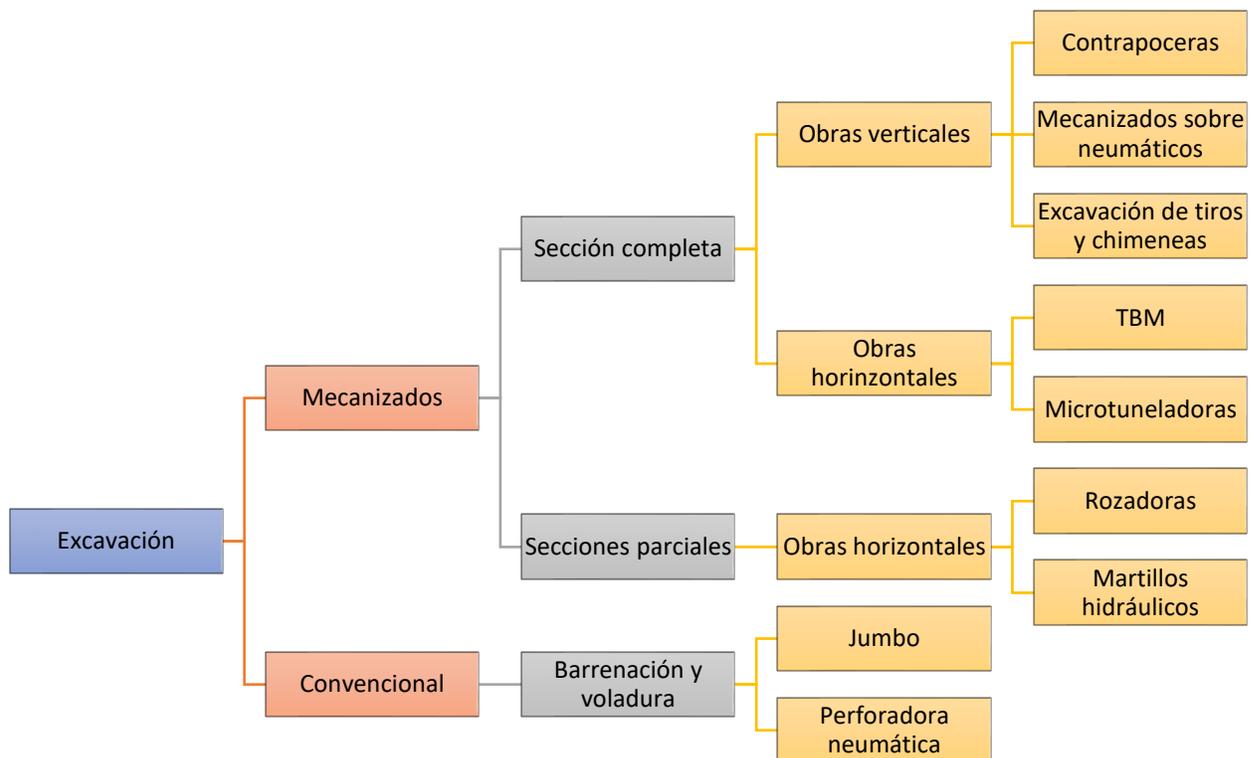


Figura 2.1 Clasificación de las excavaciones

Existen otros métodos mecanizados, como son los martillos hidráulicos, no se toman en consideración por la poca eficiencia que estos presentan en rocas y su uso es prácticamente inexistente en las obras mineras.

ROZADORAS

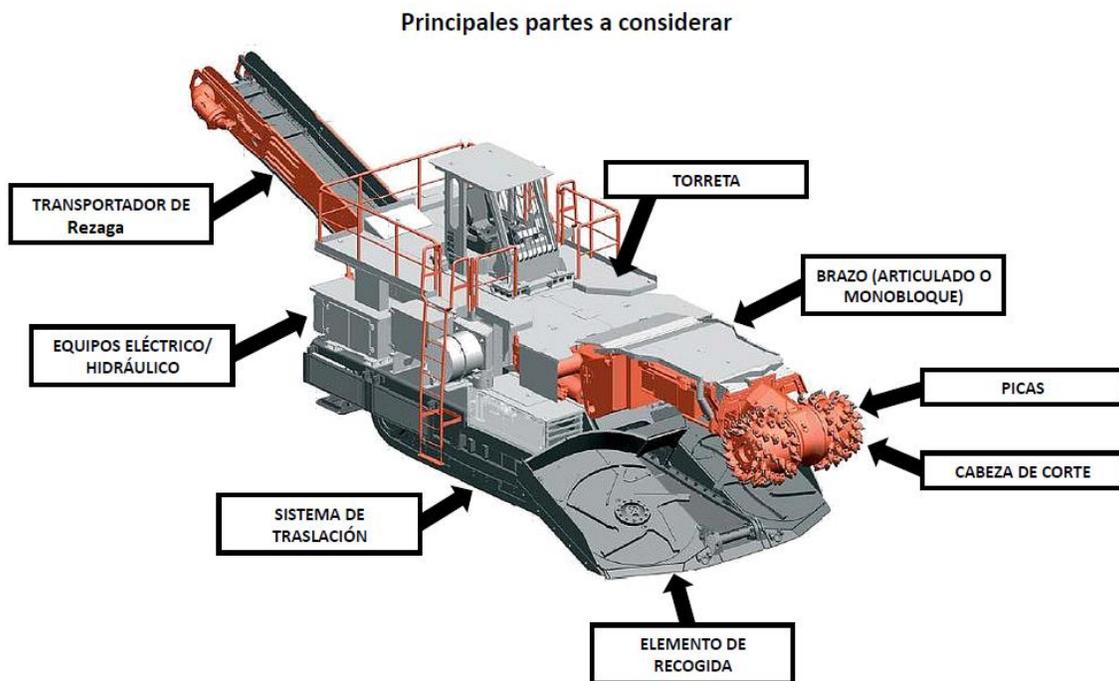
Las rozadoras son equipos de excavación mecanizada que se utilizan principalmente en rocas blandas, medias y en ocasiones duras, se utilizan cuando el uso de explosivos es limitado o no es posible utilizarse, cómo es el caso de la minería del carbón, debido a las atmosferas explosivas que se encuentran ahí. Estos equipos son montados sobre orugas, se utilizan en obras con menor geometría y que no superan los 2 km de longitud en el caso de túneles urbanos.

Estos equipos realizan la excavación mediante una cabeza de corte que tiene como herramientas de corte picas, giran en sentido perpendicular al eje, la cabeza de corte está montada sobre un brazo que tiene movimientos horizontales y verticales. Su sistema de ataque es puntual, utilizan la potencia total del motor de corte y el peso de la máquina (fuerza de reacción).

El brazo cuenta con cilindros de levante proporcionándoles un movimiento vertical, y cuenta con movimiento horizontal mediante cilindros opuestos.

La excavación se realiza mediante la siguiente metodología:

1. Excavación mediante la cabeza de corte
2. Rezagado mediante sistemas de recogida
3. Transferencia del material mediante el transportador hacía equipos auxiliares de carga



«Sandvik MT 720 Roadheader» (© Sandvik Mining and Construction), Kelly Michals.

Figura 2.2 Partes de una rozadora (Pérez Álvarez, Diseño y ejecución de obras subterráneas)

Dependiendo el tamaño del equipo y sus rangos de operación se pueden clasificar de la siguiente manera:

TIPO DE MINADOR	PESO PROPIO (t)	POTENCIA DE CORTE (kW)	RANGO DE OPERACIÓN			
			ROZADORAS CON RANGO DE EXCAVACIÓN ESTÁNDAR		ROZADORAS CON RANGO DE EXCAVACIÓN AMPLIADO	
			SECCIÓN MÁXIMA (m ²)	RCS max (MPa)	SECCIÓN MÁXIMA (m ²)	RCS max (MPa)
LIGERO	8 - 40	50 - 170	20	60 - 80	40	20 - 40
MEDIANO	40 - 70	170 - 230	25	80 - 100	60	40 - 60
PESADO	70 - 100	250 - 300	40	100 - 120	70	60 - 80
MUY PESADO	> 110	350 - 400	45	120 - 140	80	80 - 110

Figura 2.3 Clasificación de las rozadoras, (Tamrock, López Jimeno, 1998)

Las máquinas rozadoras se pueden clasificar según su sistema de corte, estas se dividen en:

Ripping: Las cabezas giran alrededor de un eje paralelo al frente de ataque. El cabezal gira perpendicularmente al brazo de soporte. Las picas golpean la roca utilizando todo el peso de la máquina, se utiliza en el rozado de rocas más duras. Las velocidades típicas de las cabezas varían entre 45 y 100 RPM.

Milling: En este diseño el eje de giro es perpendicular al frente de excavación, la cabeza de corte gira en línea con el eje del brazo de soporte, la fuerza de corte se aplica lateralmente, por lo que no se aprovecha todo el peso del equipo como fuerza de reacción. En rocas duras se debe disponer de unos gatos o cilindros hidráulicos de apoyo para absorber los momentos de giro producidos por el brazo de corte. Las velocidades típicas de las cabezas varían entre 20 y 65 RPM.

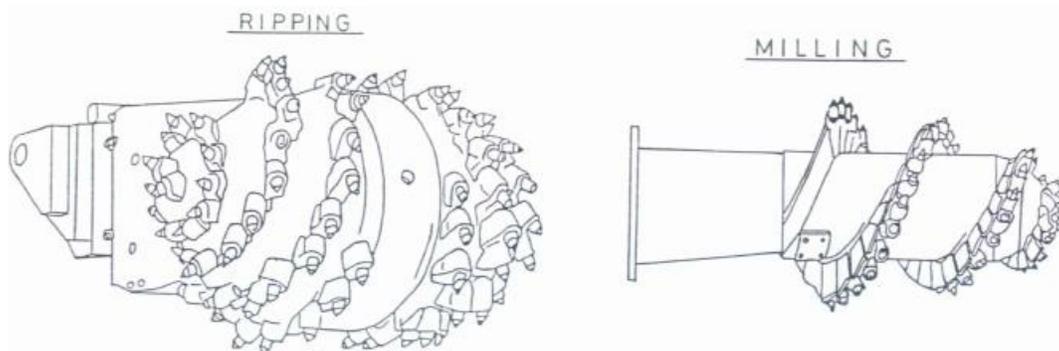


Figura 2.4 Sistemas de corte de rozadoras (Cornejo, 1984)

Este tipo de equipos puede realizar diferentes formas de perfiles, también dependiendo el tipo de cabeza puede atacar estratos más suaves que otros, y esto genera un plano de debilidad en los estratos con mayor dureza, provocando que el desgarre posterior sea más eficiente que atacarlo directamente.

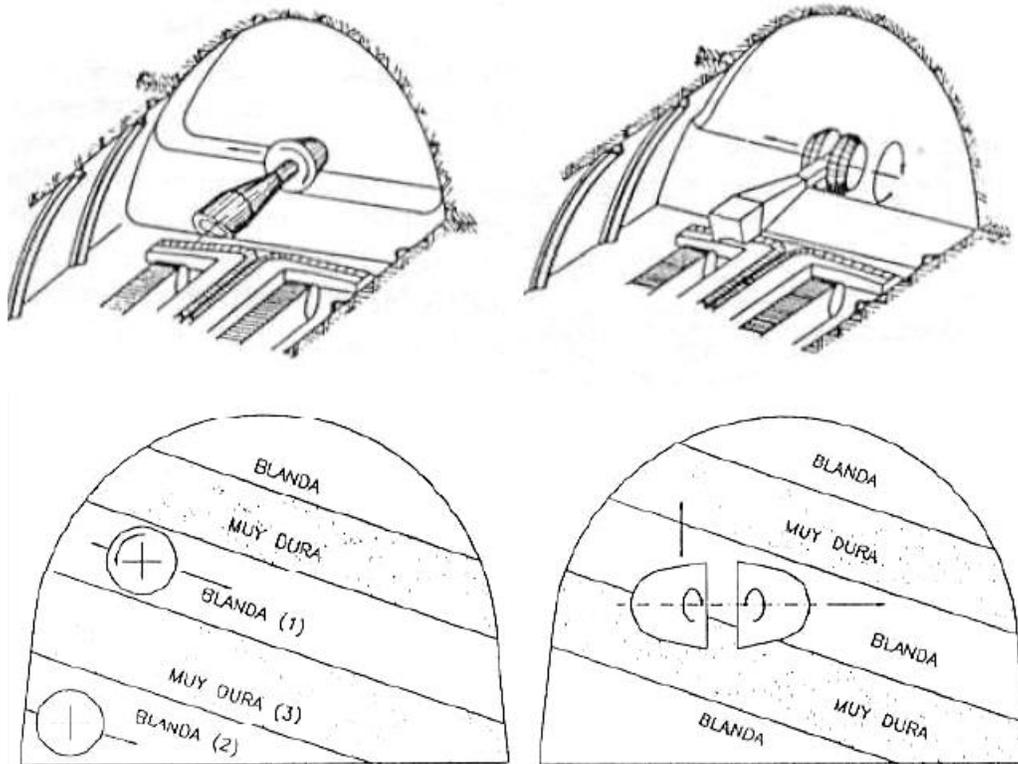


Figura 2.5 Procedimiento de excavación en el frente según el tipo de cabeza de corte (Ibid.)

HERRAMIENTAS DE CORTE ROZADORAS

Como se mencionó, el desgarrar del material se realiza mediante picas, estas están sujetas a un soporte de picas, este soporte es de acero reforzado mediante tratamiento térmico para proporcionarle mayores propiedades a su uso, las picas tienen una punta de carburo de tungsteno como punta de ataque. Se pueden clasificar según su uso.

Picas radiales: se utilizan para rocas blandas o suelos duros.

Picas tangenciales: tienen una forma cónica, y están especialmente diseñadas para soportar la fricción con la roca, también se les conoce como picas de ataque.

El desgaste de las picas debe ser tomado en consideración para valorar los costos de la excavación, influyen factores como, dureza de la roca, presencia de minerales abrasivos, discontinuidades importantes, zonas de falla, grado de fracturamiento, uso de agua como fluido de lubricación, entre otras.

Cuando se colocan las picas en la cabeza de corte se deben considerar los siguientes ángulos:

- a) *Ángulo de ataque*: el ángulo de ataque es el ángulo formado por el eje de la pica y el plano que pasa por el vértice de la misma y el eje de la cabeza de corte, medido en el vértice de la pica. Se recomienda un valor de 45° ,

- b) *Ángulo de oblicuidad o sesgo*: el ángulo de oblicuidad es el formado por un plano que pasa por el eje de la pica y es normal a la placa base del portapicas y un plano normal al eje de corte y la dirección de rotación de la cabeza, medido en el vértice de la pica. El ángulo de oblicuidad debe tener un valor entre 5 y 10°.
- c) *Ángulo de basculamiento*: el ángulo de basculamiento es el formado por un plano que pasa por el eje de la pica, y es normal a la placa base del portapicas, y un plano normal al eje de la cabeza de corte y la dirección de rotación de éste, medido en la línea central de la placa base del portapicas.

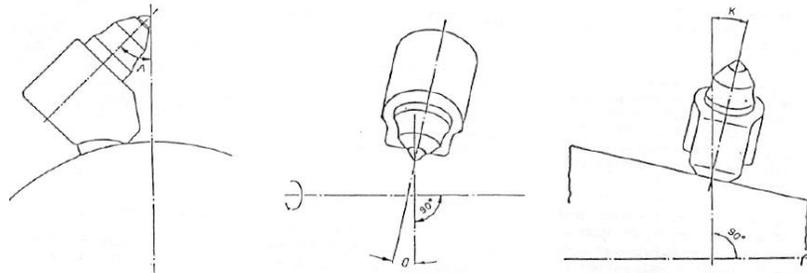


Figura 2.6 ángulos a) ataque, b) oblicuidad c) basculamiento(Ibid.)

CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE UNA MÁQUINA ROZADORA²

Varios son los criterios que definen la selección de una máquina rozadora, entre los principales podemos encontrar:

Resistencia a la compresión de la roca

Sin duda el principal criterio a considerar, ya que este parámetro determina la potencia necesaria para la cabeza de corte, la resistencia a la compresión simple se debe determinar mediante pruebas de laboratorio o ensayos in situ, como el martillo Schmidt, considerar la resistencia del macizo rocoso y no solo de la roca a

excavar, ya que hay parámetros como grado de fracturamiento que modifican el comportamiento del macizo y si no se toma en cuenta se puede sobreestimar el equipo.

En la siguiente tabla se observa la relación que guarda la potencia de la cabeza de corte con la RCS de la roca.

RCS [MPa]	Potencia cabeza corte [kW]
20	30
30	50
40	70
50	90
60	100
70	115
80	130
90	165
100	200
110	300

Tabla 2.1 Potencia requerida para la RCS de la roca, (Laureano, 1984)

² Laureano Cornejo, 1984.

Rendimiento de rozado

Este rendimiento se mide en m^3/h , está en función de la potencia de la cabeza de corte y la RCS, con este rendimiento y la potencia de la cabeza de corte se puede empezar a estimar un cierto tamaño de máquina como se mencionó en la tabla de tamaños de rozadoras.

Resistencia a la compresión simple [Mpa]						
Potencia de la cabeza de corte [kW]	120	100	50	30	20	10
	Rendimiento [m^3/h] (R_i)					
300	23	29	50	72	94	116
200		12	29	48	67	81
110			27	27	34	46
50				12	17	41
40				6	12	35
20					3	12

Tabla 2.2 Rendimiento de rozado. (Ibid.)

Geometría de excavación

La geometría de excavación determina las dimensiones máximas de un equipo, para este caso el galibo del túnel o de la obra determina el tamaño máximo que debe alcanzar el brazo de la rozadora, si es un túnel cuadrado o abovedado puede determinar el tipo de cabeza de corte, si la obra es excavada en fases o completa. Un parámetro importante en la geometría de la obra es la pendiente a excavar, ya que este tipo de máquinas no tiene un rango amplio en cuanto a pendiente de trabajo, se recomienda su uso para obras horizontales o con pendientes mínimas.

Condiciones geomecánicas

Se debe considerar los parámetros geomecánicos para una correcta selección, como son, grado de fracturamiento, presencia de agua, profundidad de la obra, esfuerzos in situ, esfuerzos tectónicos, anisotropía presente, comportamientos mecánicos de los materiales, etc.

Presión transmitida al terreno

Estos equipos trabajan con una fuerza de reacción que se transmite al piso, si las condiciones del terreno no son aptas, ya sea por presencia de agua o condiciones geomecánicas débiles de la roca, el rozado no se va efectuar, ya que no hay una fuerza resistente que se oponga a la fuerza de rozado de la máquina.

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DEL EQUIPO

Algunas peculiaridades que se pueden considerar al momento de elegir un equipo son:

- a) Velocidad de traslación
- b) Energías alternativas en la traslación
- c) Puede o no trabajar en atmosferas explosivas
- d) Brazo telescópico y articulado
- e) Robustez de la máquina
- f) Sistema adicional de dirección y control automático del perfil de la excavación.
- g) Sistema de chorro de agua a alta presión.

Rendimientos

Los rendimientos de estos equipos se pueden evaluar mediante la siguiente expresión:

$$R_{EXD} = C_E \times R_I \times n \times C_l \times C_D \quad (2.1)$$

Donde:

- R_{EXD} = Rendimiento de excavación por día [m³/día]
- C_E = Coeficiente de eficiencia
- R_I = Rendimiento instantáneo de excavación [m³/h]
- n = Número de horas operadas al día
- C_l = Coeficiente de tiempo muertos (máx. 85%)
- C_D = Coeficiente de tiempo disponible para el rozado

Grado	Condiciones de trabajo	C_E
1	Buenas condiciones de la solera. Se produce poco polvo	1
2	Solera en malas condiciones. Poco polvo	0.86
3	Mucho polvo, interrupciones ocasionales del trabajo	0.69
4	Solera en malas condiciones. Poco polvo	0.52

Tabla 2.3 Coeficiente de eficiencia. *Ibid.*

CD	Condiciones de trabajo
10%	Condiciones pésimas
20%	Terrenos malos con varias fases de ejecución realizadas con la misma rozadora en los que se coloca un sostenimiento sistemático importante
50%	Cuando se trabaja por un frente en una sola fase y con un sostenimiento ligero
85%	En condiciones óptimas sin ningún impedimento para el trabajo de la máquina

Tabla 2.4 Condiciones de trabajo. Ibid.

TBM (TUNNEL BORING MACHINE)

Las máquinas TBM o tuneladoras, son equipos que excavan a sección completa mientras realizan el sostenimiento en la parte posterior, es por este motivo que se le conocen como máquinas integrales.

Las tuneladoras pueden excavar en frente abierto o presurizado, el primero se realiza en terrenos donde no hay poca o nula presencia de agua y no hay peligro para una falla de frente, como es la mayoría de los casos para la excavación en roca, para el frente presurizado se requiere estabilizar el frente, ya sea mediante el uso del mismo terreno o mediante lodos (slurrys) o como se hacía en los inicios de los escudos, con aire comprimido.

Las TBM para roca se puede clasificar en:

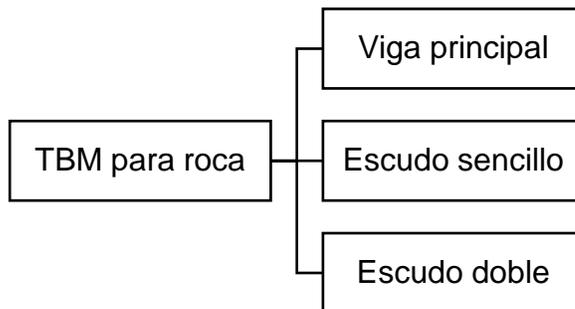


Figura 2.7 Clasificación TBM para roca



HERRAMIENTAS DE CORTE TBM

Las herramientas de corte que se utilizan en las rocas, son principalmente discos cortadores, estos discos rotan en contacto con la roca, lo que pulveriza y corta la roca, formando chips, las dimensiones comerciales son de diámetros de 6" a 20" de diámetro, con durezas de 50-55 HRC(Rockwell C scale hardness). Las partes que componen un disco son:

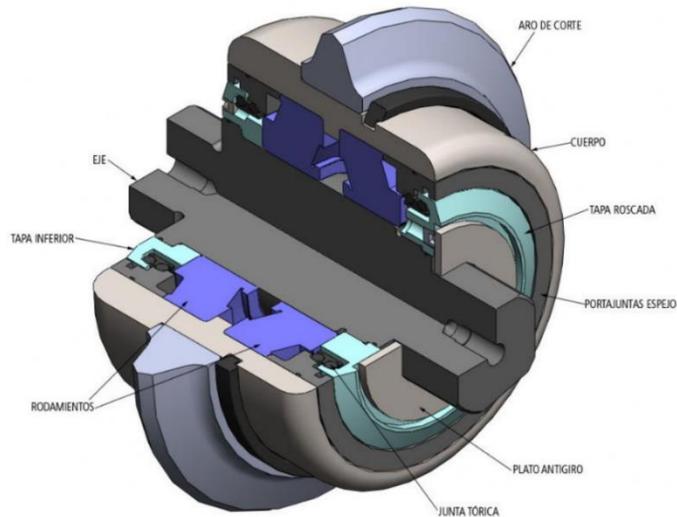


Figura 2.8 Disco de corte (Bartz.es/Cutters)

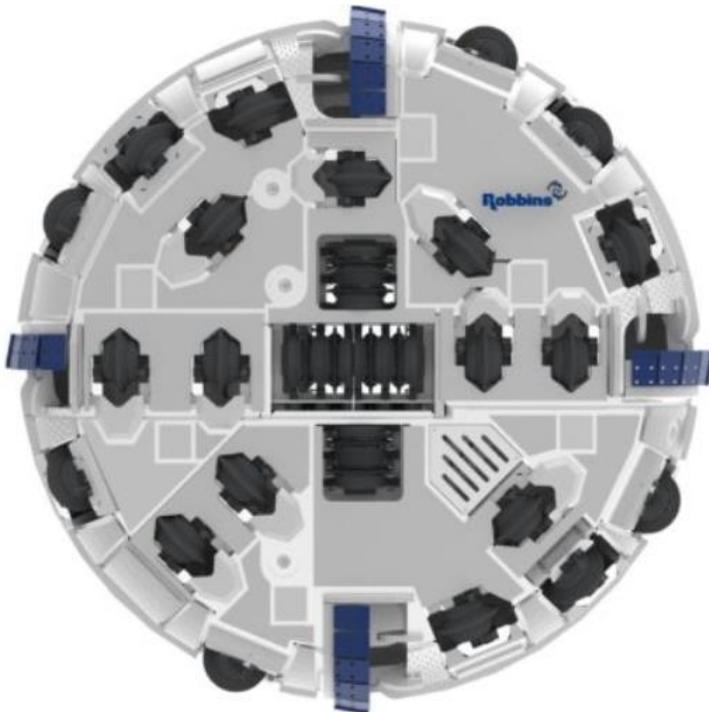


Figura 2.9 Cabeza de corte para roca, (Robbins.com)

La cabeza de corte típica para la excavación en roca es con discos que se ponen a diferentes distancias del centro para que tengan un radio de giro diferente, también cuentan con discos centrales que son de mayor volumen que los que se encuentran alrededor de la cabeza, también se tienen discos perimetrales para realizar un diámetro ligeramente más grande que el diámetro de la máquina. Un arreglo común se muestra en la figura 2.9

Los chips o la rezaga son recogidos mediante rastreles hacia unos conductos en la parte posterior de la cabeza, la cabeza gira en sentido antihorario, cuando los canales que conducen la rezaga superan el ángulo de reposo del material, este cae por gravedad hacia una tolva al interior de la máquina, que posteriormente será conducido por banda transportadora al exterior.

TBM DE VIGA PRINCIPAL

También llamada “topo”, esta máquina es del tipo abierto y es la más común en proyectos mineros, debido a que las condiciones geomecánicas no hacen necesario el uso de un escudo. La tenacidad de la roca debe ser tal que soporte la presión que ejerce los grippers contra el terreno, para que este no falle y pueda excavar sin complicaciones.

Su uso predomina en rocas de buena a excelente competencia.

Las partes que componen a este equipo son las siguientes:

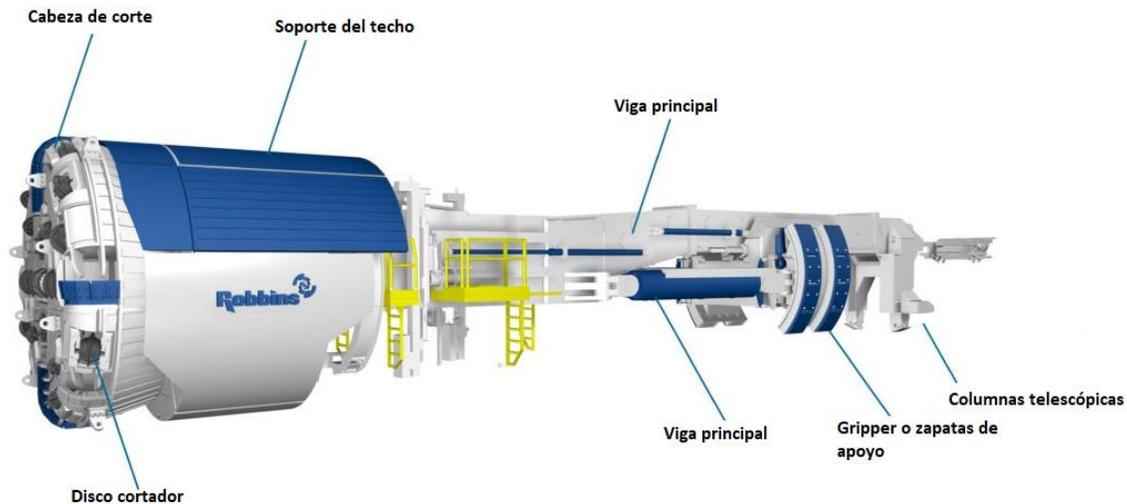


Figura 2.10 Partes de una TBM de viga principal, (Robbins)

El procedimiento de excavación de una TBM de viga principal o main beam es el siguiente.

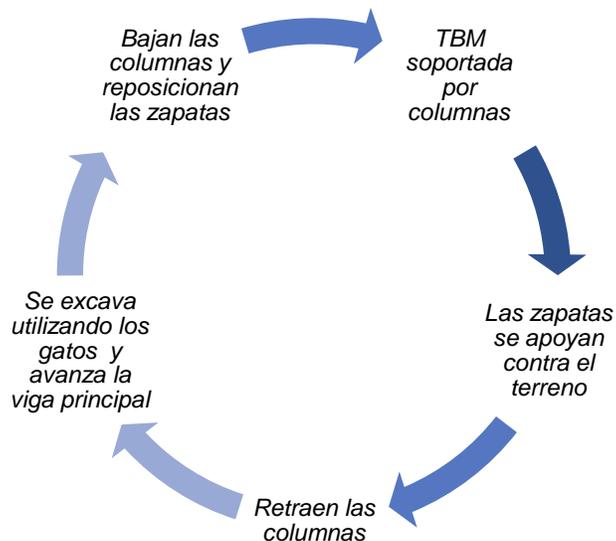


Figura 2.11 Ciclo de excavación TBM viga principal

TBM ESCUDO SENCILLO

Este tipo de escudo es un escudo cerrado, puede trabajar en modo abierto o modo cerrado, a diferencia de la viga principal, este no se apoya en grippers o viga, utiliza dovelas prefabricadas como medio de soporte de la obra, los cilindros de empuje utilizan las dovelas colocadas como medio para apoyarse y ejercer la fuerza necesaria para excavar el terreno.

Puede utilizarse en terrenos que no se autosoportan y requieren un sostenimiento adicional

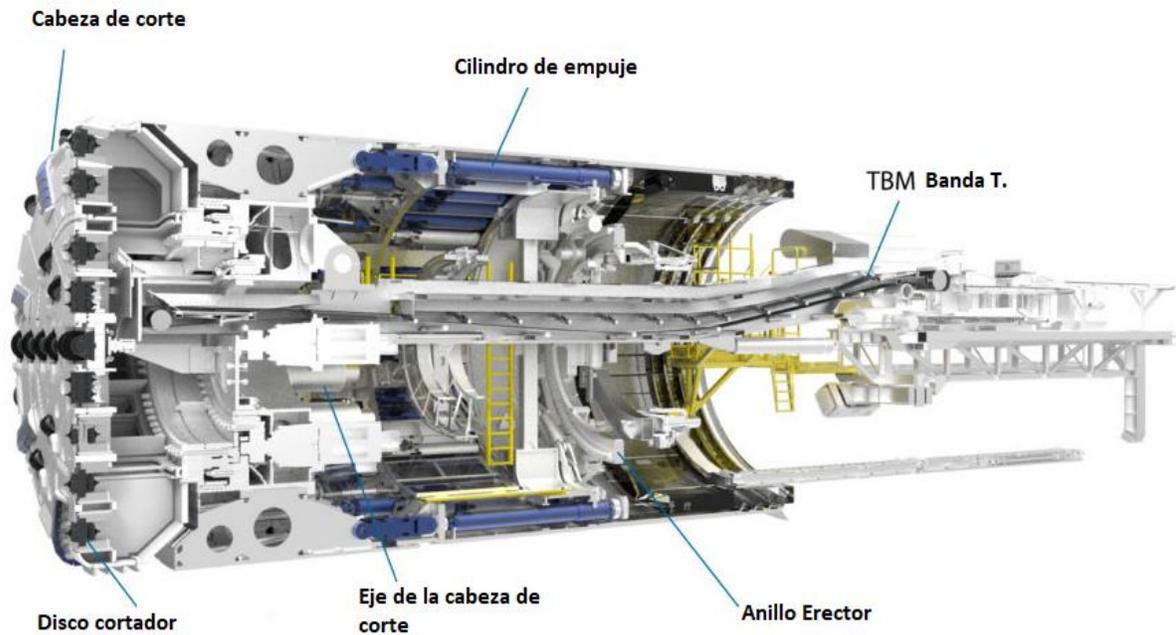


Figura 2.12 TBM escudo sencillo (Ibid.)

Cuenta con perforadoras que están localizadas atrás del erector de dovelas de 10 a 15 metros, para realizar inyecciones para estabilizar el terreno en cuanto a flujo de agua se refiere, este tipo de tuneladora evita el ingreso de agua a la obra debido a las dovelas que se colocan, estas cuentan con empaques para evitar el ingreso del agua, aunado a esto un sistema de inyección coloca grasa en el espacio anular que se forma entre la roca excavada y las dovelas colocadas.

Este tipo de tuneladora debe ser evaluado ampliamente para ser utilizado dentro de una mina debido al costo adicional que genera el uso de dovelas prefabricadas.

TBM ESCUDO DOBLE

Este tipo de escudo consiste en el escudo frontal de corte, seguido de un arreglo de escudos, escudo telescópico, escudo del gripper y escudo de la cola, el escudo telescópico es de un diámetro ligeramente menor al del escudo de corte, lo que le permite hacer esos movimientos, del escudo gripper a la punta de la TBM, funciona como un escudo de viga principal, sin las columnas telescópicas, el escudo telescópico cuenta con gatos de empuje que se apoyan en el escudo gripper cuando este tiene las zapatas apoyadas al terreno, así logrando el avance en la excavación, mientras tanto, en el escudo trasero se instalan las dovelas con el anillo erector, que toma las dovelas a base de vacío y las coloca hasta formar el anillo de dovelas, este proceso no interrumpe el ciclo de excavación. Si la roca no es lo suficientemente competente para el uso de los grippers, se puede utilizar como un escudo sencillo hasta alcanzar mejores condiciones de la roca.

En los 2 escudos, sencillo y doble, todo el tiempo el personal se mantiene resguardado, ya sea mediante el escudo o mediante las dovelas que se van colocando en la parte trasera de la máquina.

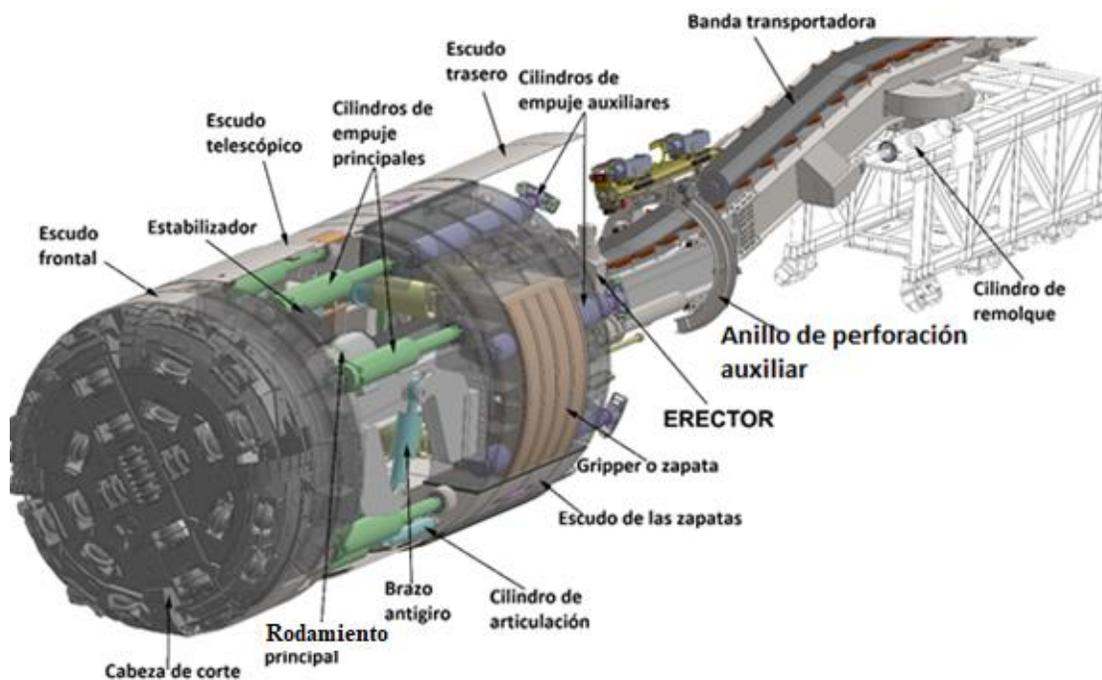


Figura 2.13 Escudo doble, (tunnelpro.it/es/double-shield-tbm)

Una comparación entre los diferentes métodos de excavación en roca se muestra en la tabla 2.5, comparando el método convencional (perforación y voladura) con los métodos mecanizados.

Factor	P & V	TBM	Rozadora
Resistencia de la roca	Cualquiera - No arcilla	60 - 110 Mpa	200 Mpa
Pendiente de trabajo	Cualquiera	15% / -15%	15% / -15%
Tiempo de preparación del sitio	Mínimo	3 a 12 meses	Mínimo
Almacenamiento de equipo	Uso y manejo de explosivos (Polvorín)	Patio más grande	Patio pequeño
Productividad	3 a 9 m/día (180 m/mes en 3 turnos)	Significativamente más veloz, 15 a 50 m/día (+450 m/mes)	4-8 m/día en función de la RCS de la roca
Forma del túnel	Cualquier forma	Circular	Cualquier forma
Longitud y profundidad requerida del túnel	Difícil en entornos de poca sobrecarga Sustancialmente más lento en accesos más largos túneles (más de 2 km)	No es comparable con P&V (túneles < de 2 km) Radio de giro mínimo de 30 m. Más rápido para túneles largos y rectos Se puede utilizar en sobrecargas bajas o altas	Cualquier longitud y profundidad, lo limita la RCS de la roca
Radio de curva	Cualquiera	>30m	>10m
Orientación del cuerpo mineral/Método de minado empleado	Se puede utilizar en cualquier orientación y forma	Mejor para usar con yacimientos profundos o largos	Generalmente para mantos o yacimientos con mayor extensión horizontal que vertical
Uso y manejo de residuos por la excavación	Se pueden reutilizar, pero la granulometría es muy variable, puede llegar a ser difícil por esta razón.	Se puede reutilizar, granulometría regular hace que sea fácil su manejo en bandas transportadoras	Se pueden reutilizar, su manejo se realiza a través de equipos auxiliares o banda transportadora
Medios para extraer la rezaga	Banda transportadora, vagones, camiones de acarreo, skips.	Banda transportadora, vagones	Mediante paletas y brazos recolectores hacia el centro y fuera del equipo
Vibración del terreno	Alta	Baja	Baja
Existencia de gases explosivos y/o peligrosos	Alta, se pueden mitigar	Baja, se pueden mitigar	Alta presencia de polvo, cuenta con agua a presión para mitigar
Personal en áreas de trabajo	Normalmente despobladas, áreas pobladas con restricciones	Poblado o despoblado	Poblados por el número de equipos requeridos
Mano de obra calificada	Requiere habilidades y certificaciones	Principalmente mecánicos, operadores certificados	Principalmente mecánicos, operadores certificados

Tabla 2.5 Comparación de métodos, Complemento de (The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining Ryan Grattias, 2014)

EQUIPOS DE EXCAVACIÓN MECANIZADA PARA OBRAS VERTICALES Y SEMIVIRTUALES

Como se mencionó anteriormente la minería subterránea cuenta con un gran número de obras, entre ellas podemos encontrar contrapozos, tiros, chimeneas, pozos de ventilación, etc.

La excavación convencional en este tipo de obras consta en perforar verticalmente y cargar con explosivos para realizar la voladura, actualmente, en algunas minas todavía se realizan este tipo de obras utilizando máquina de pierna, apoyándose de escaleras que son ancladas a la roca, otra variante de este método es utilizar plataformas trepadoras, ALIMAK, este equipo fue puesto en operación en 1957. Para utilizar este equipo es requerido un nivel inferior donde se instala el cuerpo principal de la ALIMAK, que consta de los motores de accionamiento, carril guía curvado y elementos auxiliares, todos accionados mediante aire comprimido, diésel o eléctricos, todo esto se fija a la roca mediante anclaje. En el contrapozo donde se está realizando la perforación, se encuentra una jaula junto a una plataforma de trabajo, que es donde el personal realiza las labores, las redes de aire y agua para el equipo de perforación se colocan paralelo a la guía curva de la máquina trepadora. El ciclo de trabajo en esta obra es el siguiente:

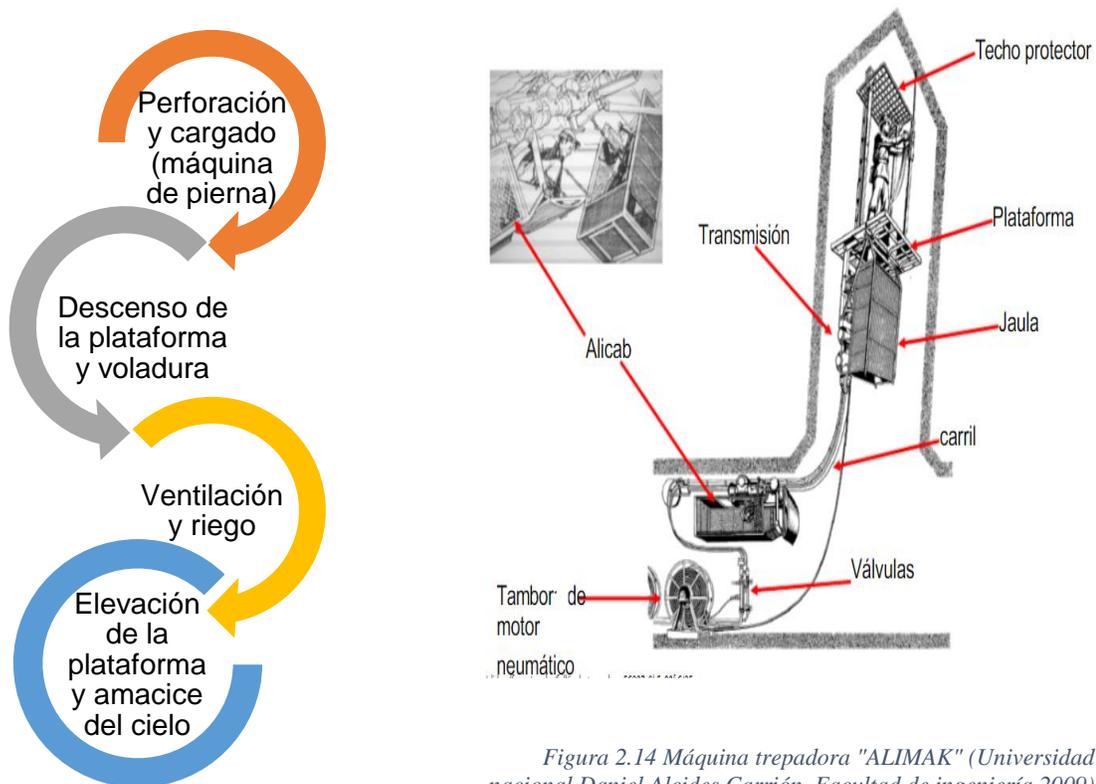


Figura 2.14 Máquina trepadora "ALIMAK" (Universidad nacional Daniel Alcides Carrión, Facultad de ingeniería 2009)

EQUIPOS DE EXCAVACIÓN RAISE BORING

Para satisfacer la necesidad de obras verticales o semiverticales con una mayor sección y longitud fueron implementados equipos de excavación mecanizada del tipo raise boring.

Este tipo de obras se puede clasificar según su orientación y funcionamiento del equipo

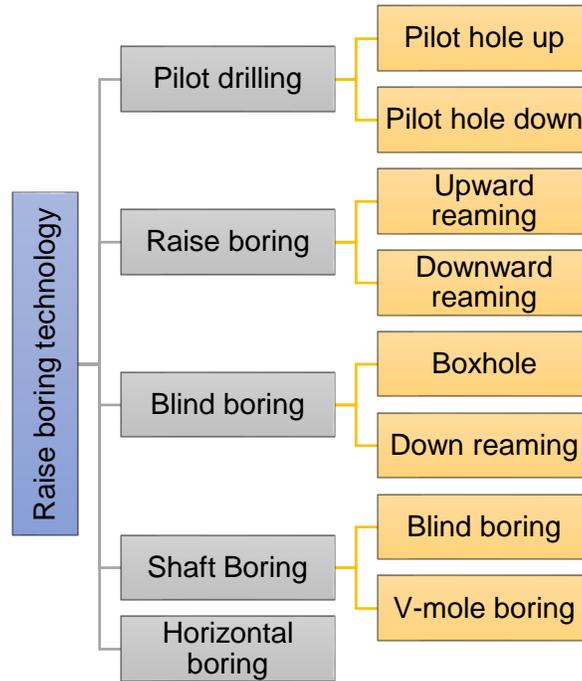


Figura 2.15 Clasificación de los equipos de excavación mecanizada en obras verticales

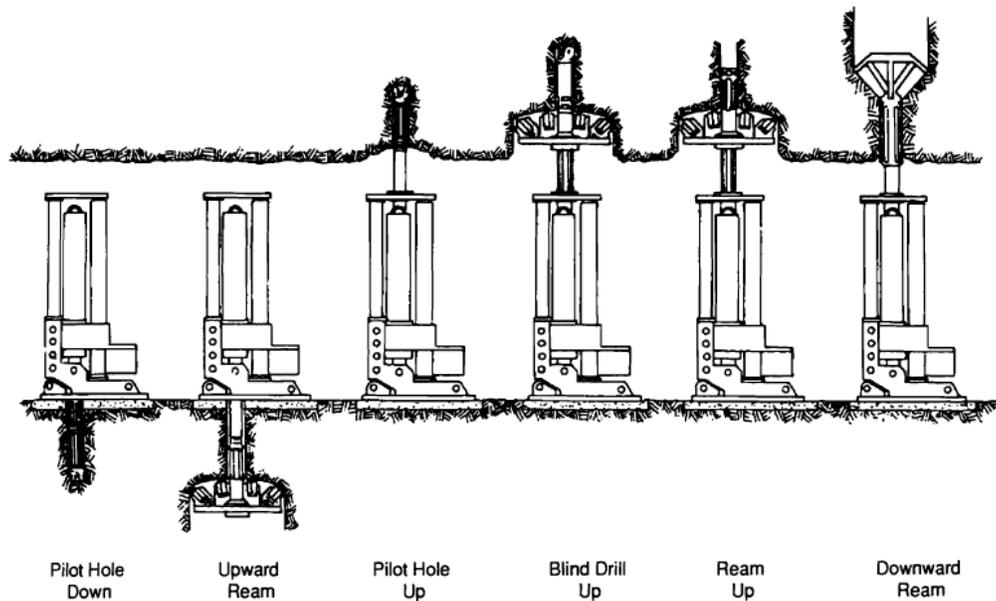


Figura 2.16 Métodos de rimado, (SME Handbook, 1992)

Para realizar este tipo de obras, las consideraciones geológicas y geotécnicas que enunciaron Sidea and Pfitzner (2012) son:

- *Litología*: características de las rocas, grado de meteorización y estratificación
- *Geología estructural del macizo*: fallas, pliegues, diques y contactos.
- *Fábrica de la roca*: discontinuidades, orientación, espaciamiento y persistencia.
- *Características de las discontinuidades*: Resistencia, rugosidad, relleno, alteración y contenido de agua.
- *Resistencia de la roca intacta y erosionada*, grado de meteorización.
- *Esfuerzos in situ*
- *Condiciones de agua subterráneas*

La estabilidad en este tipo de obras, puede considerarse estable cuando el diámetro de excavación es estrecho (<2m), cuando este diámetro es más ancho, algunas dificultades que se presentan en la excavación son:

- *Mecanismo de falla en cuñas por excavación*, esto puede ocurrir en cualquier momento y lugar de la excavación, si las cuñas son considerables y caen sobre la cabeza de corte pueden dañar los cortadores o la tubería, produciendo bajas tasas de excavación y desgaste prematuro, si el terreno, continua en deterioro es necesario añadir sostenimiento. (Fig. 2.17)
- *Derrumbe o cavidades en la roca*, se produce por cavidades dentro del macizo o por un terreno inadecuado para excavar con este método, se requiere un abordaje inmediato al problema.
- *Squeezing*, se presenta en obras muy profundas donde los esfuerzos son altos, el proceso puede ocurrir de manera rápida y puede ocasionar problemas en el rimado.
- *Hinchamiento del terreno*, este a diferencia del squeezing, se refiere a la mineralogía, se produce un cambio de volumen, generalmente en minerales que contienen arcillas.
- *Estallamiento de roca*, en roca más sana y con altos niveles de esfuerzos estos estallidos pueden golpear la cabeza de corte.
- *Deterioro asociado al tiempo*, este cambio ocurre principalmente por la humedad y la sensibilidad de los minerales en la roca a alterarse por la exposición de la roca, además puede deformarse por cambios en los esfuerzos debidos a minados aledaños.

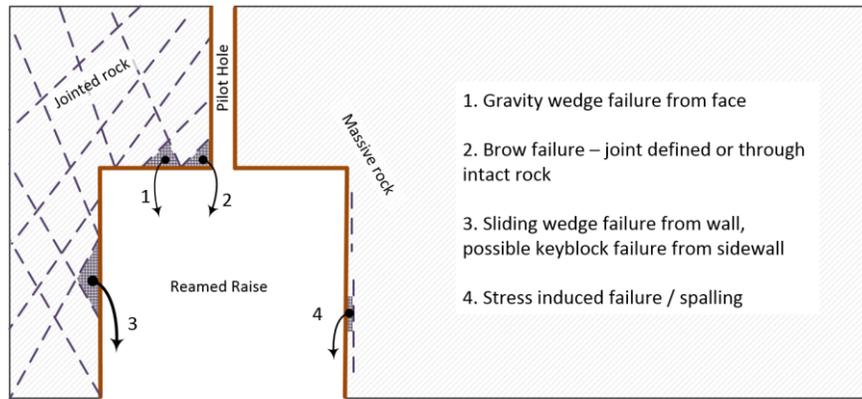


Figura 2.17 Mecanismos de falla en un contrapozo, (Underground Mining Technology 2017 – M Hudyma & Y Potvin)

Estos métodos a excepción de los métodos shaft boring utilizan como principal herramienta un equipo del tipo Raise Boring, o también conocidos en el ámbito minero como equipos robbins, esto por su origen y gran uso que se les ha dado en las obras mineras.

Los equipos raise boring a diferencia de los equipos TBM, jalan la cabeza de corte hacia la máquina, que los hace más eficiente que su variante en operación ciega que realiza un empuje hacia la roca que está excavando.

El principio mecánico de operación es el siguiente: (Fig. 2.18) La máquina contrapocera crea el torque y el empuje necesarios para que los cortadores de la cabeza rimadora penetren en el suelo para rimar.

1. Se realiza la perforación de un barreno piloto
2. La sarta de tubería formada por tubos y estabilizadores conecta la máquina contrapocera en superficie con la cabeza rimadora.
3. El terreno se rima con cortadores con dientes de carburo de tungsteno.
4. La cabeza rimadora agranda un barreno piloto previamente perforado. En condiciones de terreno sólido, el resultado es un rimado con paredes del pozo lisas que, en muchos casos, no necesitan ningún soporte adicional.

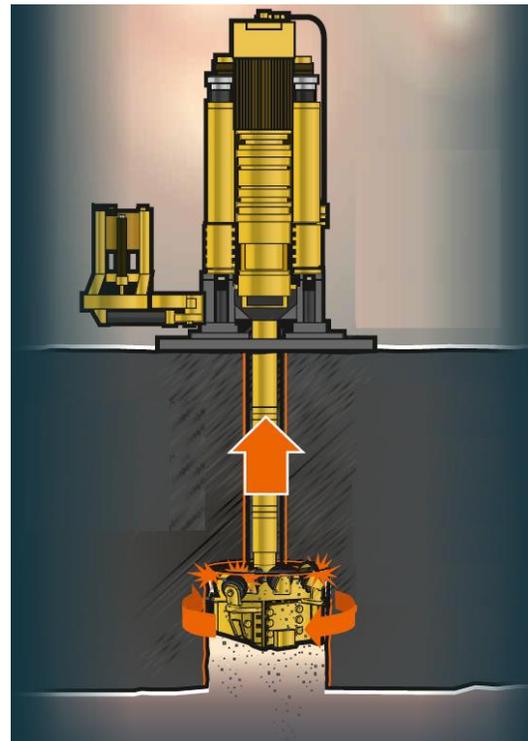


Figura 2.18 Funcionamiento máquina Raise Boring (Revista, Mining & Construction, Epiroc, pág. 23, 2020.)

Algunas especificaciones del equipo que se deben tomar en cuenta son:

1. Energía de trabajo
2. Tamaño y peso del equipo
3. Fuerza de empuje de barreno piloto
4. Fuerza de empuje de rimado
5. Torque de rimado
6. Velocidad de barreno piloto
7. Velocidad de rimado
8. Transporte del equipo
9. Consumo de aire
10. Consumo de agua

PILOT DRILLING

En minería subterránea el barreno piloto, puede llegar a ser muy utilizado, para comunicar 2 niveles y pasar a través de estas perforaciones, tuberías de servicios, agua, aire, electricidad, etc., también se utiliza como un medio de desagüe, para conducir el agua hacia lugares deseados de la mina.



El barreno piloto es el primer paso que para realizar un rimado, ya sea descendente o ascendente, los barrenos tienen un diámetro de perforación variable, este va de los 150mm hasta los 350mm, puede llegar a ser expandible con escariadores de barrenos pilotos (fig. 2.19), estos se unen a las tuberías, a través de un vástago, el diámetro de excavación puede alcanzar los 700 mm, con longitudes de 200m.

Figura 2.19 Escariador de piloto (EPIROC)

El barreno piloto se realiza a través de una broca tricónica, Su característica principal es la presencia de conos que giran alrededor de sus ejes a medida que la broca lo hace sobre el fondo. Los dientes que utilizan estas brocas, dependen del tipo de roca o suelo a excavar, para terreno blando, se utilizan dientes largos, para roca dura se utilizan cortos, estos injertos o dientes son de acero o carburo de tungsteno.

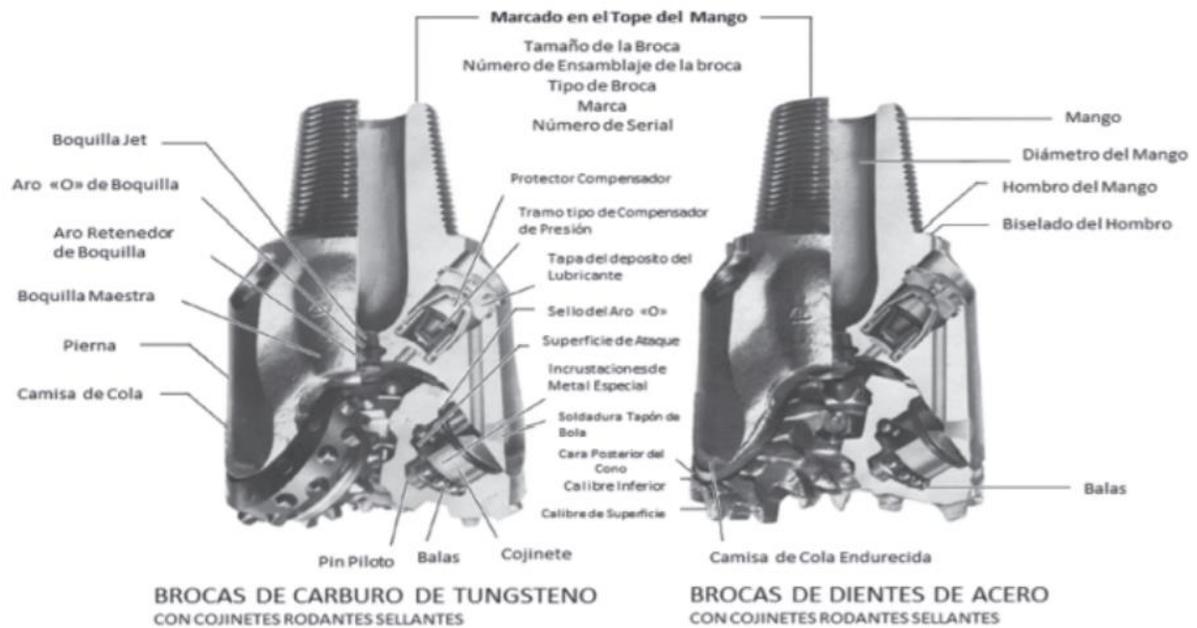


Figura 2.20 Brocas tricónica, (well engineers notebook, 2nd Edition, (2001). Shell international exploration and production B.V. EP Learning and Development)

RAISE BORING

El método raise boring o rimado convencional, es aquel que cuando se realiza el barreno piloto y alcanza un determinado nivel, una rima con cortadores es colocada en lugar de la broca tricónica y comienza el rimado, esta puede ser de un nivel inferior a uno superior (Upward reaming) o en sentido contrario (Downward reaming), la cavidad previamente excavada por el barreno piloto es utilizada como conducto para disponer de la rezaga, en ambos casos esta misma caerá por efecto de la gravedad al nivel inferior, donde un equipo de rezagado se ocupará del manejo, dentro de la operación esta acción es una actividad de alto riesgo, debido a:

1. Riesgo de que la rima se desacople de la tubería y pueda caer al nivel de rezagado
2. Si el conducto que se encuentra excavando se llena de material y existe presencia de agua existe el riesgo que se acumule una gran cantidad de agua en el mismo, poniendo en riesgo al operador y actividades aledañas al momento de liberar la cavidad.
3. Zonas de falla o debilidad pueden provocar desprendimientos de roca e impactar o enterrar al equipo de rezagado.

Por lo que es recomendable que esta actividad sea realizada por personal capacitado y con experiencia en estas obras, algunas actividades que pueden realizar para disminuir estos riesgos son:

1. Nunca dejar que la cavidad se ahogue con material excavado
2. Dejar una pequeña ventana en la cavidad, para que pueda fluir el agua y las rocas que puedan llegar a caer, no tengan modo de caer hacia el equipo de rezagado.
3. Señalizar que este tipo de obras está siendo llevada a cabo.

La decisión si el rimado se realiza desde arriba o abajo, depende generalmente del punto de acceso de la mina, la compatibilidad de dimensiones de la obra y requerimientos de servicio más próximos.

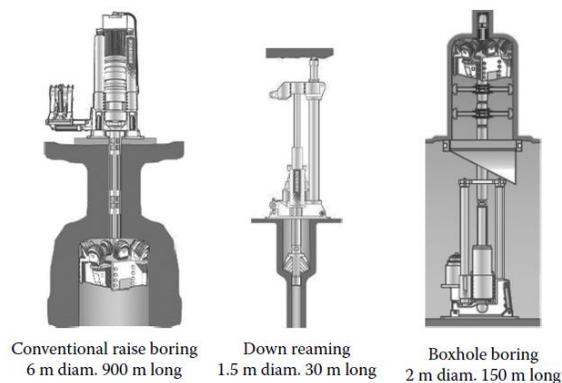


Figura 2.21 Método convencional, down reaming, boxhole, fuente (Mechanical excavation in mining and civil industries, Nuh Bilgin, et. al. 2014)

En la actualidad, debido a la gran cantidad de obras de este tipo y distancias que deben recorrer los equipos, se ha diseñado un equipo que cuenta con las mismas características que los rimados convencionales y rimado en modo ciego, pero con la versatilidad que se encuentra sobre neumáticos, tiene el cuerpo articulado, basado en un jumbo o un cargador de bajo perfil, es operado desde el equipo de transporte o puede acoplarse un mando a distancia. Cuenta con un chute en la parte superior del cuerpo de la excavadora para operar en modo Box-Hole, también puede trabajar en modo ciego con rimado hacia abajo, requiere un barreno piloto por delante y una escariadora atrás para poder realizar el transporte del material excavado.



Figura 2.22 Equipo Easer L, desarrollado por EPIROC (Fuente: <https://www.epiroc.com/es-mx/products/raiseboring>)

BOXHOLE

Esta tecnología fue desarrollada por Herrenknecht, está basada en el método Pipe Jacking (fig. 2.23), este es una variante del rimado convencional, ya que este se realiza en modo ciego, sin un barreno piloto conectado a un nivel superior, es utilizado cuando no se tiene una obra superior a la cual llegar o cuando no es posible trabajar en dicho nivel, una vez que el equipo comienza el rimado y alcanza una cierta distancia, misma que la de una tubería, se detiene el rimado y se acopla una tubería más, esta tiene una característica que consta de un conducto interno donde la rezaga es transportada por gravedad hacía un chute fuera del equipo principal, donde posteriormente será rezagado, este modo de operación es más rápido y eficiente para obras relativamente cortas (70 m).

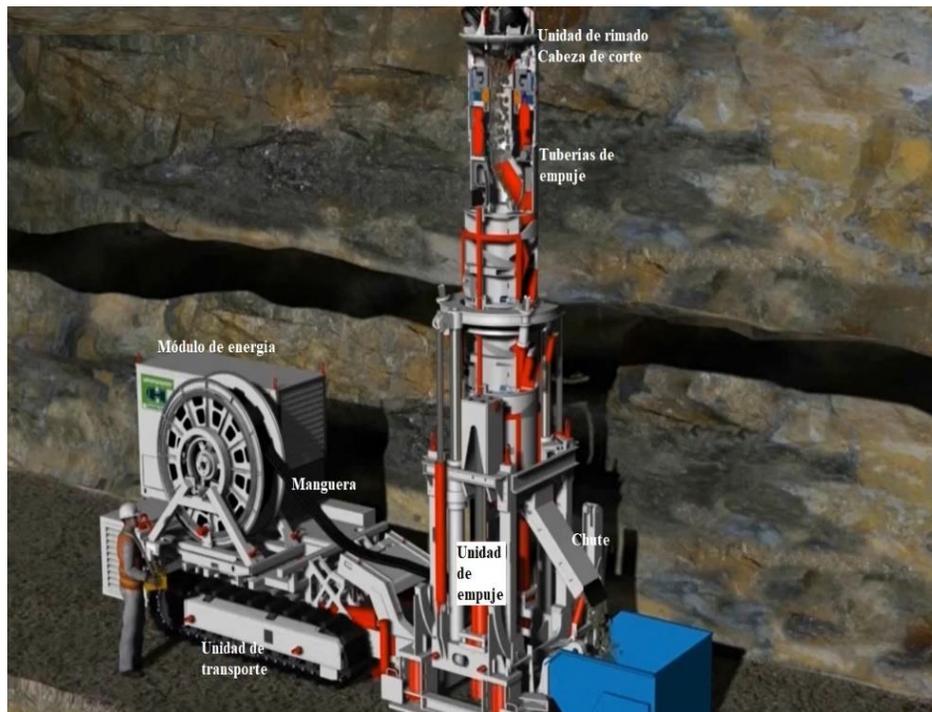


Figura 2.23 Equipo BBM (Boxhole boring machine) (Fuente: <https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/boxhole-boring-machine-bbm/>)

La tabla siguiente muestra una recopilación de información técnica sobre 3 diferentes equipos de la compañía Terratec, que pueden realizar los métodos de excavación previamente descritos, se puede observar que el método raise boring convencional es el que proporciona un mayor diámetro en un mismo equipo, a su vez es el método que más empuje [kN] tiene, debido a que la unidad de empuje o la torre principal jala la rima y no la empuja, a su vez el torque en el rimado del barreno piloto es menor al rimado de la sección completa, y la velocidad de rotación aumenta debido al mismo y disminuye a mayor diámetro.

		UB SERIES	TDR SERIES	TR SERIES
		UB-1000	TDR-2000	TR 4000
Diámetro máximo [mm]	Raise boring	1,500	2,400	4,000
	Down reaming	1,060	1,800	-
	Boxhole	1,060	-	-
Profundidad excavación [m]	Raise boring	200	250	500
	Down reaming	200	250	-
	Boxhole	200	-	-
Diámetro piloto [mm]	Broca	279	279	349
Energía [kW]	Consumo	121	242	450
Torque [Nm]	Perforación piloto	11,700	31,000	78,000
	Rimado nominal	61,000	175,000	373,000
	Rimado máximo	73,000	203,000	475,000
Velocidad de rotación [rpm]	Perforación piloto	0-80	0-60	0-42
	Rimado	0-16	0-14	0-10
Empuje [kN]	Down reaming	1,100	1,647	1,600
	Up reaming	1,100	3,100	6,700
Ángulo de trabajo [°]	Desde la vertical	0°-30°	0°-30°	0°-30°
Dimensión máxima [mm]	Altura	4,392	4,650	4,600
Peso del equipo [kg]	Solo cuerpo central	14,000	19,350	21,000

Tabla 2.6 Datos técnicos equipos de excavación Terratec (Fuente: <http://www.terratec.co/files/TERRATEC-RBM-Brochure.pdf>)

SHAFT BORING

Una de las operaciones más difíciles y lentas en la minería es la excavación de tiros por método convencional (P&V), se desarrolló tecnología para hacer de esta tarea excavaciones más estables y más seguras operativamente.

Estos equipos de excavación mecanizada se refieren diámetros o secciones referentes a tiros mineros, por lo que los equipos que se mencionan a continuación son utilizados únicamente en excavación de tiros, no se consideran los equipos del tipo raise boring convencional, aunque algunos de estos tengan la capacidad de excavar secciones considerables para ser tiros. Todos estos equipos se apoyan de un castillo y un winche para sostenerse, y ser extraídos al final de la operación.

BLIND BORING

Como anteriormente se describió la excavación tipo ciega es aquella que no cuenta con un barreno piloto o tiene alguna ranura previamente excavada para transporte de la rezaga, debido a que la geología es un factor determinante para la elección del equipo se describen a continuación equipos para diferentes tipos de roca.

SHAFT BORING ROADHEADER (SBR)

Este equipo utiliza en la cabeza de corte picas como medio de desgarre de la roca, cuenta con un sistema para soportar la pared del tiro, mediante anclaje y concreto lanzado, este equipo también puede ser utilizado en la variante shaft sinking boring, donde la excavación puede ser llenada de fluido estabilizador parcial o totalmente.

Las características de este equipo son:

- Roca blanda y media (<120 Mpa)
- Diámetro de excavación: 7-12 m
- Peso del equipo: 320 t
- Altura del equipo: 45m
- Profundidad de excavación: 1000m
- Sistema de acarreo: neumático, en forma de lodo a través de tuberías, skips o sistema de canalones.
- Tasa de avance: 3-6 m/d
- Unidad de soporte de roca
- Potencia cabeza de corte: 600 kW
- Giro de la cabeza de corte: 90 rpm

Figura 2.24 Shaft boring Roadheader (SBR)
fuente(<https://www.herrenknecht.com/en/products/productdetail/shaft-boring-roadheader-sbr/>)



El ciclo de corte en este equipo es el siguiente: (Fig. 2.25)

1. Realiza una rebanada a las 12 en punto
2. Regresa hacia el centro
3. Gira unos cuantos grados en sentido horario
4. Realiza el siguiente corte
5. Continúa girando hasta regresar a la posición inicial (12 en punto)
6. Se extiende el brazo de corte
7. Reinicia el ciclo de corte
8. Cuando 1m de profundidad es excavado, el SBR baja totalmente 1 m y el ciclo de corte se reinicia.

Posición inicial
del ciclo de
excavación

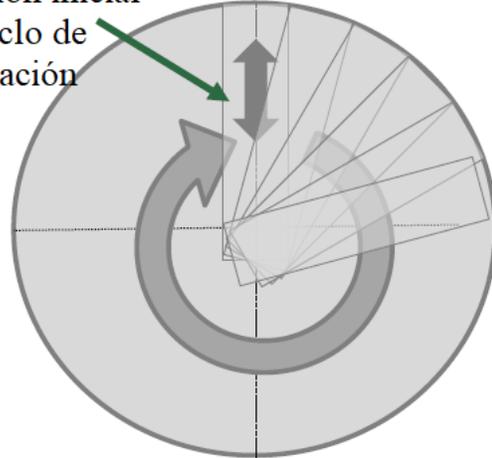


Figura 2.25 Ciclo de excavación SBR fuente (WEBINAR ITA, Herrenknecht Mining, Pioneering Underground Technologies Mechanied Shaft & Raise Excavation, Patrick Rennkamp, 2020)

SHAFT BORING MACHINE (SBM)

Uno de los equipos dentro de la gama del vertical boring machine (VBM), es la máquina shaft boring machine, el principio de funcionamiento es muy similar al de un TBM de viga principal, con algunas diferencias, el primero trabaja en sentido vertical para la realización de tiros, como su nombre lo indica.

Para realizar la excavación, este equipo cuenta con discos cortadores como medio de desgarre de la roca, cuenta con una cabeza de corte similar a la de una TBM para roca, la cabeza de corte puede girar sobre su propio eje y sobre un eje paralelo al equipo principal, como si se tratase de una moneda girando sobre una mesa, este equipo realiza una rebanada en sentido descendente, apoyándose de los grippers que presionan contra la roca, una vez que es excavada los gatos de empuje se retraen, los estabilizadores empujan en cierta medida contra el terreno y la cabeza de corte comienza la excavación completa de la sección, realizando 2 movimientos combinados(Fig. 2.26), (1) rotando sobre un eje paralelo al equipo y (2) movimiento circular que gira sobre el eje de la cabeza de corte, perpendicular al cuerpo del equipo. Cuando la cabeza de corte gira sobre su propio eje, acarrea la rezaga mediante rastreles que llevan los chips o rezaga a través de canalones, cuando estos llegan a un chute para ser llevados mediante canalones al sistema de extracción.

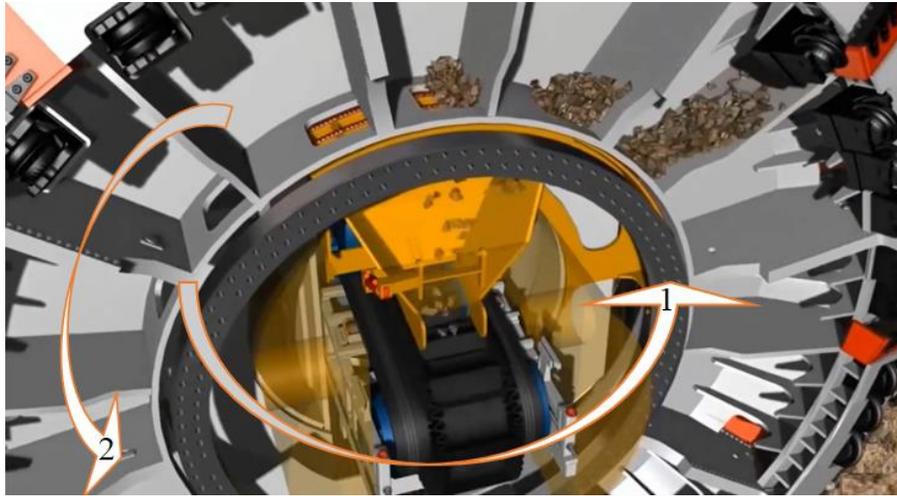


Figura 2.26 Giros de la cabeza de corte SBM (Op. Cit.)

Las características de este equipo son:

- Roca dura (120-280 Mpa)
- Diámetro de excavación: 10-12 m
- Peso del equipo: 2,800 t
- Altura del equipo: 60m
- Profundidad de excavación: 2000m
- Sistema de acarreo: a través de canalones verticales
- Tasa de avance, 10-11 m/d
- Unidad de soporte de roca
- Perforadoras para anclaje L=3m

Este equipo altamente mecanizado fue desarrollado por los ingenieros de Herrenknecht en conjunto con la empresa minera Rio Tinto, cuenta con un alto sistema de mecanización para soporte del terreno excavado, cuenta con robots lanzadores de concreto lanzado, que operan de forma simultánea a la excavación, y pueden proyectar concreto lanzado a toda la zona excavada sin excepción, para poder realizar esta actividad, cuenta con 2 brazos robóticos, posicionados 1 en cada lado y cerca de la cabeza de corte.

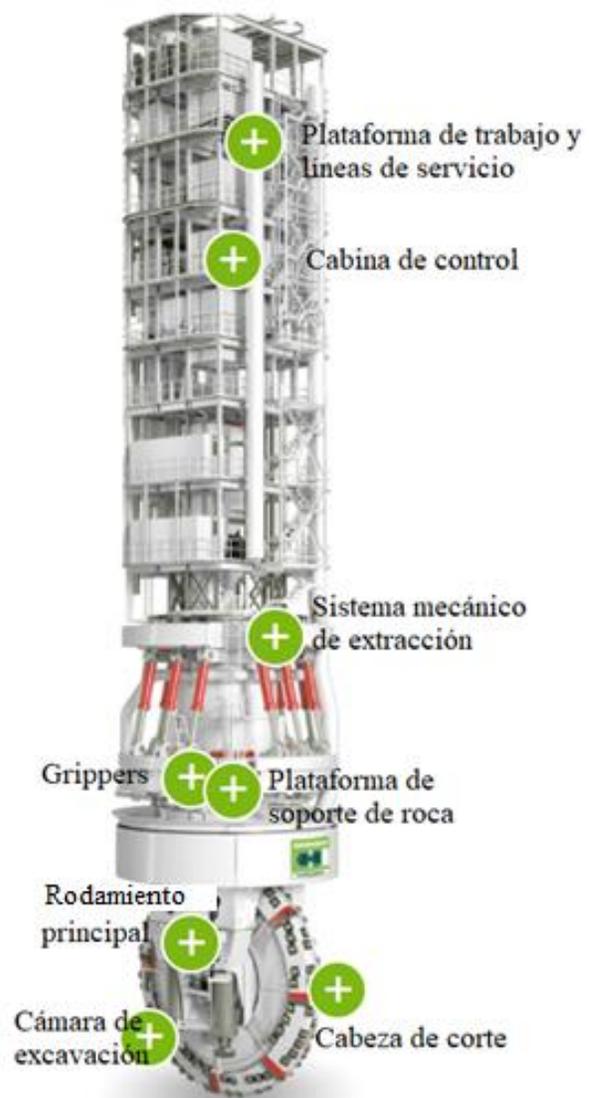


Figura 2.27 Shaft boring machine Ibid.

SHAFT BORING CUTTERHEAD (SBC)

Este equipo, de igual manera a los 2 anteriores, trabaja en modo ciego, fue desarrollado, para realizar la excavación de tiros en roca, a través de una cabeza de corte en forma cónica, con discos cortadores como medios de desgarre, la excavación, a diferencia de los anteriores equipos se realiza con la cámara de excavación inundada, este fluido no necesariamente se utiliza como medio de soporte de las paredes del tiro excavado, principalmente es utilizado en forma de lodo, como medio de transporte para extraer el material excavado. (Fig. 2.28)

Dependiendo de la geología, este equipo puede excavar con tasas de 1cm/min, el lodo bombeado dentro del equipo hacia una planta de separación de sólidos, finos y gruesos. El material grueso es separado y llevado hacia un sistema de botas para ser extraído con sistema de poleas, el material fino es bombeado a superficie para un tratamiento para separarlo del líquido. Tiene la flexibilidad de adaptar la plataforma de soporte de roca con diferentes equipos, según la necesidad del proyecto.

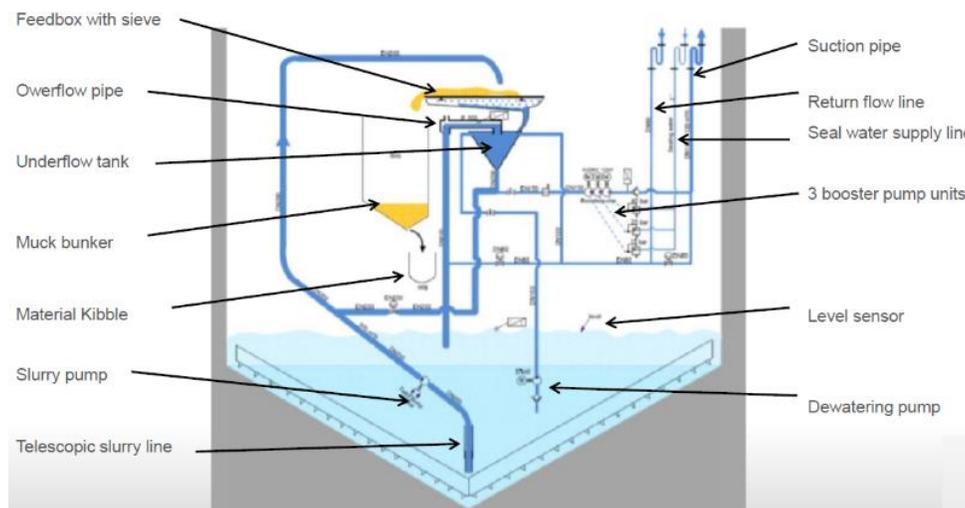


Figura 2.28 Sistema de bombeo SBC (Op. Cit.)

Las características de este equipo son:

- Roca (~200 Mpa)
- Diámetro de excavación: 8.1-8.6 m
- Peso del equipo: 350 t
- Altura del equipo: 35m
- Profundidad de excavación: 1000m
- Sistema de acarreo: lodos en tubería
- Tasa de avance, 3-6 m/d
- Unidad de soporte de roca
- Velocidad de la cabeza de corte: 2-3.5 rpm
- Cortes de 1m de profundidad

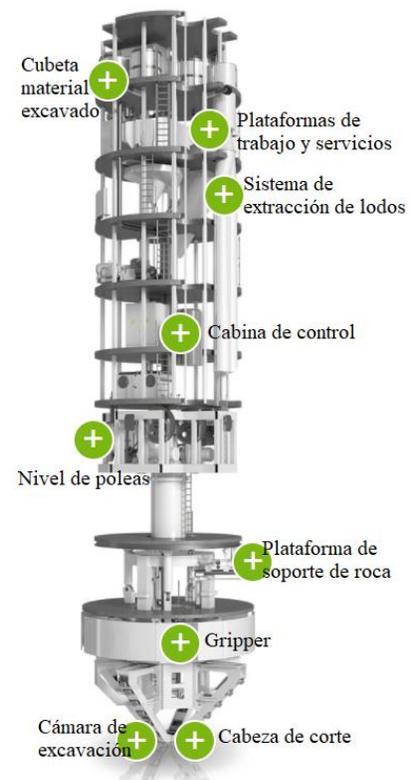


Figura 2.29 Shaft boring Cutterhead (SBC) Op. Cit.

V-MOLE SHAFT BORING

Este método, consiste en un rimado vertical descendente, este tipo de excavación a diferencia de las excavaciones en modo ciego, donde no se tiene una obra excavada con anterioridad, utiliza un barreno piloto que funciona como guía del equipo y como sistema de extracción por gravedad hacia una obra inferior, donde el material excavado será extraído con cargadores de bajo perfil, hacia equipos de acarreo o hacia tiros para ser mantenido a la superficie, o disponer de este material dentro de la mina.

El barreno piloto tiene un diámetro de 1.5 – 2.0 m de diámetro, es excavado por un equipo auxiliar tipo Raise boring, una vez que el barreno piloto es excavado en su totalidad, se realiza una excavación auxiliar para poder colocar los grippers en dicha excavación y comenzar el rimado para ensanchar el barreno piloto al máximo deseado.

La máxima profundidad que se puede excavar con este método está limitada únicamente por la profundidad del barreno piloto con su respectiva obra en un nivel inferior.

Este método utiliza un equipo similar a una TBM de viga principal pero posicionada de forma vertical, utiliza un sistema de 8 grippers para proporcionar el empuje a la cabeza de corte, esta tiene forma cónica, y cuenta con discos de corte. El arreglo común y sus partes principales para este tipo de equipos. (Fig. 1.12)

SHAFT BORING EXTENSIÓN MACHINE (SBE)

Herrenknecht continuó el desarrollo y mejora de esta tecnología y el resultado fue el Shaft Boring Extension Machine (SBE), donde puede utilizar barrenos piloto con un diámetro mayor. En su sistema de soporte puede utilizar anclaje con perforadoras hidroeléctricas, equipo para enmallado y concreto lanzado robotizado, si es necesario puede utilizar cimbras para colocar concreto para un revestimiento final del tiro.

Las características de este equipo son:

- Roca (~200 Mpa)
- Diámetro de excavación: 7.5-9.0 m
- Peso del equipo: 350 t
- Altura del equipo: 18m
- Profundidad de excavación: 3000m
- Sistema de acarreo: Gravedad, barreno piloto pre-excavado
- Tasa de avance, 6-10 m/d
- Unidad de soporte de roca, puede realizar soporte a la par de la excavación
- Cortes de 1m de profundidad

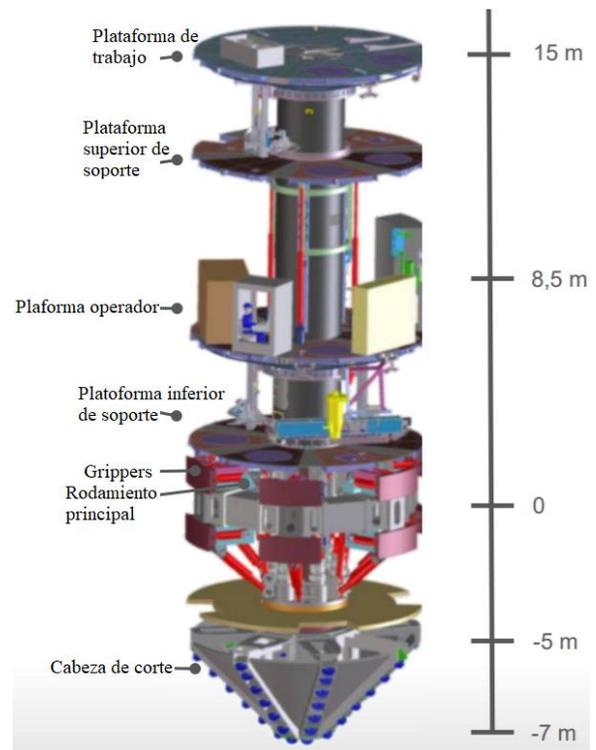


Figura 2.30 Shaft Boring Extension Machine (SBE) op. cit.

HORIZONTAL BORING

Esta variante es utilizada cuando se requiere conectar un nivel cercano a otro, o se desea llevar servicios de un nivel de la mina a otro, puede ser ventilación, tuberías de agua, aire, energía, etc.

Este rimado se lleva a cabo con un equipo raise boring que pueda trabajar en esta posición y el mecanismo empleado es el mismo que para un raise boring convencional o un pilot drilling. (Fig. 2.31)

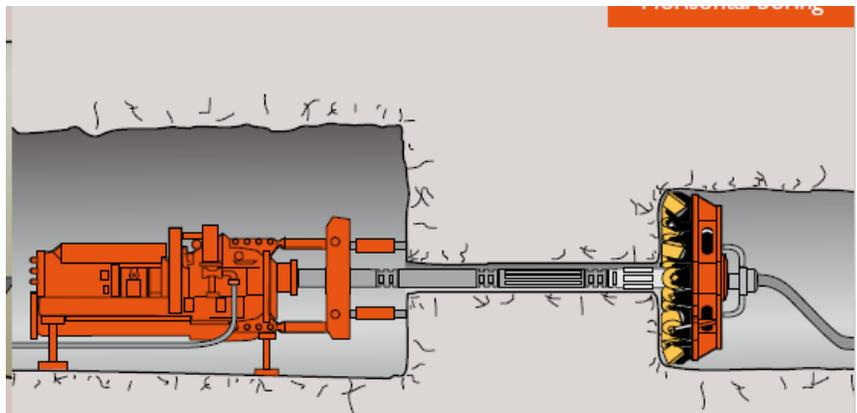


Figura 2.31 Horizontal boring. (Raise boring equipment, brouche, Sandvik)

3. TBM'S EN MINERÍA SUBTERRÁNEA – ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

Las máquinas TBM se han utilizado en la construcción de muchos túneles para proyectos mineros, con varios usos o propósitos, como son accesos, transporte de mineral o material estéril, drenaje, exploración, suministro y desvío de agua. Muchos proyectos mineros han visto los beneficios económicos y operacionales de utilizar máquinas TBM, y hay una creciente conciencia del uso de estos equipos en minería. Algunas consideraciones clave para el uso de equipo TBM en minería son:

1. *Geología*
 - a. Tipo de roca
 - b. Alteración
 - c. Resistencia de la roca
 - d. Abrasividad de la roca
 - e. Durabilidad
 - f. Condiciones de agua
2. *Profundidad/Esfuerzos*
 - a. Esfuerzos producidos por la columna litostática
 - b. Condición de esfuerzos in situ
 - c. Squeezing
 - d. Estallido de roca
3. *Acceso al sitio*
 - a. Limitaciones por los caminos hacia la ubicación de mina (difícil acceso)
4. *Requerimientos para lanzar TBM*
 - a. Evaluar las obras necesarias para preparar la TBM (cámara de montaje)
 - b. Riesgo de inestabilidad en estas obras
5. *Alineamiento e inclinación del túnel*
 - a. Se recomienda una pendiente máxima de 3%, requerimientos especiales de la TBM si se supera esta pendiente.
 - b. Radios mínimos de curvatura entre 200-350 m
 - c. Se debe planear para evitar zonas de roca con pobre calidad, evitar intersección de zonas de falla importantes (si no es posible evitar estas zonas tener en cuenta para adecuar la TBM y revisar las condiciones de estabilidad)
 - d. Casos especiales donde se puede utilizar la TBM con ángulos de inclinación de 45° (Plantas hidroeléctricas) (Fig. 3.1)
6. *Experiencia del contratista en obras similares*
7. *Programa de obra*
 - a. Para el uso de TBM se debe planear con tiempo de anticipación (mínimo entre 12-14 meses) para no retrasar la excavación del túnel.
8. *Tamaño mínimo de TBM*
 - a. En minería se debe utilizar una TBM que no sobredimensione las obras, elegir la dimensión de la TBM en función de la obra a realizar

- b. Diámetros de 4 m se consideran óptimos para la colocación del sostenimiento en condiciones de roca de baja calidad.
9. *Sostenimiento y revestimiento*
- a. Se debe seleccionar con criterios de la condición de la roca
 - b. Función del tipo de obra
 - c. Seleccionar entre la gran variedad de productos que ofrece el mercado actual
 - d. Espesor del revestimiento
 - e. Si la obra se considera mayor a 40 años se puede evaluar el uso de dovelas prefabricadas
10. *Disposición del material excavado (estéril)*
- a. Definir la disposición del material excavado con TBM
 - i. Relleno a interior mina
 - ii. Cama de roca para piso del túnel
 - iii. Terrero
 - b. Definir sistema de rezagado
 - i. Bandas transportadoras
 - ii. Góndolas
11. *Logística y servicios auxiliares*
- a. Las TBM son equipos que requiere gran cantidad de energía y servicios auxiliares
 - i. Energía
 - ii. Consumo de agua
 - iii. Consumo de aditivos
 - iv. Consumo de piezas de desgaste

En cuanto al programa de producción se refiere las TBM ofrecen un beneficio clave donde el tiempo es esencial en el desarrollo de la mina y alcanzar la explotación mineral lo antes posible. Para determinar si un equipo TBM es viable en un proyecto minero se deben realizar estudios exhaustivos para determinar las condiciones del terreno, si se decide continuar con uso de una tuneladora es necesario seleccionar el correcto tipo de máquina. Una evaluación exhaustiva debe ser realizada para anticipar las condiciones del terreno esto para terminar si es viable el uso de equipo TBM en minería.

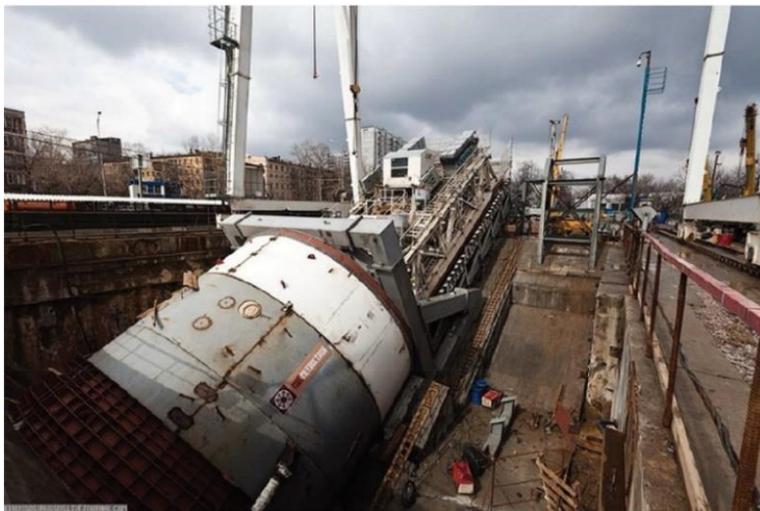


Figura 3.1 Arreglo para lanzamiento TBM pendiente negativa. (SME)

A diferencia de las consideraciones técnicas del uso de máquinas TBM en aplicaciones de ingeniería civil, en minería son un poco diferentes. Una de las consideraciones clave es que las condiciones del subsuelo en y alrededor de un proyecto minero comprenden lechos de roca muy alterada que representan condiciones que pueden plantear desafíos especiales para el uso de TBMs. El uso de tuneladoras para proyectos mineros no ha estado exento de desafíos. Cualquier percepción simplificada de que las tuneladoras no se pueden utilizar para proyectos mineros es falsa, ya que está sujeta a riesgo geológico.



Figura 3.2 Cámara de montaje Minas los Bronces, Chile.

MÉTODOS DE ACCESO

Se accede a los cuerpos minerales subterráneos mediante tiros y rampas. Los métodos principales para acceder a los yacimientos subterráneos son principalmente la perforación y voladura, las máquinas de excavación de tiros y las TBM subsecuentemente. Los yacimientos minerales se encuentran en una variedad de geometrías, extensiones y profundidades. La profundidad y el tipo de formación, así como el tipo y la calidad del material que se extraerá determinan el método en el que se extrae el mineral. Estos y otros Los factores también juegan un papel importante en la determinación de forma más rentable y eficiente de acceder al cuerpo mineral en sí.

En la tabla 3.1 se muestran los factores a considerar entre utilizar el método convencional y el uso mecanizado utilizando TBM's.

Factor	P&V	TBM
Tiempo de preparación del sitio	Mínimo	3 a 12 meses
Almacenamiento de equipo	Uso y manejo de explosivos (Polvorín)	Patio más grande
Productividad	3 a 9 m/día (180 m/mes en 3 turnos)	Significativamente más veloz, 15 a 50 m/día (+450 m/mes)
Forma del túnel	Cualquier forma	Circular
Longitud y profundidad requerida del túnel	Difícil en entornos de poca sobrecarga Sustancialmente más lento en accesos más largos túneles (más de 2 km)	No es comparable a la perforación y voladura (túneles menos de 2 km) Radio de giro mínimo de 30 m Más rápido para túneles largos y rectos Se puede utilizar en sobrecargas bajas o altas
Orientación del cuerpo mineral/Método de minado empleado	Se puede utilizar en cualquier orientación y forma	Mejor para usar con yacimientos profundos o largos
Uso y manejo de residuos por la excavación	Se pueden reutilizar, pero la granulometría es muy variable, puede llegar a ser difícil por esta razón.	Se pueden reutilizar, tamaño contante de los chips. Granulometría regular hace que sea fácil su manejo en bandas transportadoras
Medios para extraer la rezaga	Banda transportadora, vagones, camiones de acarreo, skips.	Banda transportadora, vagones
Vibración del terreno	Alta	Baja
Existencia de gases explosivos y/o peligrosos	Alta, se pueden mitigar	Baja, se pueden mitigar
Personal en áreas de trabajo	Normalmente despobladas, áreas pobladas con restricciones	Poblado o despoblado
Mano de obra calificada	Requiere habilidades y certificaciones	Principalmente mecánicos, operadores certificados

Tabla 3.1 Comparación de diferentes factores entre P&V y TBM en minería (Ryan Gratias, Op. Cit.)

COMPARACIÓN DE MÉTODOS MINEROS PARA ACCEDER A UN CUERPO MINERAL PROFUNDO

Para ejemplificar una posible selección de método de excavación entre TBM y perforación y voladura se supone un yacimiento metálico que se encuentra a 750 m de profundidad, este tiene una geología ígnea con rocas encajonantes con resistencias a la compresión simple mayores a 100 Mpa, en este yacimiento ya se encuentra una mina en operación, se requiere otro acceso para extender la vida útil de la mina, Suponiendo que se requiere un túnel con una pendiente del 15% negativa, el túnel deberá tener aproximadamente 5 km de longitud. Ya que hay una mina existente, hay una preparación mínima del sitio, se cuenta con cierta logística lo que permitirá que la excavación pueda comenzar en seis meses.

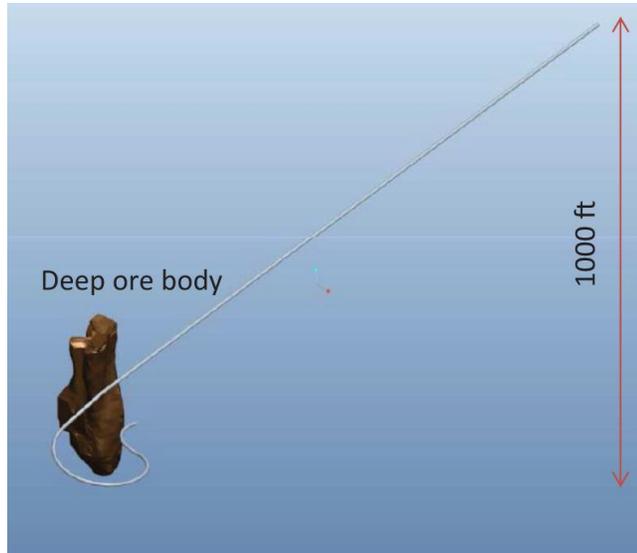


Figura 3.3 Acceso al yacimiento profundo (OZ Minerals, 2013)

ACCESO CON PERFORACIÓN Y VOLADURA (P&V)

El método P&V se puede movilizar con bastante rapidez, comenzando inmediatamente después de que se complete la preparación del sitio y puede excavar giros de radio corto en túneles. Sin embargo, la longitud del túnel de 5 km expone la principal desventaja de este método: la tasa de avance. La excavación La tasa de una operación de perforación y voladura puede promediar hasta 6 m por día (Tarkoy y Byram, 1991). Asumiendo esta tasa y suponiendo 6 meses para la preparación del sitio:

$$t = \frac{5000m}{6 \frac{m}{día}} = 833 \text{ días} \quad (3.1)$$

$$\frac{833 \text{ días}}{365 \frac{días}{año}} = 2.2 \text{ años} \quad (3.2)$$

$$t = 2.2 \text{ años de excavación} + 6 \text{ meses de preparación} = 2.7 \text{ años} \quad (3.3)$$

Se puede apreciar que el tiempo que se requiere para realizar esta obra es de aproximadamente 3 años, aunque se inicia el proceso en un tiempo relativamente corto la tasa de excavación o la productividad llegan a ser la principal desventaja ante una TBM como se muestra a continuación.

A través de décadas de experiencia en túneles alrededor del mundo, se ha observado que, en túneles de más de 4 km de longitud, las tuneladoras son las tuneladoras más eficaces método (Fig. 3.4).

En comparación con los métodos P&V, las tuneladoras tienen muchas ventajas. Las tuneladoras son una forma más automatizada de construcción, requiriendo menos trabajadores. Ha sido demostrado que se necesita menos apoyo en tierra en comparación con P&V.

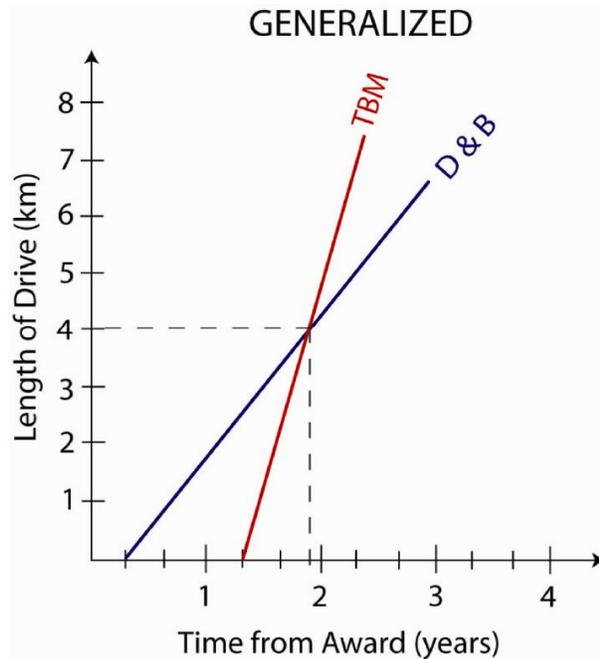


Figura 3.4 Comparación de métodos TBM. P&V. Ibid.

Esto se puede atribuir al perfil de excavación que produce la TBM. El uso de mecanismos de soporte del terreno también varía ampliamente para las tuneladoras, desde malla electrosoldada, perfiles de acero, anclas y utilizando el sistema de apoyo McNally. Toda la instalación de estos elementos se realiza desde dentro del escudo de la máquina, junto con la ausencia de explosivos, hace la excavación con tuneladora un método más seguro.

El tiempo es la principal ventaja y desventaja de las tuneladoras. La ventaja viene en la forma de la tasa de avance mientras que la desventaja se debe al tiempo de entrega/ensamble. Las tasas de producción promedio de las TBM son de 20 m por día. Por lo tanto:

$$t = \frac{5000m}{20 \frac{m}{\text{día}}} = 250 \text{ días} \quad (3.4)$$

Sin embargo, la entrega y la configuración para una nueva tuneladora personalizada es de aproximadamente 1 año. Esto significa que la tuneladora comenzará seis meses después las operaciones de P&V lo harían.

$$t = 250 \text{ días} + 365 \text{ días} = 615 \text{ días} \quad (3.5)$$

A pesar de los seis meses de ventaja sobre la TBM, el uso de una tuneladora seguirá superando a P&V hasta el final por casi un año (615 días en comparación a 986 días con P&V). Además, una tuneladora se puede reutilizar, así que, si una operación minera fuera propietaria de una, entonces el tiempo de espera para la puesta en marcha podría reducirse de un año a un par de meses. La ventilación también es mucho mejor en los túneles TBM por el simple hecho de no utilizar equipos a diésel para realizar la extracción.

USO HISTORICO DE LAS TBM EN MINERÍA

A partir del año 1950 se ha utilizado exitosamente equipos TBM en túneles mineros, en la Tabla 3.2 se presenta una lista de algunos proyectos alrededor del mundo. El uso temprano de tuneladoras en las minas fue para túneles de exploración, donde había una necesidad de excavación rápida para completar la exploración y el otro uso fue de túneles de acceso como parte de las expansiones de la mina.

Proyecto	Locación	Año	Longitud (km)	Diámetro (m)
Step Rock Iron	Canadá	1957	0.3	2.74
Nachanga	Zambia	1970	3.2	3.65
Oak Grove	EUA	1977	0.2	7.4
Blyvoor	Sudáfrica	1977	0.3	1.84
Fosdalen	Noruega	1977	0.67	3.15
Blumenthal	Alemania	1979	10.6	6.5
Westfalen	Alemania	1979	12.7	6.1
Donkin Morien	Canadá	1984	3.6	7.6
Autlán	México	1985	1.8	3.6
Kiena	Canadá	1986	1.4	2.3
Stillwater EB	EUA	1988-91	6.4	4
Fraser (CUB)	Canadá	1989	1.5	2.1
Río Blanco	Chile	1992	11	5.7
San Manuel	EUA	1993	10.5	4.6
Cigar Lake	Canadá	1997	>20	4.5
Port Hedland	Australia	1998	1.3	5
Stillwater EB	EUA	1998-01	11.2	4.6
Mineral Creek	EUA	2001	4	6
Amplats	Sudáfrica	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	4.2
Stillwater Blitz	EUA	2012-13	6.8	5.5
Grosvenor Coal	Australia	2013	1	8
Oz Minerals	Australia	2013	11	5.8
Northparkes	Australia	2013	2	5
El Teniente	Chile	2014	6	10

Tabla 3.2 Uso de TBMs en proyectos mineros (Brox, 2013)

MINA SAN MANUEL

A principios de la década de los 90's, se utilizó una tuneladora para el desarrollo de más de 12 km de túneles en la Mina San Manuel, ubicada en Arizona. Se utilizó una tuneladora tipo viga principal abierta de 4,6 m de diámetro, se movió a través de un tiro y fue desde una cámara subterránea.

Se encontraron 2 cuerpos geológicos, El Kalamazoo y el San Manuel con origen ígneo intrusivo, con rocas como granodioritas, monzonitas y cuarzos presentes.

La estructura Kalamazoo, que es la parte inferior del cuerpo San Manuel estaba siendo desarrollado para minarse con el método de block caving o hundimiento por bloques con uso de bandas transportadoras en un nivel de acarreo (haulage level).

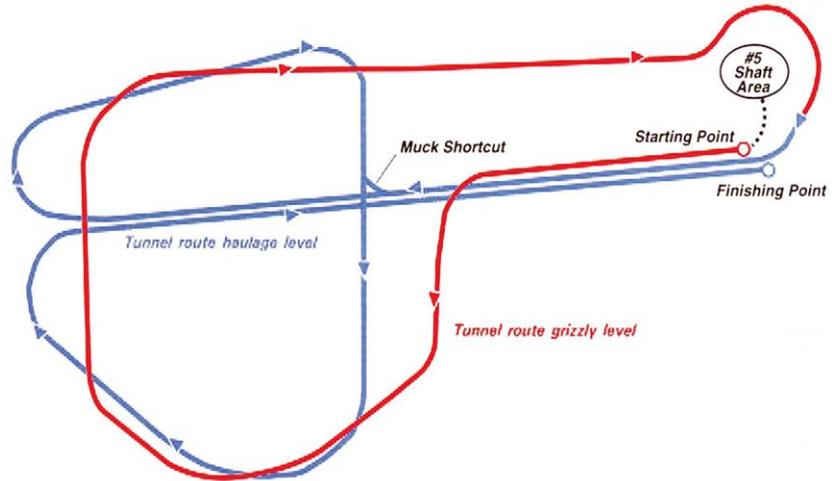


Figura 3.5 Desarrollo de la mina San Manuel (Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine Development, M. Cigla,)

Como se muestra en la Figura 3.5, el plan de desarrollo para minar este cuerpo es de 12,800m aproximadamente en 2 niveles a partir de un tiro. Se optó el uso de TBM después de ser evaluado económica y operativamente.

Para este proyecto se seleccionó el uso de un Tuneladora marca Robbins de tipo viga principal (Tabla 3.3), la cabeza de corte y la viga principal se cortaron en 2 partes y se ensamblaron en la cámara de lanzamiento, debido a las limitaciones de la mina. Algunas especificaciones de la TBM se muestran a continuación:

Robbins TBM Especificaciones		
Diámetro de corte		4.62 m
Cabeza de corte	Potencia instalada	1259 kW
	RPM	4 – 12
	Empuje	7,340 kN
Cortadores	Cantidad	33
	Ancho de la punta	15.875 mm
	Diámetro	432 mm
	Carga máxima	222 kN/cortador
Avance por ciclo		1.575 m
Radio mínimo de giro		105 m
Peso		225 t

Tabla 3.3 Especificaciones máquina Robbins, Ibid.

STILLWATER MINING COMPANY (SMC)

La mina StillWater es el mejor ejemplo en el uso de máquinas TBM en proyectos mineros con mucha vida útil de producción y que requieran grandes accesos al yacimiento o cuerpos minerales. Esta mina es la mayor productora de platino en América del Norte y la única productora en Estados Unidos de América, está localizada 50 km al norte del parque nacional de Yellowstone.

La SMC ha seleccionado el uso de TBMs para el desarrollo de la mina debido a los beneficios sobre métodos de excavación convencional (barrenación y voladura).

La mina ha descubierto que las tuneladoras han aumentado las tasas de avance en comparación con los métodos de extracción tradicionales. Si bien el costo de capital de las tuneladoras es aproximadamente 1,5 veces mayor que el de las flotillas mineras convencionales, solo tienen el 33% de los costos operativos. SMC ha utilizado cuatro tuneladoras para la minería en el pasado, la primera tuneladora utilizada en la mina Stillwater en 1988.

La compañía Stillwater Mining (SMC) desarrolló una segunda mina subterránea de paladio y platino. Un túnel (Acceso #1) de 5,650 m con una pendiente 0.5% (+) fue requerido para tener acceso al cuerpo mineral.

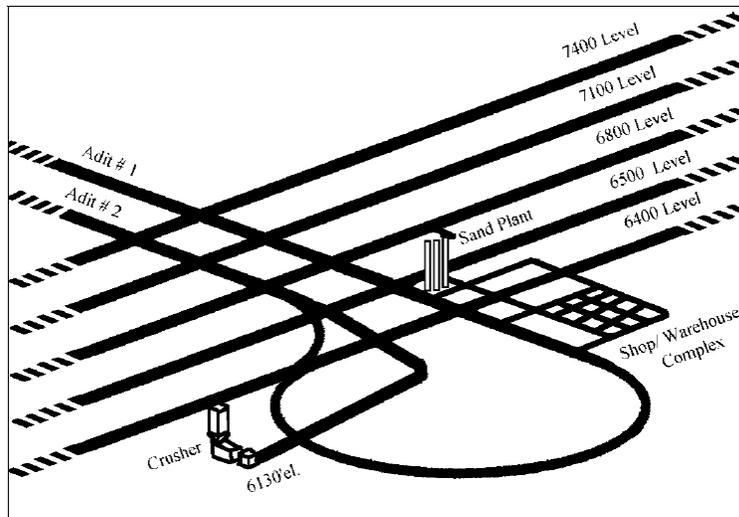


Figura 3.6 Proyecto bloque Este, Mina Stillwater. (Application of Tunnel Boring Machines in Underground Mine)

La geología a lo largo del túnel y sus resistencias a la compresión registradas son:

Roca	Longitud (m)	R.C.S. (Mpa)
Limonita	1,006	60-140
Gabro	2,350	70-190
Norita	430	100-150
Anortosita	1,140	60-190
Gabro olivínico	335	70-190
Troctolita	210	60-190

Tabla 3.4 Geología en túnel Strillwater (Ibid.)

Debido al éxito que se obtuvo al utilizar TBM, la mina Stillwater tomó la decisión de utilizar TBM para todos los desarrollos de la mina para minar el bloque este. La primer TBM fue diseñada y construida por Construction and Tunneling Services (CTS) para excavar el túnel Acceso #1 de 5,650m de longitud.

Tuneladora CTS Especificaciones		
Diámetro de corte		4.58 m
Cabeza de corte	Potencia instalada	1345 kW
	RPM	11.6/3.8
	Empuje	8,545 kN
Cortadores	Cantidad (Diámetro)	26 (432mm) 3 (406mm)
	Ancho de la punta	15.875 mm
	Carga máxima	222 kN/cortador
Avance por ciclo		1.220 m
Radio mínimo de giro		61 m
Peso		275 t

Tabla 3.5 Especificaciones Tuneladora Stillwater (Ibid.)

Este acceso eficiente al bloque Este de la mina fue esencial para llegar a tener una tasa de producción de 1,800 t/día. Otra meta clave para el programa de obra, era establecer un segundo medio para desarrollar un acceso y generar la ventilación requerida para el desarrollo subterráneo. La Compañía Stillwater (SMC) adquirió entonces una segunda TBM para el desarrollo del bloque Este (Acceso #2). La tuneladora adquirida era la utilizada en la Mina San Manuel, anteriormente mencionada, de la compañía Robbins, un contratista independiente la reensambló con las siguientes especificaciones.

Robbins TBM Especificaciones		
Diámetro de corte		4.62 m
Cabeza de corte	Potencia instalada	828 kW
	RPM	12/4
	Empuje	7,300 kN
Cortadores	Cantidad	33
	Ancho de la punta	15.875 mm
	Diámetro	432 mm
	Carga máxima	222 kN/cortador
Avance por ciclo		1.550 m
Radio mínimo de giro		105 m
Peso		225 t

Tabla 3.6 Especificaciones 2da Tuneladora (Ibid.)

Dentro del proyecto se utilizó una banda de 914mm para la extracción del material producto de la excavación, un punto clave para la extracción del material una vez

llegado al bloque Este era utilizar esta misma está banda transportadora para extraer todo el material de los desarrollos posteriores.

El desarrollo de las obras con TBM tuvo un gran éxito que la compañía continuó utilizando estas máquinas. La tabla 3.7 muestra todas las obras que han realizado con tuneladoras.

Mina	TBM	Trazo	Fecha Inicio	Fecha Fin	Longitud (m)
Stillwater	Robbins MB 146-193-1	5000 East FWL	Marzo 1988	Julio 1988	975
Stillwater	Robbins MB 146-193-1	5900West FWL	Marzo 1989	Agosto 1990	3,390
Stillwater	Robbins MB 146-193-1	5700West FWL	Octubre 1990	Enero 1991	1,405
Stillwater	Robbins MB 146-193-1	5500West FWL	Febrero 1991	Junio 1991	7,500
East Boulder	CTS	Access #1	Julio 1998	Julio 2000	2,286
East Boulder	Robbins MB 156-275	Access #2	Marzo 1999	Septiembre 2000	5,530
East Boulder	Robbins MB 156-275	West FWL	Septiembre 2000	Septiembre 2008	2,200
East Boulder	Robbins MB 156-275	Graham Creek	Enero 2011	2012	2,590
Stillwater	Robbins MB244-313-2	Blitz 5000 East	Mayo 2012		6,858
				Total	32,734

Tabla 3.7 Lista de proyectos en la SCM excavados con TBM de 1998-2012 (*The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining, R. Gratias*)

THE BLITZ PROJECT

Como se mencionó anteriormente el proyecto del túnel Blitz forma parte de la SMC, este es el último proyecto con TBM que ha desarrollado la compañía. La zona donde se pretendía excavar el túnel tenía muy pocos sondeos y por ende muy poca información geológica, así que durante la excavación del túnel se pretendía realizar barrenación a diamante en todas direcciones respecto al eje del túnel cada 150 m (incluyendo el frente). La información obtenida funcionaba para determinar la posición de la TBM respecto al yacimiento, para mantener la orientación correcta y nunca intersecarlo. El trazo del túnel consistía en excavar un túnel de 7.1 km de longitud y 5.5m de diámetro, el rompimiento del túnel se encontraba en el nivel 50E a 1562msnm, a la par se proyectó un túnel de 4.7x4.7m excavado de manera convencional en el nivel 56E con 1750 msnm, estas 2 obras se comunicarían con un pozo, las 2 tienen como propósito la exploración, ventilación y nivel de acarreo.

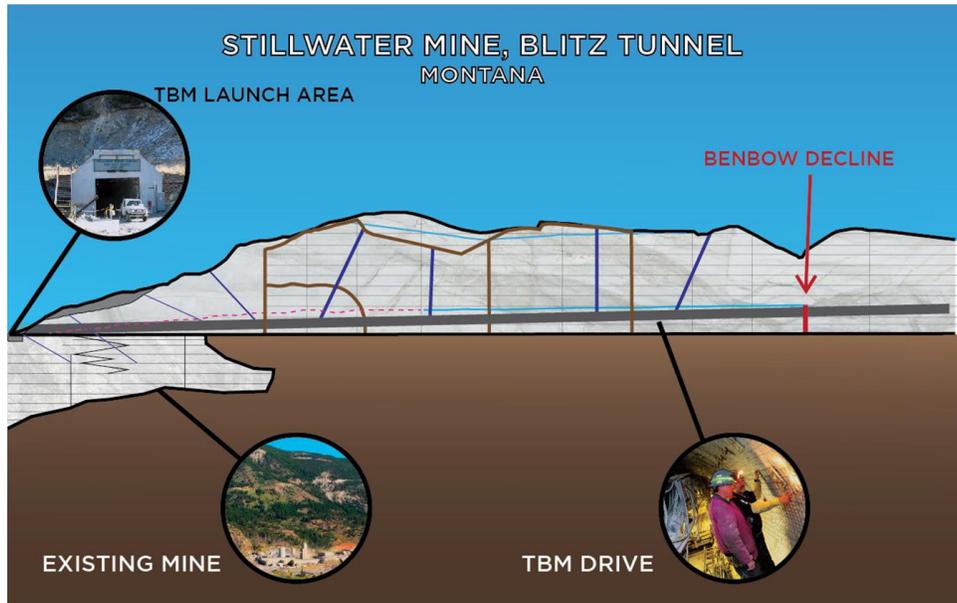


Figura 3.7 Trazo Blitz Túnel (Ibid)

Se espera que el proyecto se termine en 5 años, su costo estimado es de \$197 millones de dólares, la compañía considera que el proyecto Blitz va proveer de un potencial futuro al lado Este del yacimiento. Adquirieron una Máquina Robbins 5.5 m diámetro viga principal, con un peso de 360 ton.

Antes de adquirir la tuneladora, esta excavó en Nueva York, un túnel de metro de aproximadamente 5,500 m de longitud y en Sídney excavó un túnel de metro de aproximadamente 4,300m, con 7.0m y 6.7m de diámetro respectivamente. La tuneladora está planeada para que se opere con 7 personas sin contar el personal en el sistema de acarreo.

La geología en el trazo del túnel se encuentra en una zona de roca norita en contacto con gabro bandeado. En agosto de 2014, se encontraron en una zona de falla donde se tuvieron convergencias tan grandes que el ducto de ventilación circular de acero tuvo que ser reemplazado por un tubo más pequeño en forma de ovalo para permitir a la máquina pasar.

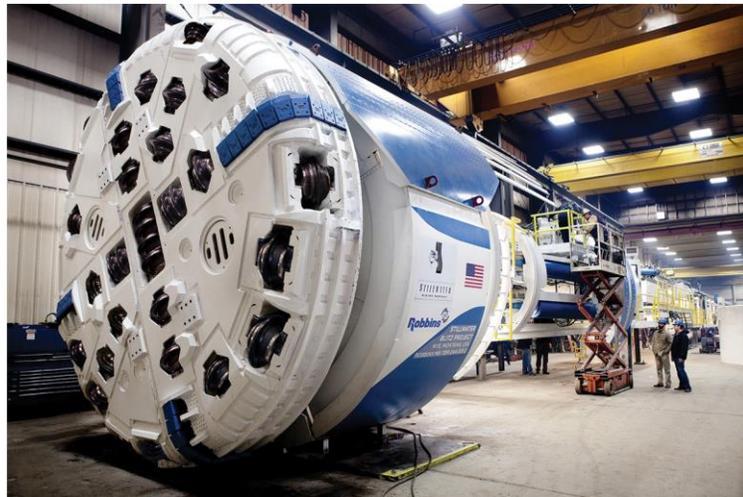


Figura 3.8 Robbins MB244-313-2 Blitz túnel (Ibid.)



En enero 2014, con 1 brigada se pudo excavar 180m, pero a medida que las condiciones geológicas se complicaban, para octubre de 2014, se excavaron 28m con 2 brigadas. Para finales de octubre la TBM estaba a 9,4 m del contacto de un dique. El dique se estaba hundiendo lejos de la tuneladora creando una cuña de baja resistencia de roca alterada bajo altos niveles de esfuerzos.

Figura 3.9 Convergencia en el Túnel provocada por el dique. Agosto 2014 (Johnson Josh et. al. 2016)

Las condiciones en septiembre de 2014 se muestran en la Figura 3.10, donde el cielo de la obra está totalmente deformado, y convergiendo hacia el interior del túnel, para el sostenimiento se utilizaron mallas electrosoldadas con anclaje pasivo. La roca alterada y con poca resistencia provocaba colapsos en el cielo de la obra, se intentó solucionar el problema utilizando concreto lanzado de alta resistencia con acelerante, se dejó fraguar por 72 h, aún con esta condición el terreno seguía fallando debido a las vibraciones provocadas por las perforadoras para colocar el anclaje. Fig 3.11



Figura 3.10 Condición del cielo, septiembre 2014, (Ibid.)

La condición de falla continuó avanzado y colapsando sobre la TBM, hasta el punto que avanzar ya no era una opción, el cielo alcanzó una altura de 18.7m, hasta que ya era imposible medir el vacío producido por los desprendimientos.

Después de que se rellenó esa chimenea con una combinación de cemento de baja densidad, y poliuretano, otras 2 zonas pequeñas de colpaso se susitaron, una de ellas tuvo que ser rellenada de igual manera, después de un chequeo general de la máquina se determinó que había un error en los programas de controladores lógicos que provocaban que 3 de los 6 motores trabajaran a plena potencia.

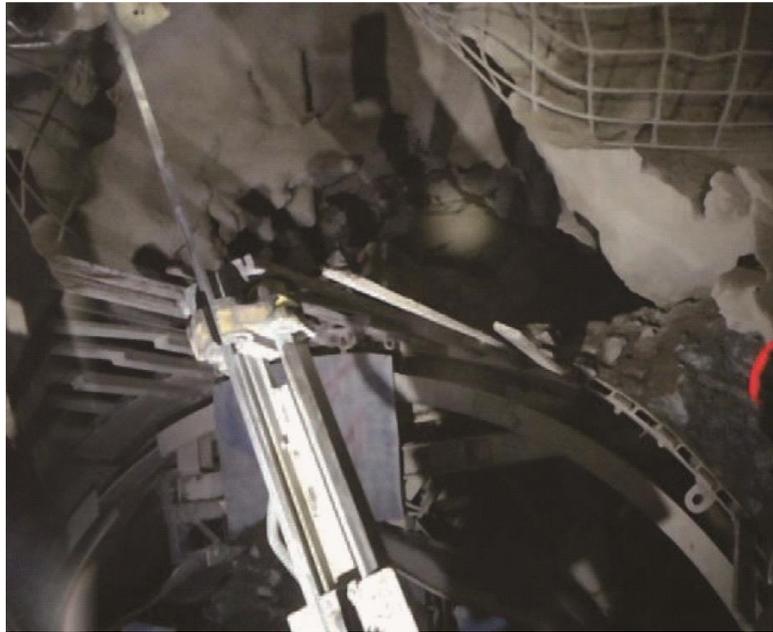


Figura 3.11 Caídos de roca y cemento, producto de las vibraciones

A falta de torque necesario para poder realizar el primer giro en contacto con el terreno, la cabeza se retrae para poderla girar y esta acción propiciaba las chimeneas mencionadas anteriormente, además se tuvo que utilizar anillos metálicos hecho de pérfiles curvos de acero W6x15, perpendicular a estos se instalaron varillas para repartir más las cargas en el acero, en combinación con anclaje pasivo de anclas Rebar. Para sostener la zona que fue estabilizada con concreto y poliuretano se optó por el uso de cablebot para mantener trabajando el bloque en conjunto con el terreno.

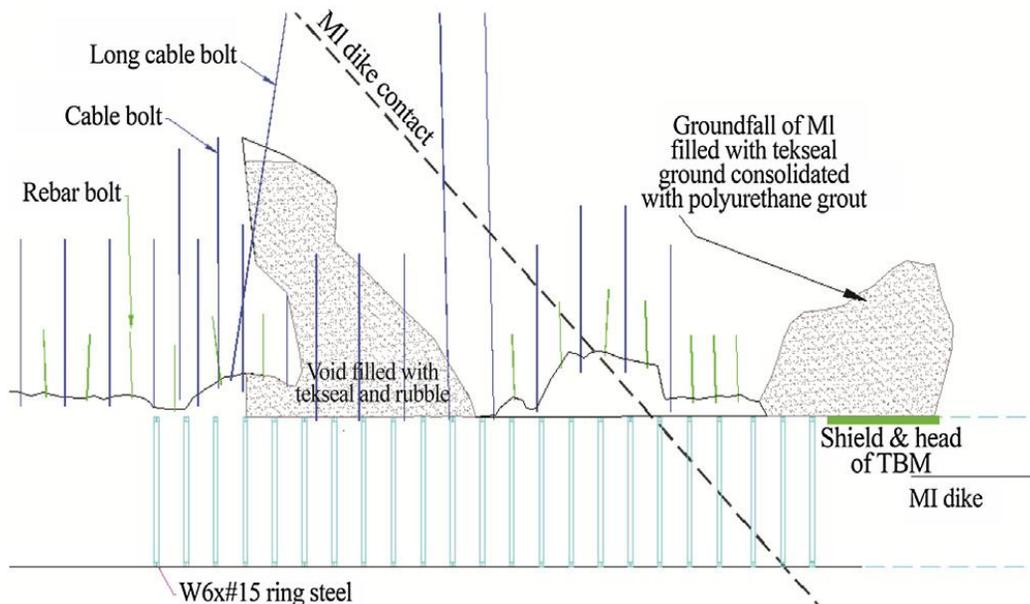


Figura 3.12 Sistemas de soporte y sostenimiento, zonas de falla (dique) Ibid.

TÚNEL INCLINADO (DECLINE TUNNEL). GROSVENOR, AUSTRALIA.

Los túneles inclinados funcionan como acceso a los cuerpos minerales que se encuentran a cierta profundidad y no se les puede acceder con obras horizontales, este tipo de uso de las TBM es el último uso que se les puede dar a las tuneladoras aplicadas a la minería. Estos túneles únicos a menudo requieren una tuneladora personalizada y un back-up único.

En Australia se requirieron 2 túneles de acceso para alcanzar los mantos profundos de carbón. Se proyectaron dos túneles de declive, con pendientes de -16.5% y -12.5% y longitudes de 1,100m y 900m respectivamente. Se utilizó una máquina híbrida de EPB/roca de 8.0 m de diámetro para condiciones de suelo mixto que van desde arena y arcilla hasta diferentes resistencias de roca, hasta 120 MPa RCS(UCS).

Ya que es una mina de carbón, se espera que haya gas metano en todo el túnel, por lo que la máquina ha sido diseñada como a prueba de explosiones compatible con ERZ-1³. La tuneladora se lanzó en diciembre de 2013. Se espera que solo unos 300 m de terreno requieran modo EPB, mientras que el resto en modo roca dura. Por lo tanto, el diseño se optimizó para la excavación de roca dura. En el modo EPB, la máquina utiliza un tornillo de montaje central de dos etapas, con un revestimiento interno reemplazable y brocas de carburo para protección contra la abrasión. Para mantener la cámara de excavación a prueba de chispas debido a la presencia de metano, la cámara está llena de agua, espuma y otros aditivos. Básicamente, la máquina utiliza su tecnología EPB para lidiar con cualquier gas metano de manera segura. Si se detecta alguna fuga de metano, un sistema de evacuación llamado "snuffer box" extraerá el metano del extremo del transportador de tornillo y lo incorpora directamente al sistema de ventilación. (Fig. 3.13)

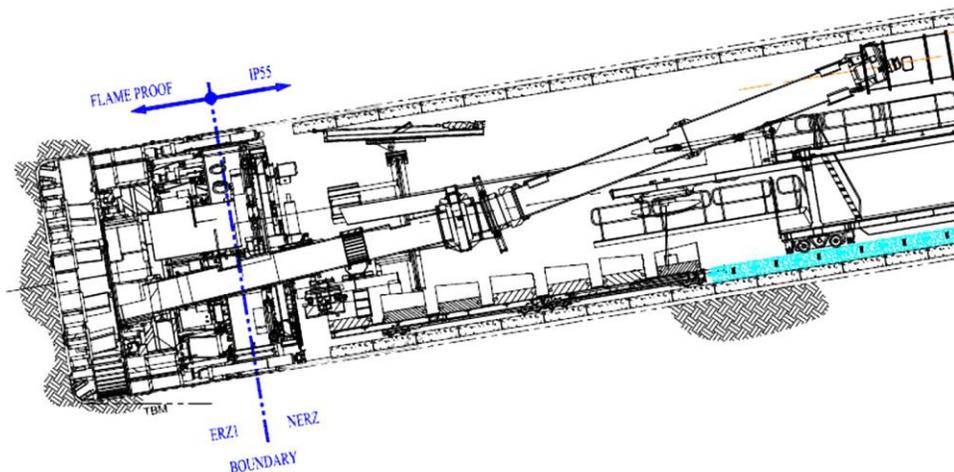


Figura 3.13 TBM a prueba de explosiones The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining (Robbins Co.)

³ ERZ-1 Explosion risk zone 1, Área con atmosfera explosiva, puede ocurrir en la operación normal. Evaluación de riesgos entre 0.5% a 2% de concentración de metano.

El proyecto se llevó a cabo en 9 meses, en comparación con 2 o 3 años esperados si se utilizaban rozadoras para desarrollar los túneles. Los túneles finales deben permanecer intactos durante la vida útil de la mina Grosvenor (40 años) y no deben requerir mantenimiento utilizando revestimientos de cemento, este último fue el criterio definitivo para la elección de excavar con equipo TBM que con rozadoras.



Figura 3.14 Túnel 1,100m, -16.5% Mina Grosvesor (<https://www.therobbinscompany.com>)

Un criterio fundamental para los túneles inclinados con TBM es seleccionar el método de rezagado para la propia máquina y para extracción de mineral o estéril proveniente de la mina. En el caso de minería de carbón por lo general se utilizan tiros inclinados con bandas transportadoras para la extracción de los ya mencionados. Se debe analizar esta situación y establecer un diseño alternativo para el sistema de extracción de las TBM.

ALTERNATE DESIGN

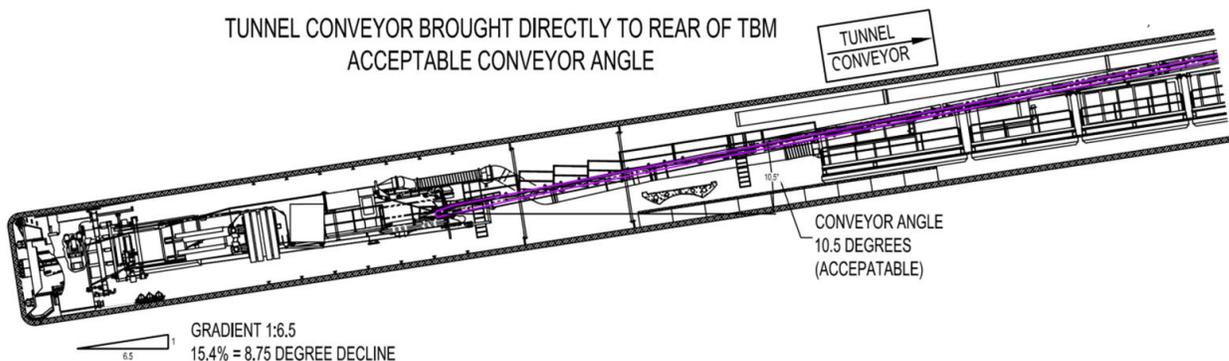


Figura 3.15 Sistema de extracción alternativo *The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining* (Robbins Co.)

TÚNELES EN SUDAMÉRICA

La construcción del túnel de desvío de agua de Río Blanco para abastecer de agua a la Mina El Teniente en Chile se realizó con una tuneladora de tipo abierto. Al inicio de su operación no tenía suficiente potencia, lo que inicialmente resultó en bajas tasas de producción para la roca diorita muy resistente. Se adecúo la TBM durante las primeras etapas del proyecto y resultó en tasas de producción sostenidas de 30 m / día.

El uso más reciente y notable de una tuneladora en una mina ha sido en la mina Los Bronces en Chile, ubicada en una elevación de más de 4.000 m.s.n.m., donde se excavó un túnel de exploración de 8 km entre los cuerpos de mineral para facilitar la perforación de exploración.



Figura 3.16 Tuneladora híbrida usada en mina Los Bronces (SME)

Alguna de las productividades utilizando TBMs en proyectos mineros fueron:

Proyecto	Locación	Año	Diámetro (m)	Producción (m/día)
Stillwater EB	USA	1988-91	5.5	15
Rio Blanco	Chile	1992	5.7	30
San Manuel	USA	1993	4.6	17
Mineral Creek	USA	2001	6	18
Ok Tedi	PNG	2008	5.6	30
Los Bronces	Chile	2009	4.2	17

Tabla 3.8 Productividades en proyectos mineros (SME, 2013)

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE USO DE TBM EN PROYECTOS MINEROS

Las principales ventajas son:

- Tasas de avance significativas y sostenidamente más altas, para el caso de una roca dura de buenas condiciones.
- Menor soporte de roca debido al casi nulo daño que se produce al macizo rocoso.
- Posibilidad de tramos largos
- Menores requerimientos de ventilación
- Mejores condiciones de salud y seguridad para los trabajadores al no exponerlos a gases productos de una voladura
- Se puede iniciar una operación y producción de mineral más rápido.
- Se pueden acoplar sistemas MWD (measure while drilling) para evaluar el terreno por delante de la TBM
- Un túnel de considerable longitud traerá beneficios en cuanto a costos y tiempos, lo que es fundamental en la operación minera.
- Debido al poco daño que se genera en la roca, ó el uso de sostenimientos y/o revestimientos mejora la ventilación por la poca fricción que se genera entre la roca/soporte/revestimiento y el aire.

Las desventajas principales para el uso de TBMs en proyectos mineros son:

- La excavación produce solamente una sección circular, la cual podría imponer importantes restricciones al momento de transportar equipos de grandes dimensiones no contemplados previamente.
- Al tratarse de obras mineras la sección circular la parte inferior debe ser rellenada o se requiere una losa para su uso. (equipos sobre neumáticos o acceso a personal)
- Se limita su aplicación a túneles relativamente rectos donde la curvatura.
- La presencia de un alto porcentaje de roca alterada y/o débil podría resultar en un aumento significativo de soporte, con la consecuencia de disminuir considerablemente los tiempos de avance de la TBM.
- Fenómenos de sobreesfuerzos y relajación de esfuerzos justo detrás del cabezal de corte podrían requerir de soporte inmediato para protección de los trabajadores y de la máquina.
- Disponibilidad limitada de espacio si debe ser instalado soporte de gran capacidad para condiciones de roca muy malas.
- Disponibilidad limitada para inyectar y acondicionar el terreno para evitar la presencia de agua.
- Se requiere mayor tiempo de concepción del uso de la TBM.
- Se debe acondicionar una obra de lanzamiento de la TBM con todas las consideraciones necesarias.

4. MINERÍA DEL CARBÓN, INTRODUCCIÓN AL MINADO MECANIZADO

El carbón es una roca sedimentaria orgánica, se forma a partir de la descomposición de materia orgánica vegetal y la acción de bacterias anaeróbicas, depositados principalmente en zonas pantanosas, lagunares de poca profundidad.

Estos fueron depositados hace millones de años y debido a los movimientos tectónicos de la corteza terrestre y a las altas presiones y temperaturas a los que fueron sometidos, esta materia sufre transformaciones físicas y químicas, que, con el transcurso del tiempo, forman al carbón.

La clasificación del carbón más utilizada es por su contenido en carbono. Así, de mayor a menor se definen:

1. Turba, se trata del carbón más reciente (entre un 45 y 60% de carbono), y constituye un primer paso en la carbonización natural. El color es más o menos parduzco. Su estructura es porosa. Las turbas se forman preferentemente en zonas donde predominan los esfagnos (musgos), es un carbón de baja calidad con una mínima potencia calorífica.
2. Lignito (de lignu o leño), es un carbón fósil de formación reciente (posterior a la hulla). Se trata de un combustible de calidad media (entre un 60 y 75% de carbono) como una turba fosilizada, pero de calidad superior a ésta.
3. Hulla, es un carbón natural negro y brillante, que contiene entre un 80 y 90 % de carbono. También contiene entre 3 y 20% de oxígeno, y entre 1 y 5% de hidrógeno. De ella se extrae por destilación seca alquitranes, amoniaco y productos volátiles como gases de alumbrado; en forma seca se utiliza como combustible.
4. Antracita, es un carbón natural de muy alto poder calorífico (posee un 95% de carbono). Arde con mucha dificultad, pero desprende mucho calor.

Un combustible a base de carbón se puede clasificar con base en las siguientes características:

Humedad

La humedad característica del combustible, que varía en función del rango, según se detalla a continuación:

Turbas 20-30%
Lignitos 15-25%
Hullas 5%
Antracitas 3%

Esta humedad, según normas A.S.T.M., se mide a 30 °C en presencia de aire y un 97% de humedad relativa.

Contenido en volátiles

Este contenido constituye una importante propiedad de éste, proporcionando una indicación de su reactividad y facilidad de ignición.

La medida de la cantidad de volátiles emitida es, en la práctica, una función de las características de la muestra de carbón y del proceso de combustión seleccionados. En este sentido, el ensayo propuesto por ISO para su determinación fija la temperatura (900 °C), la duración (7 min.) y el recipiente sobre el cual se debe depositar la muestra fuera del contacto del aire; se define como contenido en volátiles del carbón la pérdida de peso de la muestra en estas condiciones.

Este parámetro caracteriza la estabilidad de la llama tras la ignición, así como la facilidad para la producción de ésta. Los carbones de alto rango tienen pocos volátiles y arden muy lentamente, siendo crítica la estabilidad de llama.

Un contenido excesivamente alto en volátiles (superior al 30%) puede provocar problemas de seguridad, debido a la aparición de igniciones espontáneas.

Cenizas

Es el residuo sólido tras una combustión completa de toda la materia orgánica y de la oxidación de la materia mineral presente en el carbón. No es nunca igual al contenido en sustancias minerales del combustible antes de la combustión. Por consiguiente, las cenizas definen la calidad del carbón en la combustión al determinar el contenido en materia incombustible presente. A mayor contenido en cenizas, menor poder calorífico presentará el carbón bruto y mayores serán los sobrecostos de manipulación y tratamiento, así como los posibles problemas de erosión en los equipos de transporte y combustión.

La variación presente de las cenizas en el carbón es del orden del 10% al 20%, siendo estas muy significativas para determinar el uso del carbón, sus costos asociados como el manejo de los residuos, costos del carbón entre otros.

Contenido en Carbono Fijo

Este parámetro es calculado, obteniéndose por diferencia a 100% de la suma de los contenidos, de humedad, volátiles y cenizas del carbón. Asimismo, el contenido en carbono fijo se emplea para estimar la cantidad de coque (productos de combustión intermedios) que se puede producir, así como el contenido de inquemados en las cenizas volantes. Un combustible a base de carbón se puede clasificar con base en las siguientes características:

Las Normas ASTM (American Society for Testing and Materials) definen como carbones de bajo rango aquellos cuyo poder calorífico bruto, base húmeda sea menor a 6.390 Kcal/Kg., en este rango están los carbones denominados sub bituminosos y los lignitos. En los carbones de alto rango, con un poder calorífico mayor a 6.390 Kcal/Kg., se incluyen los carbones bituminosos y antracitos.



Figura 4.1 Tipos de carbón (<https://tippos.net/tipos-de-carbon/>)

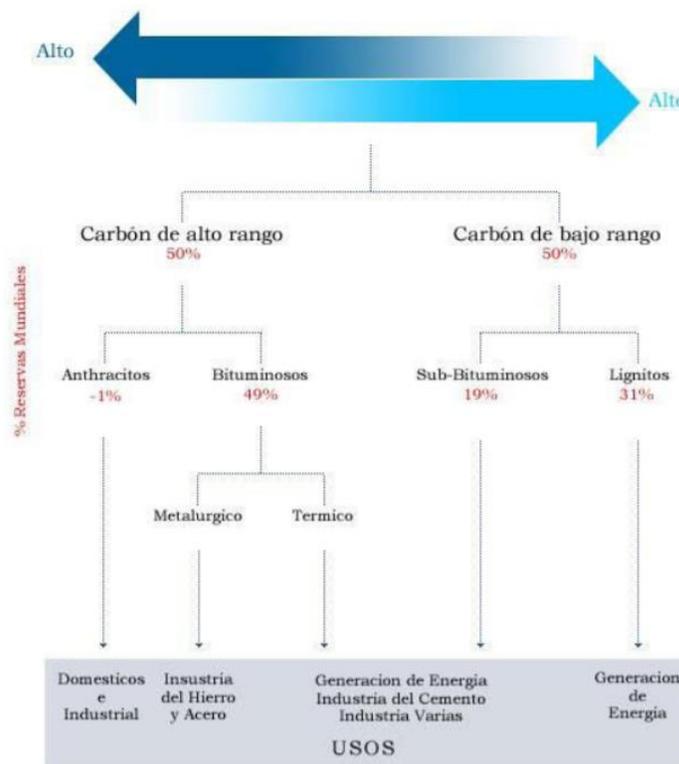


Figura 4.2 Clasificación y usos del carbón mineral (Secretaría de Economía, 2014)

El mercado exige del carbón distintas propiedades, principalmente el poder calorífico, esto para poder tener un valor comercial alto, entre los que se destacan el carbón térmico y metalúrgico. El primero se utiliza en la producción de calor, básicamente en hornos, generación de vapor y otros sistemas térmicos. El segundo, se consume en el área siderúrgica para la producción de coque. Esto hace que ambos tipos de carbón se comercialicen en diferentes mercados. El carbón térmico tiene alto contenido de energía y es significativo en la generación de electricidad.

Esta variedad provee más del 26% de las necesidades globales de energía primaria y genera alrededor de 41% de la electricidad mundial.

De acuerdo con datos de la Cámara Minera de México (CAMIMEX), en 2018 El consumo global de carbón aumentó por segundo año consecutivo, previendo se mantenga estable de aquí al 2022, ya que las reducciones en Europa y América del Norte se compensan con un fuerte crecimiento en India y Sudeste Asiático. China y Japón demandarán menos mineral debido al alto nivel de los precios del carbón térmico y por el avance hacia fuentes de energía más limpias. El peso relativo del carbón en la energía a escala global se reducirá del 27% al 25%, principalmente debido al crecimiento de las energías renovables y el gas natural, según mencionó la Agencia Internacional de la Energía.

La reserva mundial de carbón es aproximadamente 948 billones de toneladas⁴. Donde Estados Unidos, Rusia y China lideran las reservas mundiales, mientras que México se sitúa en el lugar 25 con un 0.1% de las reservas mundiales.

Lugar	País	Antracita y bituminoso	Sub-bituminoso	Lignito	Total	%
1	EUA	108,501	98,618	30,176	237,295	22.6
2	Rusia	49,088	97,472	10,450	157,010	14.4
3	China	62,200	33,700	18,600	114,500	12.6
4	Australia	37,100	2,100	37,200	76,400	8.9
5	India	56,100	0	4,500	60,600	7.0
25	México	860	300	51	1,211	0.1

Tabla 4.1 Reservas probadas en millones de toneladas Fuente: EIA

PRODUCCIÓN Y CONSUMO EN MÉXICO.

En México la producción de Carbón es muy escasa y ello se debe a la falta de yacimientos abundantes y con alta calidad del producto, que justifique una explotación. Los principales yacimientos (Fig. 4.3) de carbón se localizan en 3 regiones que, por orden de importancia actual, corresponden a los estados de Coahuila, Oaxaca y Sonora. También se encuentran evidencias de carbón en otros estados de la República: Colima, Chihuahua, Chiapas, Durango, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Nuevo León, Michoacán, Puebla, San Luis Potosí, Tabasco y Veracruz.

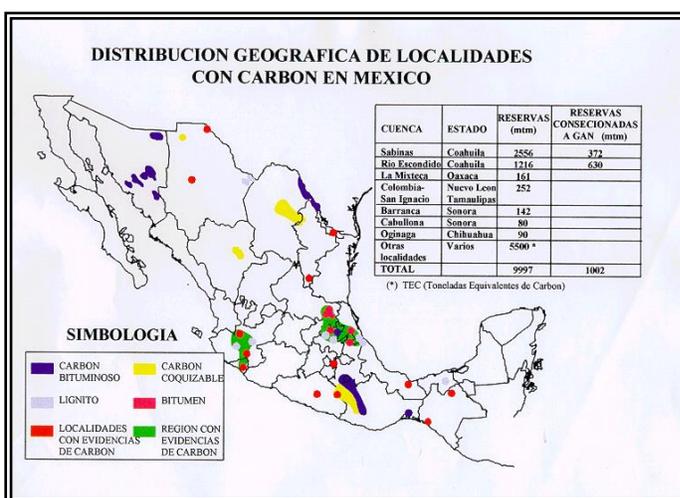


Figura 4.3 Localidades de carbón en México (Fuente: S.G.M. 2018)

⁴ EIA International Energy Statistics : Coal : Recoverable Reserves». Consultado el 31 de mayo de 2012.

REGIÓN CARBONÍFERA DE COAHUILA

Es la región más importante del país, aportando actualmente el 100% de la producción nacional de carbón. Se ubica en la porción norte-central del Estado de Coahuila y se extiende al oriente hasta incluir una pequeña área del Estado de Nuevo León. Geológicamente, es una cuenca constituida por ocho “subcuencas” que corresponden a sinclinales amplios, cuya orientación NW-SE se ajusta a la estructura regional. Estas subcuencas localmente se designan como: Sabinas, Esperanzas, Saltillito, Lampacitos, San Patricio, Las Adjuntas, Monclova y San Salvador.



Figura 4.4 Cuencas carboníferas. *Ibid.*

ESTADÍSTICAS DEL CARBÓN EN MÉXICO

La extracción de carbón en México representa actualmente un valor aproximado del 1.5% de la producción total en cuanto a minerales no metálicos se refiere (Fig. 4.5) y un 0.3% del valor total de la extracción minerales metálicos y no metálicos.

La producción actual del carbón ha ido a la baja año con año, tal como se muestra en la Fig. 4.6, para el año 2018 la producción anual fue de 6,772,528.21 Ton.

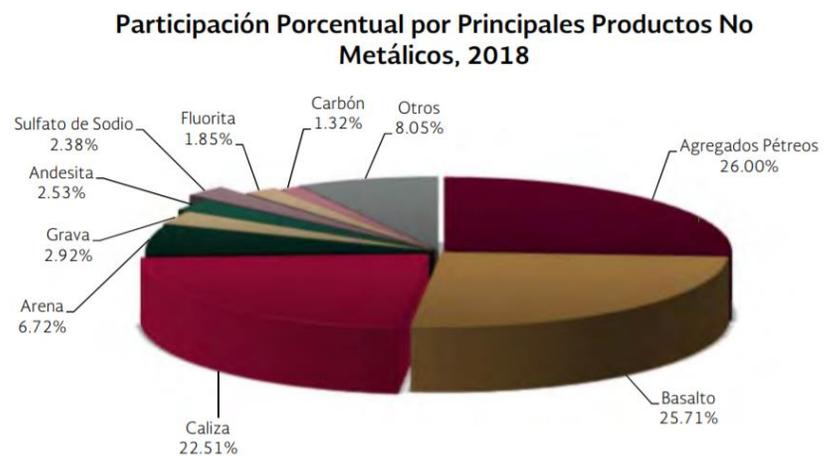


Figura 4.5 Participación de los minerales no metálicos en México *Ibid.*

1. *Gran Minera*: 6,077,196.66 que aporta un 89.73% de la producción
2. *Pequeña Minera*: 695,331.55 aportando 10.27% de la producción

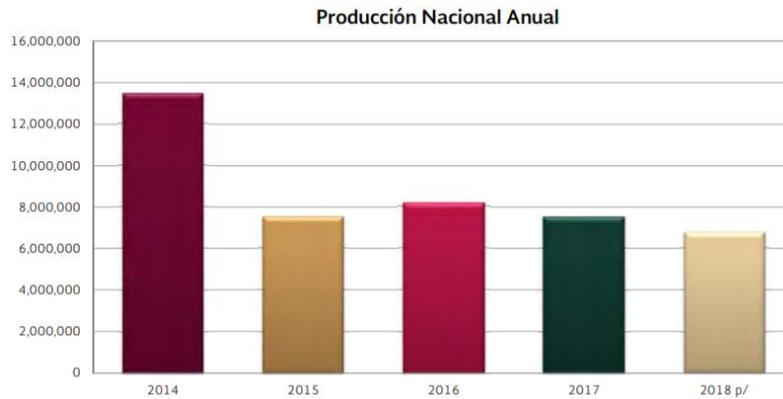


Figura 4.6 Producción nacional de carbón Ibid.

El carbón mexicano es de baja calidad; su poder calorífico apenas llega a las 5000 Kcal/Kg. Actualmente la producción de energía utilizando el carbón representa en México alrededor del 4% de la producción total.

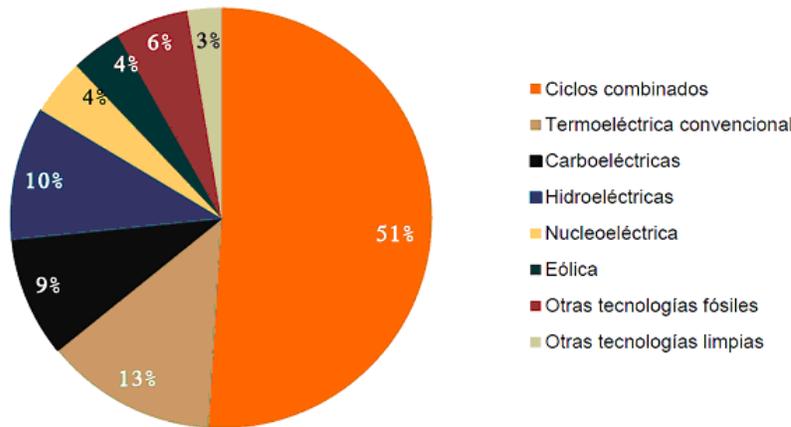


Figura 4.7 Distribución de la generación eléctrica por tipo de tecnología 2018 (CONUEE, información del PRODESEN 2019, SENER.)

IMPORTACIÓN, EXPORTACIÓN Y BALANZA COMERCIAL.

Debido a la baja capacidad calorífica y los altos costos que tiene el carbón que se extrae en México es necesaria la importación de una cantidad de carbón, tanto térmico como no térmico. Los Principales países exportadores e importadores de carbón a México:

Exporta a	Importa de:
Bahamas	Perú
Costa Rica	China
Guatemala	Estados Unidos de América
Nicaragua	Rusia

Tabla 4.2 Países Importadores y Exportadores de carbón a México Fuente: SIAVI (Sistema de Información Arancelaria Vía Internet)

En la Fig. 4.8 y 4.9 se muestra la participación de la importación y exportación de productos metálicos y no metálicos en México, se observa el contraste en cuanto a la participación de carbón se refiere, siendo un 12.24% y 0.28% en importación y exportación respectivamente.

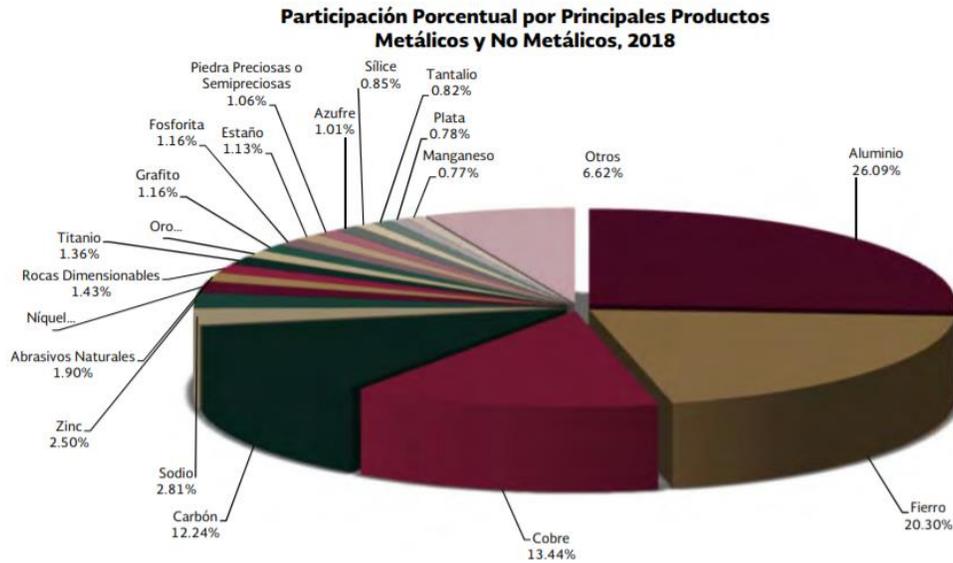


Figura 4.8 Importación de productos metálicos y no Metálicos (Anuario Estadístico de la minería mexicana, 2018)

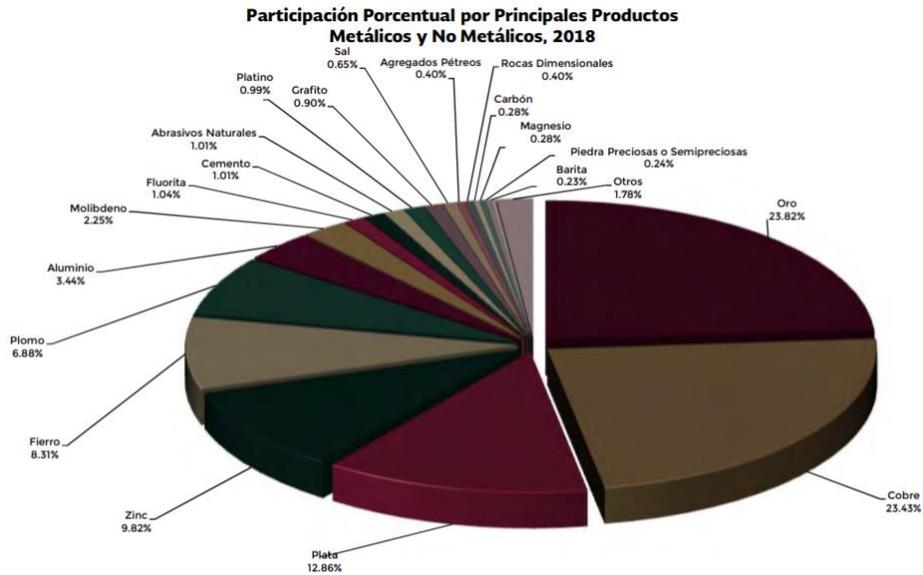


Figura 4.9 Exportación de productos metálicos y no Metálicos (Ibid.)

La siguiente información es un compendio de la información arancelaria (SIAVI) de los últimos 7 años (2013-2019).

BALANZA COMERCIAL DEL CARBÓN 2013-2019 MDD							
Concepto	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Exportaciones	1.61	1.11	0.88	0.78	0.76	1.41	1.26
Importaciones	758.98	716.81	558.28	501.96	902.71	925.89	842.55
Balanza comercial	-757.37	-715.71	-557.40	-501.18	-901.94	-924.47	-841.29

Tabla 4.3 Balanza comercial Carbón, MDD (SIAVI)

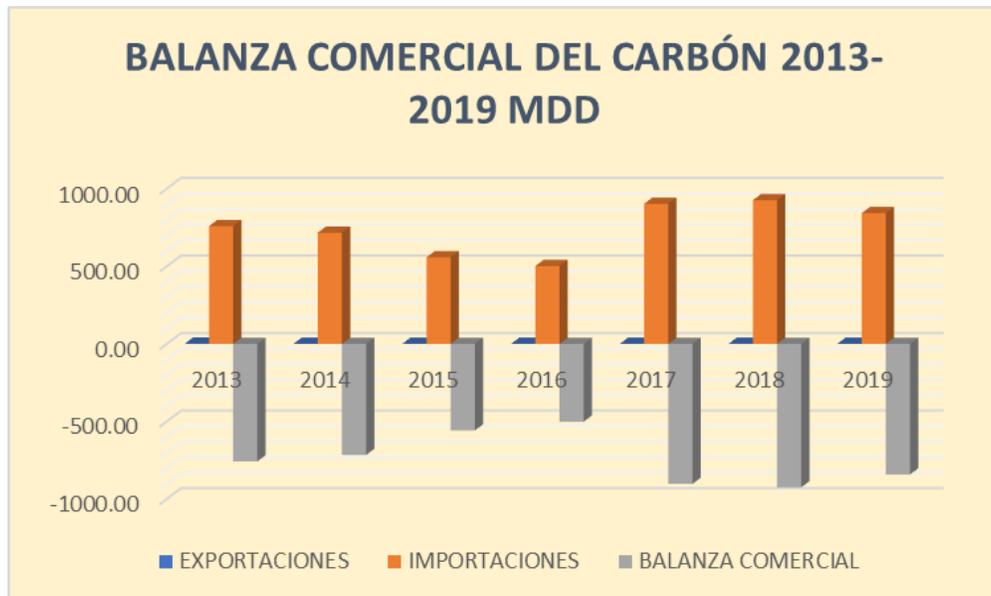


Figura 4.10 Balanza comercial en MDD. Gráfico propio con información del SIAVI

BALANZA COMERCIAL DEL CARBÓN 2013-2019 TON							
Concepto	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Exportaciones	4,711	3,494	911	2,505	2,556	4,716	4,629
Importaciones	7,491,245	7,278,946	7,706,744	8,281,037	10,400,589	9,276,974	9,499,623
Balanza comercial	-7,486,534	-7,275,453	-7,705,833	-8,278,532	-10,398,033	-9,272,259	-9,494,994

Tabla 4.4 Balanza comercial Carbón, Toneladas (SIAVI)

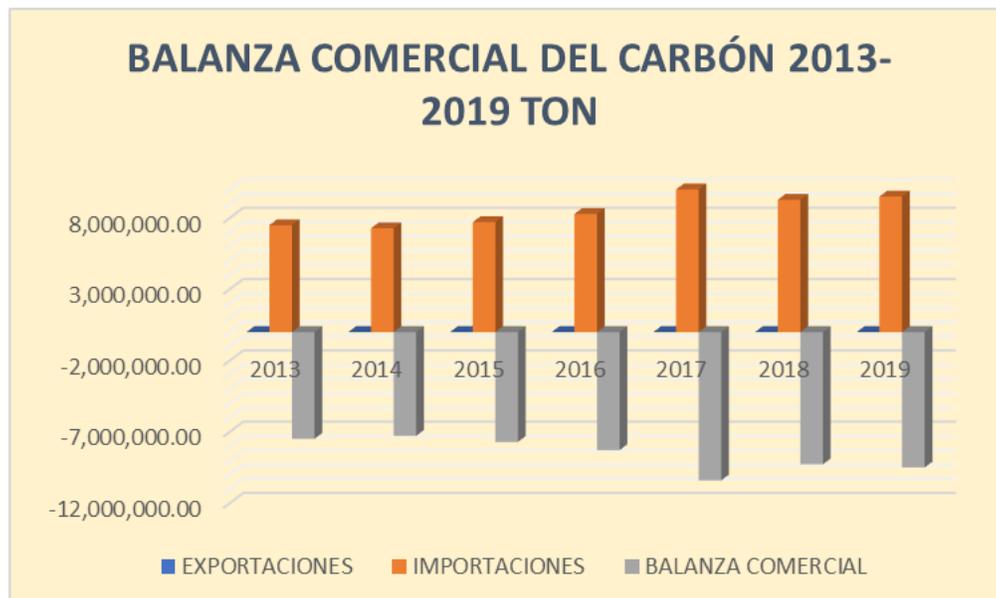


Figura 4.11 Balanza comercial en Ton. Gráfico propio con información del SIAVI

EXTRACCIÓN DEL CARBÓN

La minería de carbón es un caso de estudio diferente a la minería metálica, esto es debido a la génesis del yacimiento, las condiciones geomecánicas de la geología presente entre otros factores de riesgo asociados a la explotación del carbón.

El uso de explosivos en la minería de carbón subterránea está condicionado por diversos factores, entre ellos y uno de los principales es la generación de gas grisú (compuesto principalmente de metano 95%) producto de las mismas condiciones geológicas, este gas es altamente flamable, en ciertas concentraciones y en un ambiente confinado lo vuelven un gas explosivo.

El grisú se forma por la degradación biológica de la materia vegetal, quedando adsorbido (atraído o retenido) en la superficie del carbón.

Estas condiciones han obligado a desarrollar tecnologías que permitan la extracción del carbón con mayores condiciones de seguridad. Estas últimas que se utilizan para explotar y extraer el mineral funcionan desgarrando o desprendiendo el carbón por una acción mecánica. Está utiliza herramientas de corte que son el medio que desgarr el cuerpo que se desea explotar.

Para comenzar cualquier minado, se requieren obras de acceso, se pueden utilizar socavones, tiros, rampas y en el caso particular de la minería de carbón subterránea se utilizan tiros inclinados.

Estas obras se cuelan sobre material estéril y se ubican estratégicamente para que la distancia entre el cuerpo mineral y la superficie sea mínima.

Debido a que la geología en yacimientos carboníferos representa rocas sedimentarias, la resistencia a la compresión simple y muchas otras propiedades se pueden asemejar a suelos rígidos, por lo que no pueden ser minados mediante métodos tradicionales de barrenación y voladura, se recurre a la implementación de métodos mecanizados. Para colar o realizar la excavación de estas obras se utilizan equipos de corte conocidos como mineros continuos.

El tiro inclinado se usa para aprovechar las características del acarreo por bandas transportadoras, el ángulo máximo para el acarreo del carbón es de 18° (ángulo de rodamiento).

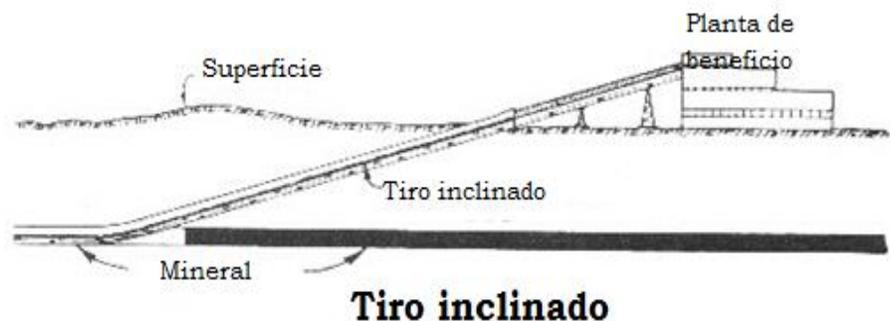


Figura 4.12 Acceso mediante tiro inclinado (Howard L. Introductory Mining Engineering, 2002.)

Es el acceso ideal para una mina de carbón que se localiza a muy poca profundidad, dependiendo del tipo de roca se podrán minimizar considerablemente los costos de fortificación, se cuela con obras gemelas. La primera para extracción y la siguiente para ingreso de personal

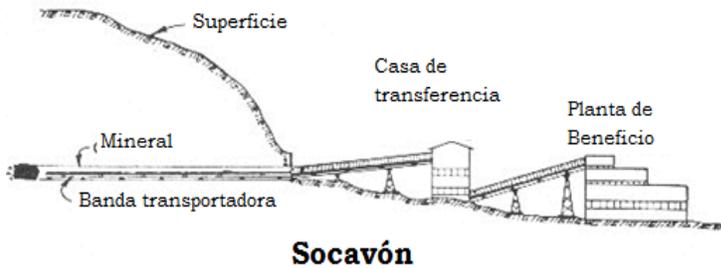


Figura 4.13 Socavón de acceso a la mina. (Ibid.)

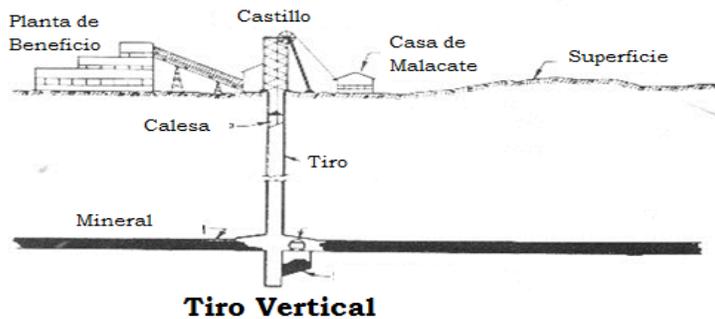


Figura 4.14 Tiro Vertical. Acceso personal y extracción material. (Ibid.)

El tiro vertical provee la distancia más corta de la superficie al yacimiento

El tiro vertical ofrece una mejor ventilación que un tiro inclinado. Se secciona el tiro, una parte para acceso y la otra para manto de mineral y ventilación.

Los equipos que tienen como función desgarrar el mineral o material estéril por medio mecánico para obras de desarrollo se les conoce como mineros continuos o rozadoras que se mencionaron en capítulos anteriores (Fig. 4.15 y 4.16), estos pueden ser con cabeza rozadora que permite secciones abovedadas o con cabeza totalmente rectangular, estos últimos permiten excavar diferentes tipos de perfiles, y adaptar excavaciones en fases o completas. Ambos cuentan con un sistema de rezagado a través de sistemas de recogida que rotan hacia dentro del equipo para captar la rezaga. El carbón tiene una RCS (resistencia a la compresión simple) de 15 Mpa a 45 Mpa según su grado de alteración, la roca encajonante debe tener parámetros similares para que estos equipos sean productivos y se puedan implementar.



Figura 4.15 con cabeza rectangular Fuente:Sandvik (izq.) y con rozadora Fuente:Alpine (der.)

La intersección de un tiro inclinado con el manto o cuerpo de carbón se le denomina “plancha”, de ella comienza el cuele o excavación de las obras de preparación, para el minado de carbón se les conoce como “cañones”. Se debe realizar una plantilla de cañones en conjunto con cruceros que comunican los cañones entre sí. Este acomodo conforma el sistema de ventilación, transporte de materiales y acarreo de carbón.

Todas las obras en minería de carbón deben ser realizadas en por lo menos 2 obras gemelas. Esto es consecuencia de las condiciones ambientales que se encuentran dentro de los depósitos de carbón como se mencionó anteriormente.

Cañones

Los cañones se pueden dividir en:

Cañón general: Este túnel funcionará como tránsito de personal y equipos, también tiene la función de llevar la conducción de aire limpio a través de la mina.

Cañón banda: Este cañón podemos encontrar el sistema de extracción de carbón desde las obras de producción (frentes largas) hacia la plancha y el tiro inclinado para su extracción. Es paralelo al cañón general.



Figura 4.16 Cañón banda Fuente: heavy duty insight Wordpress

Cañón de retorno: Funciona para la conducción de aire viciado hacia el exterior de la mina. Es una obra paralela a los 2 anteriores. Estos cañones se deben sellar con mamparas para evitar que el aire viciado contamine al limpio o el limpio se fuge hacia el viciado. Cada cierta distancia, por medida de seguridad las mamparas que sirven para sellar los cruceros se cambian por puertas para permitir al personal ir de una obra hacia otra.

En la Fig. 4.17 podemos observar el acomodo de los cañones. A partir del cañón general (orientación vertical), el cual se comunica a la plancha y a su vez al tiro inclinado se desprenden los cañones secundarios (orientación horizontal) que

funcionarán en conjunto con el descabece para delimitar el panel a ser minado. (longwall mining)

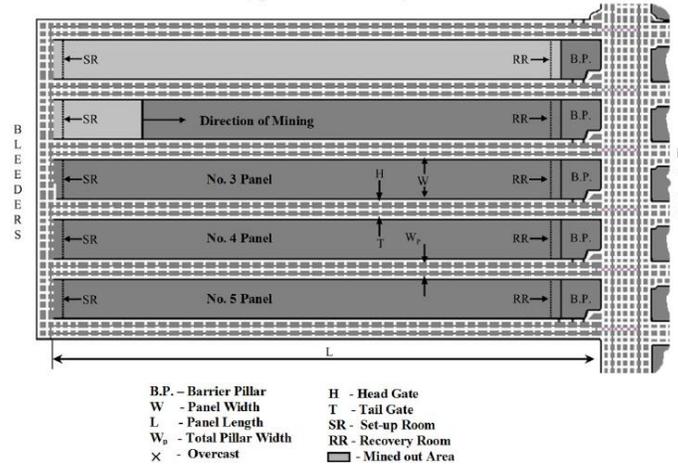


Figura 4.17 Arreglo de los cañones generales y secundarios Vista planta (U.S. Energy Information Administration). 1995. Longwall Mining.)

Descabece

Es el cuele de un crucero a partir de un cañón secundario. Este delimitará el ancho del panel o de la frente larga. Debe conectar 2 cañones secundarios, a su vez los cañones secundarios delimitan la longitud del panel.

El objetivo de esta obra es la de instalar en el la maquinaria que se utilizara en la frente larga, sus dimensiones ancho y alto serán de acuerdo al de la maquinaria y a las del manto en ese panel.

Las dimensiones del panel de una frente larga son variables de acuerdo a cada caso particular en donde se vaya a realizar la explotación por lo que las dimensiones pueden caer entre los siguientes intervalos:

- Longitud del panel: 1000 m a 2700 m
- Ancho del panel (longitud del descabece): 180 m a 300m
- Altura de la frente: 0.9 m a 5 m

Explotación

El minado comienza una vez que se delimitó el panel, se coloca el equipo de corte en conjunto con su sistema de extracción y soporte temporal. Este comienza a desgarrar el mineral a lo ancho del panel. Realizando movimientos laterales llegando de un extremo al otro. El mineral entonces cae en un transportador de cadenas y se envía a los cañones secundarios donde se encuentra la banda transportadora, después de que realiza este primer corte todo el sistema avanza apoyándose en sí mismo para realizar esta maniobra.

En la parte posterior al corte (la que queda en dirección contraria al sentido de explotación) se provoca un hundimiento debido a las pobres condiciones de la roca encajonante y del carbón.

El minado de frentes largos se puede realizar en 2 formas:

- Frentes en retirada
- Frentes en avance

FRENTES EN AVANCE

Este sistema consiste en llevar la explotación de la frente a la par y en sentido de avance de las obras de desarrollo. No requiere el cuele total de los cañones para establecer el sistema de ventilación, por lo que el tiempo de preparación será menor.

Este tipo no es muy utilizado debido a múltiples factores, tales como:

1. Las obras de desarrollo, los cañones se deben llevar de manera simultánea al minado del panel. Lo cual puede ser riesgoso y puede tener muchos contratiempos.
2. El hundimiento ocasionado por el minado queda en dirección a los cañones generales que son la ruta más segura para salir de la mina. Se tiene el riesgo que si el hundimiento afecta los pilares de los cañones secundarios pueden colapsar y poner en riesgo el personal.

La ventaja en este método es que no requiere el cuele total de los cañones para establecer el sistema de ventilación, por lo que no requiere mayor tiempo de preparación y su minado puede comenzar más rápido.

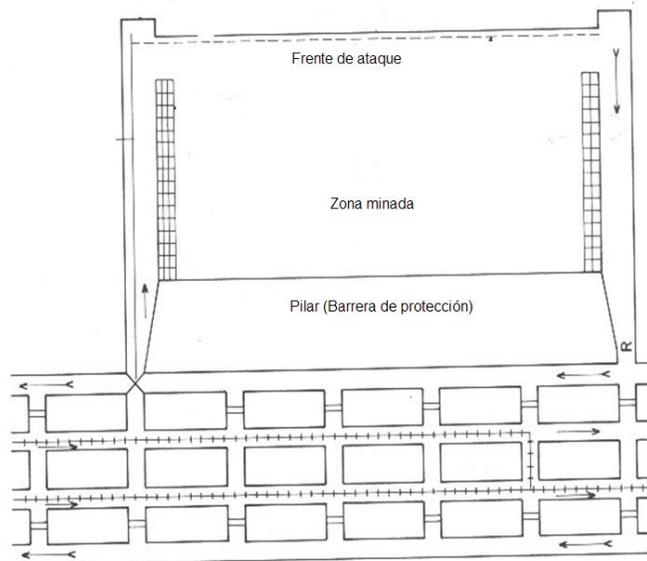
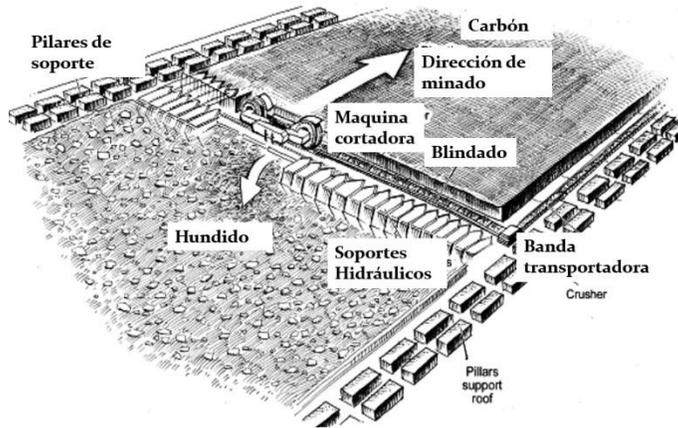


Figura 4.18 Frentes en avance. Fuente: Underground Mining Methods. Hustrulid 1982

FRENTE EN RETIRADA



Es el sistema más empleado en frentes largos pues brinda un mejor ritmo de explotación al tener todas las obras de desarrollo listas, además de ser más seguro con respecto al sistema en avance debido a que el efecto de subsidencia va quedando detrás de la frente de trabajo.

Figura 4.19 Frentes en retirada Fuente: *Real-World Automation: New Capabilities for Underground Longwall Mining* Peter B Reid

COMPONENTES DE LA FRENTE LARGA, EQUIPOS MECANIZADOS

Una frente larga está compuesta por diversos equipos los cuales son: Fig. 4.21

1. Transportadores de avance blindado
2. Máquina Cortadora
3. Ademes caminantes (Roof Support)
4. Motores y Reductores
5. Quebradora
6. Transportadores tipo andamio
7. Bandas transportadoras

El procedimiento para el avance del ademe caminante es el siguiente:

1. Se adelanta el blindado
2. Se baja el techo
3. Se adelanta el ademe
4. Se ancla y queda listo en su nueva posición

Los ademes siempre deben de estar en contacto con el cielo.



Figura 4.20 Componentes de una frente larga (<https://www.newcastleonhunter.org/>)

Transportadores de avance blindado



ademes caminantes

Cubre en su totalidad a la frente de ataque, dado que por el viaja la maquina cortadora de carbón. El blindado es movido por los ademes caminantes hacia adelante, creando el espacio suficiente para que ellos se muevan

Tiene tres propósitos principales:

1. Acarreo continuo de carbón
2. Soporte para la maquina cortadora
3. Referencia para el avance de

Figura 4.21 Transportadores de avance blindado (<https://mining.komatsu/es>)

Máquina cortadora

En la actualidad encontramos 3 tipos de máquinas cortadoras

1. Máquina cortadora de un tambor o cizallador
2. Máquina cortadora de doble tambor o cizalladores
3. Cepillo

Cortadoras de 1 tambor.

Son cortadoras con un solo tambor de corte, utilizadas para minar mantos pequeños (comparando con las cortadoras de dos tambores).



Figura 4.22 Cortadora de 1 tambor (Russell Vale mine, Robert Peet, 2016)

Cortadora de doble tambor

Su estructura permite tener un mejor arreglo en el corte debido a que sus tambores son independientes uno va cortando en la parte superior mientras el otro puede hacerlo en la inferior. Es el tipo más empleado de los tres debido a su alta productividad y la capacidad de trabajar con diferentes durezas del mineral. Son del tipo basculante, cuando se llega al extremo del panel, un tambor baja mientras el otro sube, esto es para optimizar las herramientas de corte. La altura del corte se puede ajustar para que se acomode conforme la variabilidad del manto.



Figura 4.23 Cortadora de doble tambor (Caterpillar)

Cepillo

Se utiliza para carbón de competitividad baja a intermedia, aunque su óptimo desempeño es en carbón suave. No requiere de controles tan sofisticados como las máquinas cortadoras de doble tambor, este puede alcanzar velocidades de 30 metros/minuto a diferencia de las otras máquinas cortadoras los costos de mantenimiento son menores.

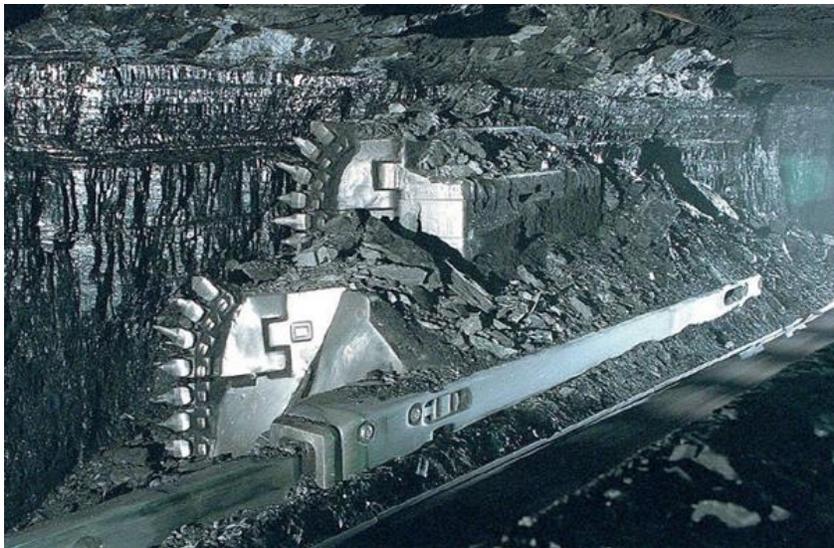


Figura 4.24 Cepillo Fuente: tristasafety.com

Las máquinas cortadoras se pueden comparar en la siguiente manera.

Cepillo	Condiciones	Cortadora
Pobre	Dureza de carbón e impurezas	Flexible
Bajo	Producción de polvo	Alto
Pobre	Control del polvo	Bueno
Baja	Liberación de metano	Alta
Bueno	Control del cielo	Pobre
11 o 12	Personal	9 o 10
Baja	Inversión inicial	Alta
Bajo	Mantenimiento	Alto
Baja	Producción	Alta
No	Acompañamiento de operador	Si

Tabla 4.5 Comparación entre máquinas cortadoras

Motores y reductores

Son los encargados de mover el transportador del blindado. Se encuentran localizados en la cabeza y terminal del blindado. El reductor se encarga de reducir las r.p.m. sin perder potencia.

Ademes caminantes

Son el sistema de soporte temporal en las frentes largas, a su vez son los encargados de posicionar el blindado a su siguiente zona de corte, una vez posicionado el blindado y realizado el corte, estos ademes bajan 1 a 1 y apoyándose del blindado se colocan en su siguiente posición. Su funcionamiento es hidráulico, el cual está controlado por computadoras individuales en cada ademe. Los ademes están conectados en serie en su sistema hidráulico y en el electrónico.



Figura 4.25 Ademe caminante (<https://mining.komatsu/es>)

Transportadoras tipo andamio

Es la parte que se encarga de avanzar a la quebradora y repartidor para ello cuenta con tracción de orugas. Desde esta parte se descarga al sistema de bandas. Su avance se realiza conforme el avance del corte en conjunto con los otros equipos.

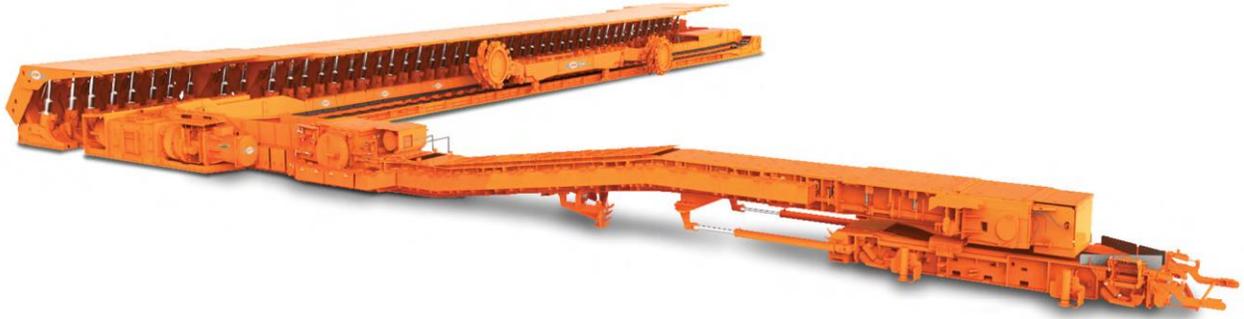


Figura 4.26 Transportadora tipo andamio (Ibid.)

Las transportadoras tipo andamio incluyen los siguientes componentes:

- Impulsores, sistemas y bastidores
- Impulsores
- Transmisiones
- Ruedas dentadas
- Cadena
- Cárceres laterales
- Trituradora
- Piezas posteriores móviles

Quebrador móvil

Se utiliza una quebradora, se encuentra localizada sobre el crawler. Su función es reducir el tamaño del mineral cortado y ofrecernos un producto más homogéneo y que sea manejable en las bandas transportadoras



Figura 4.27 Quebradora (Ibid.)

Costos⁵

Los costos siguientes se obtuvieron de una mina ubicada en Turquía, se desconoce la marca de los equipos, costos actualizados al año 2017.

Equipos	Unidad	Costo unitario (€)	Costo total (€)
Cortadora doble tambor	1	2,889,831.00	2,889,831.00
Ademes caminantes	110	141,864.00	15,605,040.00
Ademe de transición	4	197,034.00	788,136.00
Ademe de acceso	2	570,085.00	1,140,170.00
Transportador de cadenas frontal	2	1,681,356.00	3,362,712.00
Transportador de cadenas trasero	2	1,497,458.00	2,994,916.00
Transmisión del transportador	1	840,678.00	840,678.00
Quebradora	1	168,136.00	168,136.00
Estación de bombeo hidráulica	1	394,068.00	394,068.00
Sistema de comunicación	1	157,627.00	157,627.00
Total			28,341,314.00

Tabla 4.6 Costos de los equipos para minado tipo LongWall. (Mustafa, 2017)

VENTILACIÓN

La ventilación en minería de carbón representa un problema de gran extensión, debido a que se puede generar una atmosfera explosiva, la combinación de aire y otros gases en ciertas proporciones (Fig. 4.29.), esto debido a la presencia de polvo y gas metano(grisú) que son generados por las labores de desarrollo y producción de las obras. Se deben tener obras y equipos que permitan el acceso de aire fresco desde superficie hasta los topes o frentes de las obras y redirigirlo hacia obras donde no se encuentre personal y hacia superficie subsecuentemente. Esto se logra a través de las obras dobles o triples que se tienen en la mina, auxiliándose de ventiladores mecánicos, puertas y tapones auxiliares. La ventilación en toda mina es un ente que se debe analizar día a día, ya que a medida que avanza la explotación, se puede encauzar el aire hacia obras no deseadas y perder caudal de aire fresco.

⁵ The cost and effect of powered roof support in longwall installation cost, Mustafa Emre Yetkin, 2017.

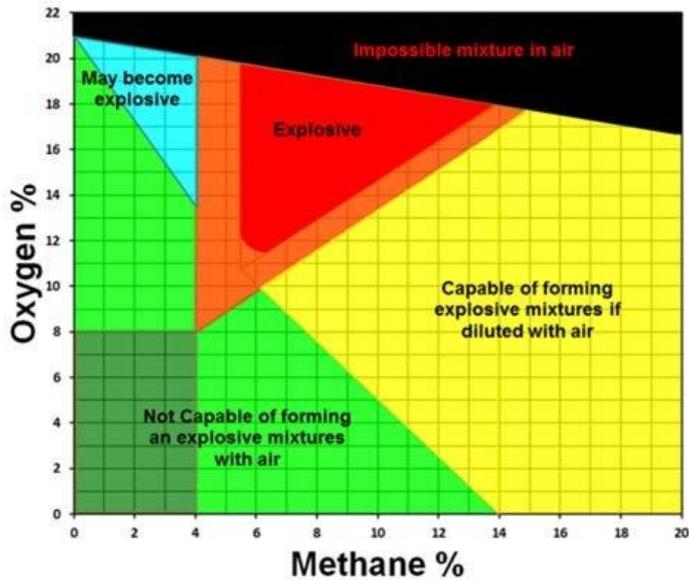


Figura 4.29 Atmosferas posibles bajo diferentes condiciones (Imagen Actualizada de Coward & Jones 1952)

Se debe contar con un sistema de monitoreo con sensores colocados en puntos estratégicos de la mina.

El flujo de aire fresco debe ser conducido a través de los cañones hacia las áreas donde se encuentra minando el carbón, así cuando pasa por el frente de ataque el aire viciado se mezcla con polvo y metano generando aire viciado, este continua su curso, es captado por los cañones de retorno secundarios hacia los cañones

banda o retorno generales y finalmente se extrae por medio de ventilación inversa a través de tiros u obras verticales. (Fig. 4.30)

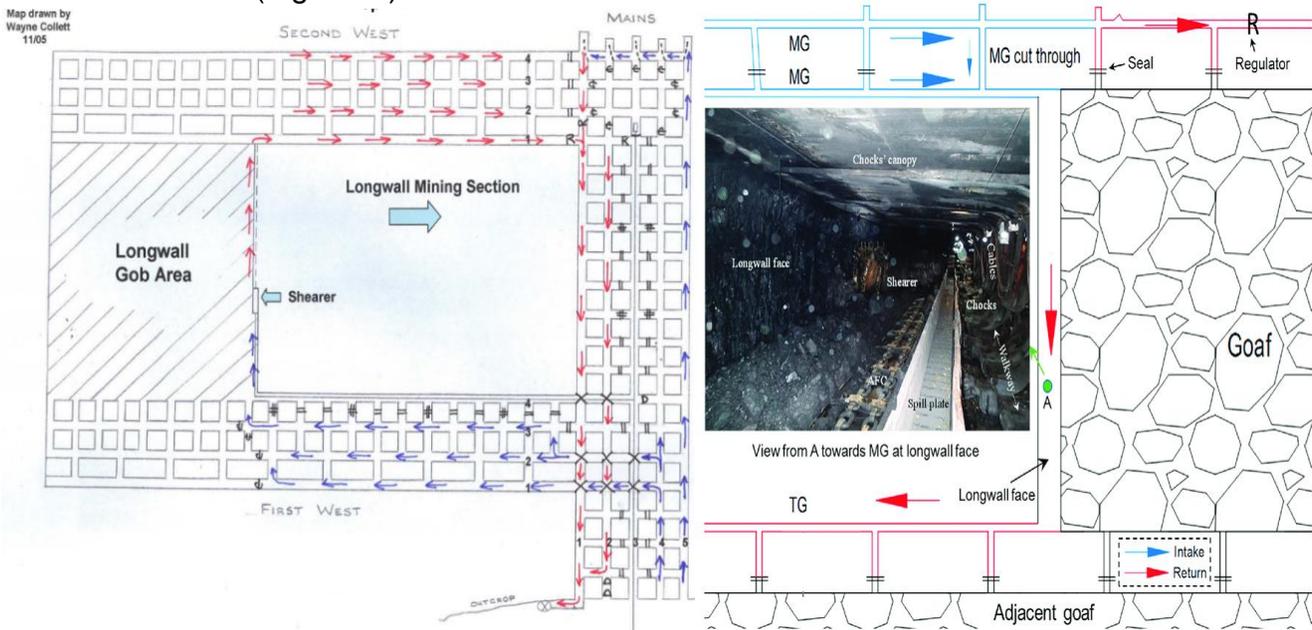


Figura 4.30 Flujos de ventilación en el frente de ataque. (Mine Safety and Health Administration - MSHA)

Desgasificación

Se han desarrollado sistemas de desgasificación que recuperan el gas antes, durante o después de la extracción. Los métodos de desgasificación, junto con la ventilación de la mina, pueden ser el método más económico para mantener bajas las concentraciones de metano en muchas minas. Los métodos de desgasificación se realizan a través de

- a) pozos verticales,
- b) pozos gob
- c) barrenos horizontales
- d) pozos de medición transversal.

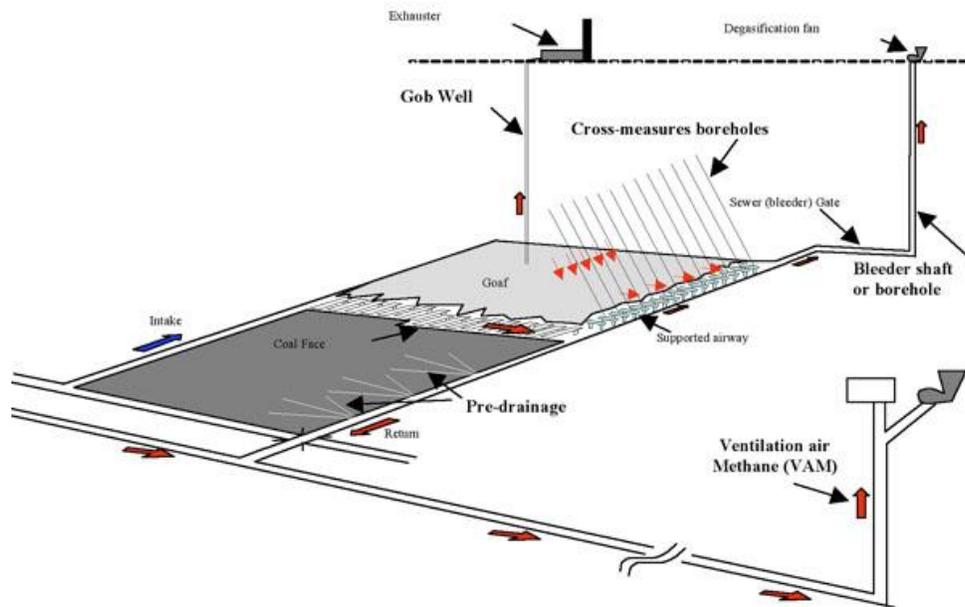


Figura 4.28 Desgasificación del metano. Coal-bed Methane (CBM) drainage from Underground Coal Mines Partha Das Sharma

- (a) Los pozos verticales normalmente se ponen en funcionamiento de 2 a 7 años antes de la extracción y la veta de carbón se fractura hidráulicamente para eliminar gran parte del metano de la veta. Estos recuperan gas de alta calidad de la veta de carbón y los estratos circundantes. La calidad del gas está garantizada en la mayoría de los casos porque el metano no se diluirá con la ventilación de la mina.
- (b) Los pozos gob se refiere al tipo de pozo de recuperación de metano de capas de carbón (CBM) que extrae metano de las áreas minadas de una mina después de que la explotación ha derrumbado los estratos suprayacentes. También se utiliza en el hundido que deja en la parte posterior de la explotación. El metano emitido por los estratos fracturados fluye hacia el pozo y sube a la superficie.

- (c) Barrenos horizontales: se realizan barrenos horizontales en la veta de carbón desde las entradas de desarrollo en la mina. Drenan metano de las áreas no minadas de la veta de carbón poco antes de la extracción, reduciendo el flujo de metano hacia la sección de extracción. Debido a que el drenaje de metano ocurre solo en la veta de carbón extraído y el período de drenaje es relativamente corto, la eficiencia de recuperación de esta técnica es baja.
- (d) Pozos de medición transversal: los pozos de medición transversal se perforan en ángulo con respecto a los estratos, normalmente desde las entradas de la mina existente. Los pozos se colocan estratégicamente sobre las áreas que se van a extraer con el objetivo de pre-drenar los estratos suprayacentes y expulsar el gas del área de minado.

El metano es un producto secundario, se puede recuperar a través del terreno hundido o de los mantos de carbón adyacente, este gas se puede incorporar a gasoductos para su comercialización o se utiliza como fuente de energía para la mina en sí.

MINADOS DE CUARTOS Y PILARES MECANIZADO EN ROCAS

Este método de minado se es aplicable a rocas con características similares al carbón, es aplicable a la extracción del carbón, minas de sal y potasio.

Se puede considerar similar al desarrollo de los cañones y contra-cañones que se detallaron anteriormente. En estos métodos no se utilizan los equipos de frente larga, únicamente mineros continuos con shuttle cars ó camiones de bajo perfil con la capacidad de transferir la carga en la caja a una tolva o a bandas transportadoras.



Figura 4.29 Minero continuo (Sandvik Technology)

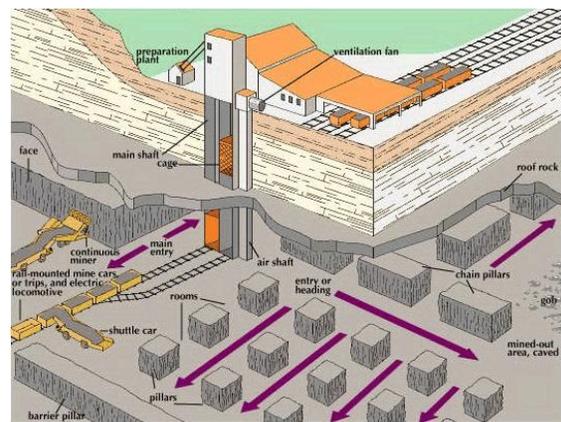


Figura 4.30 Minado de cuartos y pilares (Indian Institute of Technology)

5. CASO PRÁCTICO, ANÁLISIS DE UN CONTRAPOZO RANURA

A continuación, se analiza la excavación de una obra por 3 métodos diferentes⁶:

1. Caso convencional (Perforación y voladura)
2. Medio de excavación mecanizada (Easer)
3. Medio de excavación mecanizada (Robbins)

Como se mencionó anteriormente los contrapozos tienen muchas utilidades dentro de la mina, algunos de ellos son: cara libre para minar un rebaje, conexión entre niveles para servicios o traspaleo de mineral y/o tepetate, etc.

Para este punto se analiza la excavación de un contrapozo que funciona como cara libre, para comenzar las voladuras de producción en el mineral, este se utiliza en minados donde el yacimiento masivos o yacimientos donde el mineral tiene una potencia considerable (mayor a 5 metros) y donde se utilizan los métodos de minado cómo: hundimientos por bloques, hundimientos por subniveles o tumbes por subniveles.

Suponiendo que la geometría y orientación de la obra ya fue analizado, se define como una obra semivertical, que se barrena del nivel o subnivel superior al inmediato inferior, con una geometría cuadrada de 2x2m con 20 m de longitud. La longitud de barrenación está en función del bloque a minar, por lo general en México los tamaños de bloque definidos en estos tipos de yacimiento son aproximadamente 20m de alto.

En la figura 5.1 se observa el dimensionamiento del rebaje a ser minado y la obra mencionada anteriormente para comenzar la explotación de este bloque.

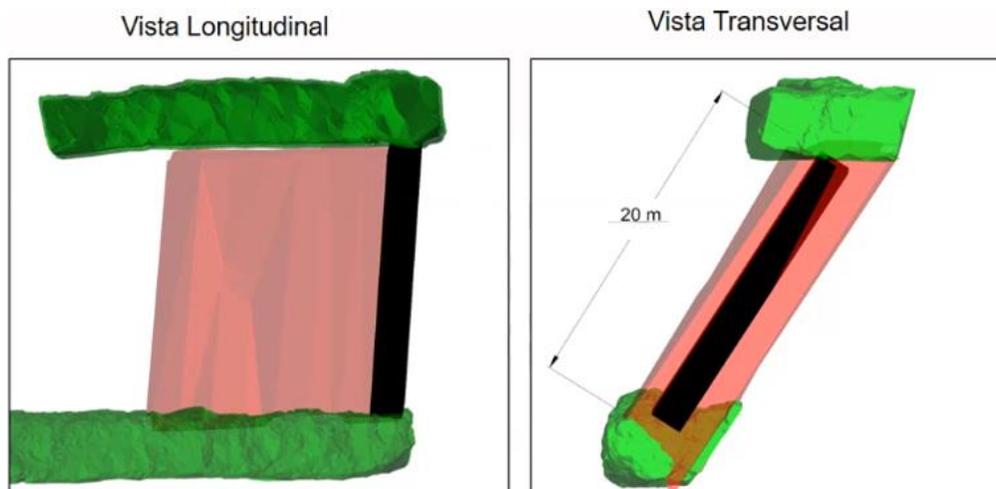


Figura 5.1 Geometría contrapozo ranura

⁶ Todas las eficiencias presentadas a continuación se consideran en terrenos ideales, sin problemas específicos que puedan reducir o incrementar dichos valores

CASO CONVENCIONAL (PERFORACIÓN Y VOLADURA)

La perforación se realiza desde el nivel superior hasta comunicar los barrenos perforados con el nivel inferior, esto se realiza a través de un equipo de perforación larga, como es el SIMBA S7 de Epiroc. (Fig. 5.2)



Figura 5.2 Simba S7 (Epiroc)

El contrapozo se barrena de forma descendente, hasta comunicar todos los barrenos con el nivel inferior.

Cálculo de plantilla de barrenación y costos método convencional

El cálculo está en función del tipo de terreno a barrenar, del diámetro de broca utilizado y de la capacidad del equipo de perforación.

Se propone una cuña de 9 barrenos, 5 barrenos de alivio y 4 cargados y se calcula utilizando las fórmulas de Calvin J. Konya

Un diámetro comúnmente utilizado para los barrenos de alivio es de 4.5" y barrenos cargados de 2.5"

Para el diámetro equivalente

$$D_H = d_H \sqrt{N} \quad (5.1)$$

Donde:

- D_H : Diámetro equivalente de un solo barreno (mm)
- d_H : Diámetro de los barrenos vacíos (mm)
- N : Número de barrenos

$$D_H = 4.5" \left(\frac{2.54cm}{1"} \right) \sqrt{5}$$

$$D_H = 25.55 \text{ cm}$$

El primer cuadro de barrenos se localiza a una distancia B1 del centro

$$B1 = 1.5D_H \tag{5.2}$$

$$B1 = 1.5 * 25.55cm = 38.325 \text{ cm}$$

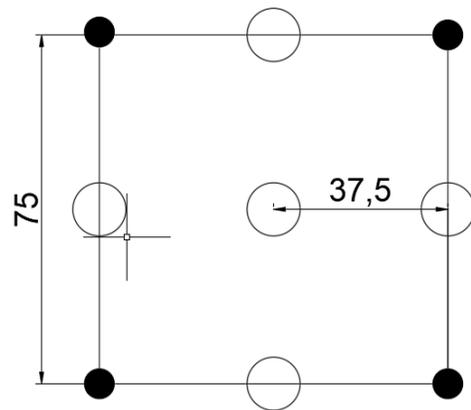
El tamaño del cuadro central de la cuña se calcula:

$$tc = 2B1 \tag{5.3}$$

$$tc = 2 * 38.325cm = 76.65cm$$

Figura 5.3 Diseño de cuña.

De manera práctica el tamaño del cuadro central de la cuña se estima en 75cm, por lo tanto, el primer cuadro es la mitad, siendo 37.5cm.



$$\tag{5.4}$$

Para B2

$$\begin{aligned} B2 &= 2.12 D_H \\ B2 &= 2.12(25.55cm) \\ B2 &= 54.16 \text{ cm} \rightarrow 55cm \end{aligned}$$

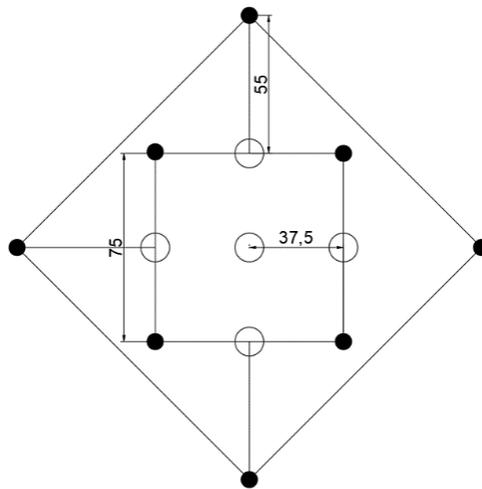


Figura 5.4 Cuña, 2do Cuadro.

Para B3

$$B3 = 4.5D_H \quad (5.5)$$

$$B3 = 4.5(25.55\text{cm})$$

$$B3 = 114.97\text{cm} \rightarrow 115\text{cm}$$

Para este cuadro se realiza una corrección en el valor de B3, ya que la obra calculada tiene dimensiones de 2x2m, si se utiliza el valor de 115cm entonces se está sobredimensionando el tamaño de la excavación para su propósito de evaluación. Por lo que el valor de B3 se reduce a 80cm para alcanzar una geometría final deseada.

Cuadro No.	1	2	3
B	1.5D _H	2.12 D _H	4.5 D _H
B	37.5 cm	75 cm	80 cm

Tabla 5.1 Corrección para ajustar plantilla

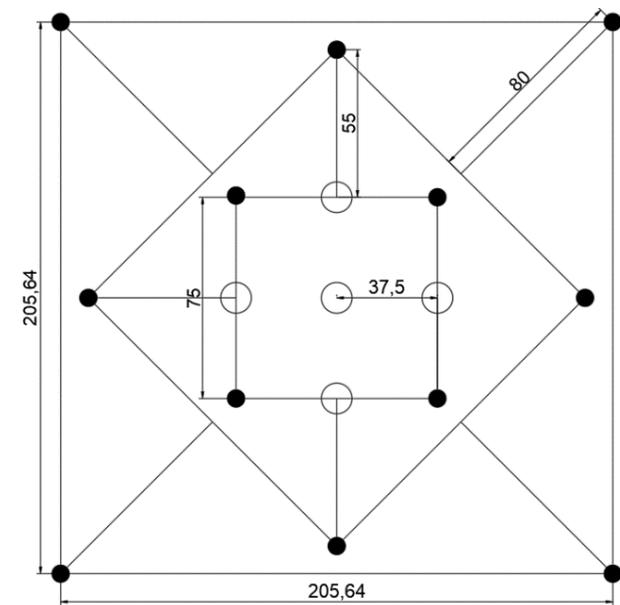


Figura 5.5 Diseño de la plantilla de barrenación

El cargado y la voladura puede realizarse de 2 maneras:

- 1 evento
- 2 o más eventos

El número de eventos está en función del tipo de roca, equipo de perforación, diámetro de perforación, tipo de explosivos y geometría de la obra.

VOLADURA 1 EVENTO

Para este caso la voladura se debe apoyar de 3 iniciadores por barreno, divididos por 2 tacos intermedios. El poblado de los barrenos o la secuencia de iniciación es la siguiente:

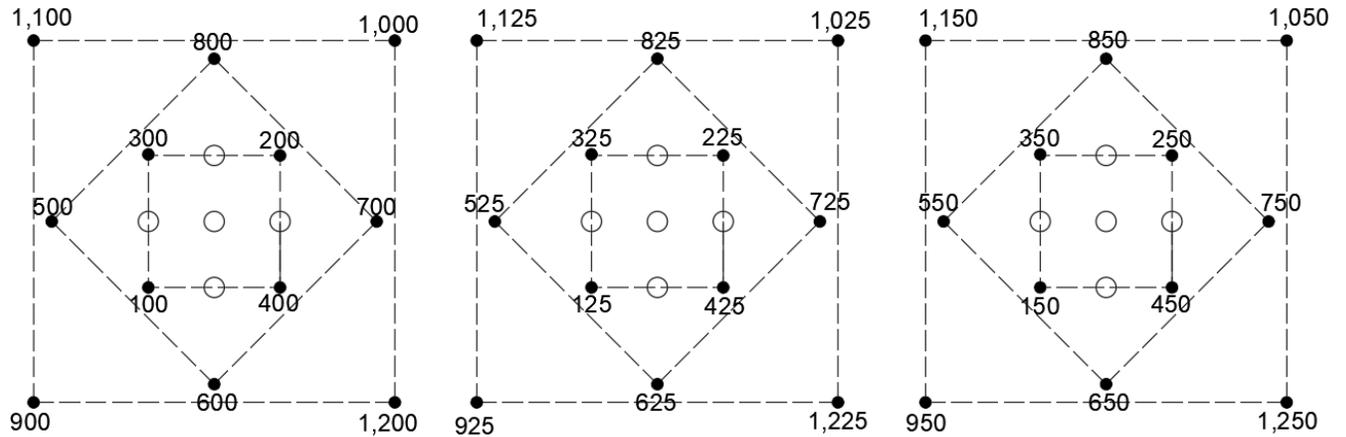


Figura 5.6 Tiempos de voladura en 1 evento

La figura de la izquierda representa los barrenos de la parte inferior del contrapozo, la intermedia representan la parte intermedia del contrapozo y a su vez la figura derecha representa el cargado de la parte superior del contrapozo. Los tiempos de iniciación en cada parte del barreno se representan en milisegundos [ms]

El procedimiento para el cargado de este tipo de barrenos es el siguiente:

1. El cargado se realiza desde la parte superior del rebaje
2. Se taponea el fondo del barreno
3. Se coloca un tapón de grava de aproximadamente 50cm
4. Se introduce la carga de fondo cebada con su respectivo iniciador
5. Se coloca el agente explosivo (carga de columna)
6. Se introduce un taco intermedio de 50 cm y se repite el proceso
7. Por último, el taco final o superior debe ser de aproximadamente 1.0 m de grava.

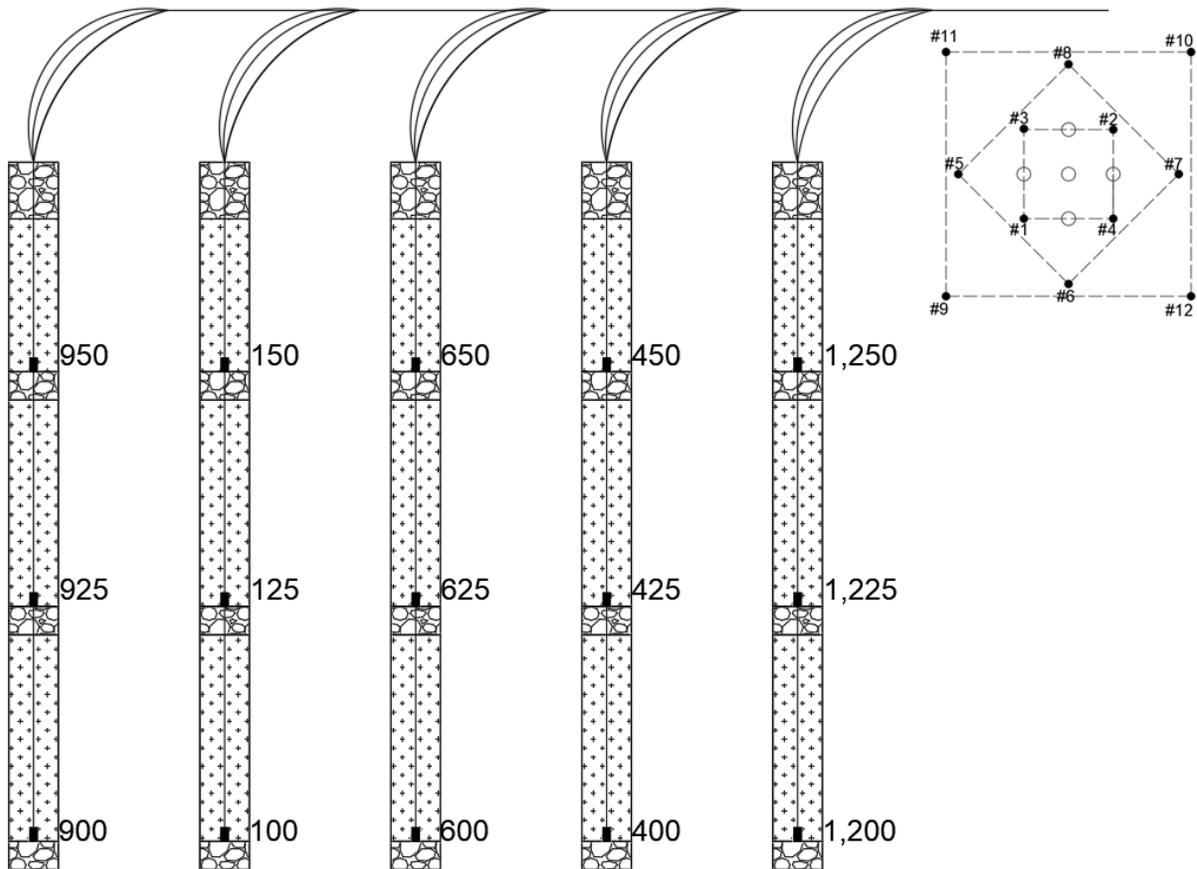


Figura 5.7 Cargado de barrenos 1 evento o 1 voladura

En la Figura 5.7 se muestra el cargado de los barrenos #9, #1, #6, #4 y #12 respectivamente.

Debido a las dimensiones del contrapozo, y del diámetro de las caras libres (barrenos vacíos) no se recomienda utilizar esta alternativa, esta tiene una mayor probabilidad de que se produzca apelmazamiento en la voladura, por este motivo no se profundizará más esta alternativa.

VOLADURA EN 2 O MÁS EVENTOS

Es común encontrar que, en obras como estas, mayores a 10m de longitud la voladura se seccione en 2 o más eventos, esto quiere decir que para este caso se carga una porción inferior del contrapozo, entonces se dispara, se vuelve a repetir este proceso según la geometría de la obra y las condiciones de la roca.

Para este caso se secciona la voladura en 3 eventos. El retardo de los iniciadores entre cada barreno es de 100ms, esto le da el tiempo suficiente para que cada parte de la voladura trabaje adecuadamente y se obtengan resultados favorables.

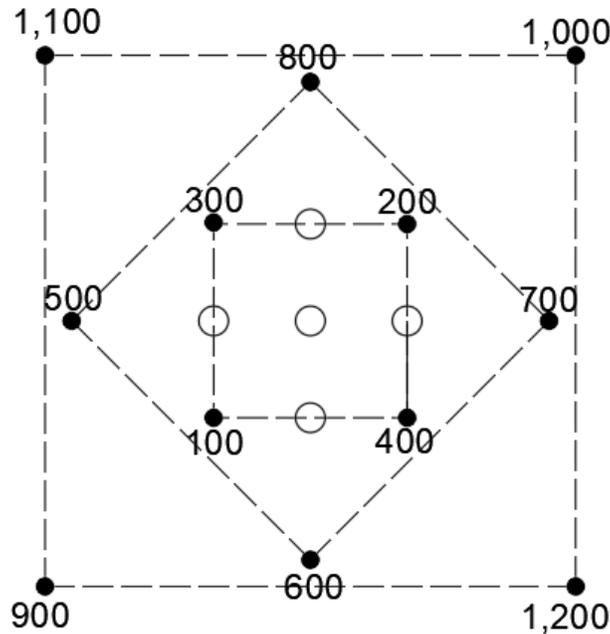


Figura 5.8 Tiempos por barreno para cada evento

El procedimiento para este caso es:

1. El cargado se realiza desde la parte superior del rebaje
2. Se secciona el barreno en 3 partes iguales para realizar 3 eventos
3. Se taponea el fondo del barreno
4. Se coloca un tapón de grava de aproximadamente 50cm
5. Se introduce la carga de fondo cebada con su respectivo iniciador
6. Se coloca el agente explosivo (carga de columna)
7. Se introduce un taco entre 50cm a 1.5m
8. Se realiza la voladura
9. Se esperan condiciones adecuadas de ventilación
10. Se repite el procedimiento con la parte inmediata superior "n" veces.

Estas ligeras desviaciones no suponen un problema al momento de los resultados

El principal problema en la barrenación de contrapozos o chimeneas de estas dimensiones, es la desviación que ocurre en los barrenos, esto se puede ser atribuido a una mala operación del equipo de barrenación, o por las condiciones in situ de la roca, tales como, anisotropía buzando en direcciones favorables para desviar la tubería de barrenación.

También se puede encontrar roca fragmentada o zonas arcillosas pueden atascar la sarta de barrenación, así como aumentar el tiempo de barrenación y por ende retrasar todo el ciclo de la obra. Las desviaciones en los barrenos pueden ser tan grandes que pueden llegar a intersectarse ocasionando que los mismos se conecten, los barrenos intersecados no deben cargarse, se deben de considerar disfuncionales y se debe realizar otro barreno. Un levantamiento topográfico otorga la información necesaria para conocer la situación de cada barreno dentro de la plantilla, y como es que fueron barrenados, en la figura 5.11 (Izquierda) se observa la desviación que surge a partir de los problemas planteados anteriormente.

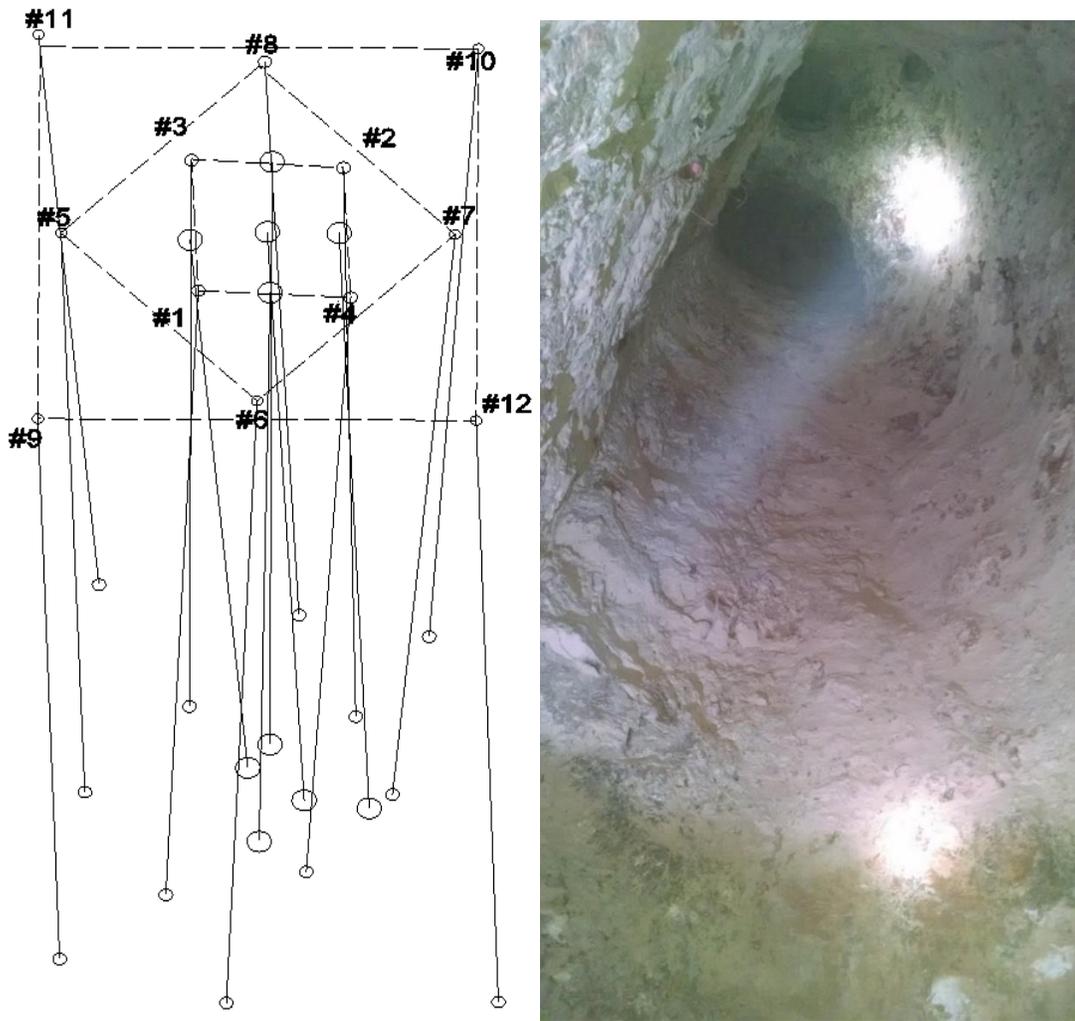


Figura 5.11 Desviación de los barrenos en su longitud total (Izquierda) Mal resultado de contrapozo (Derecha)

La desviación que tienen los barrenos ocasiona directamente perdida del paralelismo, situación que se debe evitar completamente, esto ocasiona que los explosivos no trabajen de manera adecuada, exista una sub o sobre excavación, daño más grande a la roca debido a la cercanía que pueden tener los barrenos, en la peor situación esto puede llegar a ocasionar que se pierda la obra, por una voladura quedada, no se pueden reutilizar estos barrenos y se necesita que se barre completamente otro contrapozo o chimenea.

En el terreno, se encuentra una situación como se muestra en la Fig. 5.12, en la parte superior es donde se realiza el rompimiento de la chimenea, en cuanto a la parte inferior es el nivel o subnivel donde los barrenos comunican.

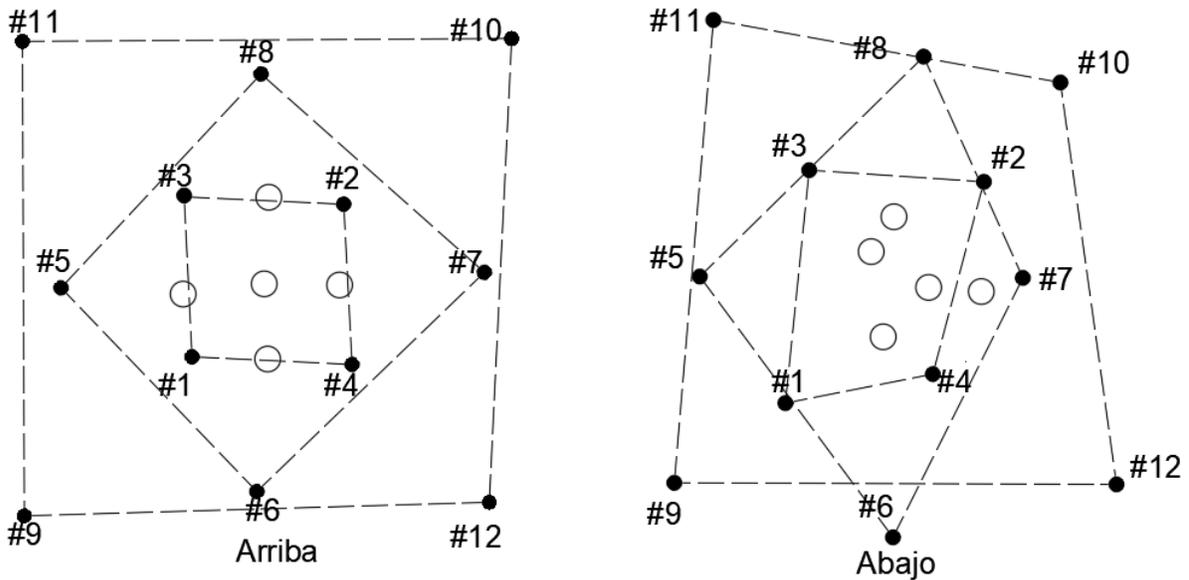


Figura 5.12 Barrenos vistos desde el rompimiento (izquierda) y en intersección con la obra inferior (Derecha)

Aquí también se puede apreciar las desviaciones y las complicaciones que estas causan en la plantilla de barrenación, teniendo una situación como está es necesario plantearse y realizar algún estudio complementario para continuar con la etapa de cargado y voladura o considerar la opción de realizar nuevamente la barrenación para obtener mejores resultados. Un resultado desfavorable, producto de un mal cargado o una mala barrenación se muestra en la Fig. 5.11 (Derecha)

COSTOS Y RENDIMIENTOS MÉTODO CONVENCIONAL

Los costos asociados para este caso en particular son los del explosivo, y son:

El costo por unidad y los explosivos utilizados son:

Concepto	Costo	
Alto explosivo (2"x16")	49	Dls/Caja
	25	Pzas/caja
	1.96	Dls/pza
ANFO Regular	21	Dls/bulto
Iniciadores	20.5	Dls/pza

Tabla 5.2 Costos explosivos

Para determinar la cantidad de agente explosivo en un barreno es necesario comparar el volumen del barreno con el volumen que tiene 1 bulto de explosivo.

Para el volumen de un cilindro

$$V = \pi r^2 * h, \quad \text{donde el diámetro } D = 2.5" \quad (5.6)$$

$$V = \pi \left(\frac{6.35 \text{ cm}}{2} \right)^2 * (2000 \text{ cm} - 100 \text{ cm}_{\text{taco}}) = 60,171.5 \frac{\text{cm}^3}{\text{barreno}}$$

Un costal de agente explosivo tiene una masa de 25 km y una densidad de 0.85 g/cm³, su volumen es:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{25,000 \text{ g}}{\frac{0.85 \text{ g}}{\text{cm}^3}} = 29,411.8 \frac{\text{cm}^3}{\text{costal}}$$

El número de costales por barreno es:

$$\#Bultos = \frac{V_{\text{barreno}}}{V_{\text{explosivo}}} = \frac{60,171.5 \frac{\text{cm}^3}{\text{barreno}}}{29,411.8 \frac{\text{cm}^3}{\text{costal}}} = 2 \frac{\text{bulto}}{\text{barreno}} \quad (5.7)$$

El costo por voladura total de la chimenea es:

Concepto	Cantidad por barreno	# Barrenos	Total, de unidades	Costo unitario [DLS]	Total [DLS]
Alto explosivo	3	12	36	1.96	\$70.56
Agente explosivo	2	12	24	21	\$504.00
Iniciador Electrónico	3	12	36	20.5	\$738.00
				Total	\$1,312.56

Tabla 5.3 Costos por voladura total de chimenea

Las características de operación del equipo son las siguientes:

Simba S7		
Costo	740,000	DLS
Forecast	22,000	m/año
	2,000	h/año ⁷
Vel. Perforación	0.80	m/min
Vida útil	10	años
Valor residual	5	%
Tasa anual mantenimiento	6	%
Tasa de interés	8	%
Costo anual	173,900	\$/año
Costo/metro	7.905	\$/m

Tabla 5.4 Características operación equipo barrenación larga

Los costos propios del equipo son:

1. Costo propio del equipo
2. Acero de perforación
3. Energía

Costos adicionales, como consumo de diésel y consumo operativo no se consideran debido a su gran variabilidad.

El costo anual se puede calcular:

$$\text{Costo anual} = \text{Costo del equipo} \left(\frac{1}{\text{vida útil}} + t. \text{ anual mantenimiento} + t. i. - \frac{\text{valor residual}}{\text{años}} \right) \quad (5.8)$$

$$\text{Costo anual} = 740,000 \left(\frac{1}{10} + \frac{6}{100} + \frac{8}{100} - \frac{5}{100 * 10} \right) = 173,900 \frac{\$}{\text{año}}$$

$$\frac{\text{Costo}}{\text{metro}} = \frac{\text{Costo anual}}{\text{Forecast m/año}}$$

$$\frac{\text{Costo}}{\text{metro}} = \frac{173,900 \frac{\$}{\text{año}}}{22,000 \frac{\text{m}}{\text{año}}} = 7.905 \frac{\$}{\text{m}}$$

⁷ Medido en el horómetro de percusión

El acero que requiere el equipo de perforación larga, consta de la sarta de perforación, entre esta se encuentra la broca, barras de 6ft, zanco que se une a la perforadora, y junto a él se utiliza el cople para roscar las barras y transmitir la energía de la perforadora al zanco y hacia las barras.

El rendimiento y costos de dichos aceros es:

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pza	Unidades/cp.	Total
Broca	700	80	1	0.49	\$39.20
Cople	1,400	40	1	0.25	\$10.00
Barra 6'	1,400	100	12	2.91	\$291.00
Concepto	Rendimiento [h]	Costo unitario [DLS]		Unidades/cp.	Total
Zanco	150	120		0.05	\$6.00
				Total	\$346.00 DLS

Tabla 5.5 Rendimiento acero de barrenación

Considerando el contrapozo anterior con 17 barrenos, con 20 m de longitud por barreno, la longitud de perforación total es de 340m por contrapozo. Asumiendo este dato se estima costo asociado al acero utilizado para realizar dicha obra, no se consideran problemas operativos que pueden presentarse, como una mala operación que dañe el zanco y necesite ser cambiado o cruzar alguna zona de falla que pueda atorar la broca y las barras dentro del barreno y por lo tanto perder dicho acero.

$$\text{Costos asociados} = \frac{\text{Rendimiento}[m]}{\text{metros de obra}} * \frac{\text{pzas}}{\text{cp}} * \text{Costo unitario} \quad (5.9)$$

$$\text{Costo broca} = \frac{340m}{700m} * 1pza * \frac{80\$}{pza} = 39\$$$

$$\text{Costo cople} = \frac{340m}{1400m} * 1pza * \frac{40\$}{pza} = 10\$$$

Para el caso de las barras, ya que son barras de 1.80m de longitud y los barrenos que se requieren son de 20m, se requieren 12 barras por barreno para perforar la totalidad del barreno.

$$\text{Costo barra} = \frac{340m}{1400m} * 12pza * \frac{100\$}{pza} = 291\$$$

El rendimiento del zanco se considera en horas percutidas, con ese rendimiento y la velocidad de perforación se calcula el costo asociado al zanco

$$\text{Costo zanco} = \frac{340m}{\frac{0.8m * 60}{\text{min}}} = \frac{7.1h}{150h} * 1pza * \frac{120\$}{pza} = 6\$$$

Las especificaciones técnicas de este equipo indican que su consumo de energía eléctrica es de 100 kWh, asumiendo que el tiempo para realizar toda la barrenación del contrapozo es cercano a las 12 horas, 8 horas aproximadamente en barrenación, y 4 horas en maniobras y posicionamiento.

Concepto	Consumo [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	Unidades/cp. [h]	Total [\$mxn]
Energía kWh	100	1.5	12	\$1,800.00

Tabla 5.6 Costos asociados al consumo de energía, equipo de barrenación larga

El costo del equipo es:

$$\text{Costo equipo} = 7.905 \frac{\$}{m} * 304 \frac{m}{cp} = 2,687.55 \frac{\$}{cp} \quad (5.10)$$

En resumen, el costo total aproximado para realizar un contrapozo utilizando un equipo de barrenación larga es:

CONCEPTO	Costo por cp. [DLS]
EQUIPO	\$2,687.55
ACERO	\$345.67
ENERGÍA	\$90.00
EXPLOSIVOS	\$1,312.00
TOTAL	\$4,435.21

Tabla 5.7 Costos asociados P&V

El tiempo que se considera para realizar dicha obra es el tiempo de preparación del sitio, que conlleva, instalación de servicios, traslado del equipo, amacice, ventilación entre otras, también se considera el tiempo de perforación, el tiempo de cargado de explosivos, considerando las 3 fases anteriormente mencionadas, y tomando en cuenta que cada voladura se debe realizar en 1 turno, en México los turnos son de 8 o 12 horas, para este caso se considera de 12 horas.

Tiempo de obra		
Preparación	2	h
Perforación	12	h
Cargado y voladura	36	h
Total	50	h

Tabla 5.8 Tiempos estimados en realizar la obra con P&V

MEDIO DE EXCAVACIÓN MECANIZADA (EASER)

Este equipo puede excavar en 3 formas diferentes.

1. Boxhole
2. Raise boring convencional
3. Down reaming

Debido al diámetro de la obra excavada este tiene que trabajar en raise boring convencional, este se analiza de igual manera que el método anterior. Rimado de 1.5 m de diámetro

Las características del equipo son:

Easer		
Costo	1,250,000.00	DLS
Forecast	732	m/año
	5,500	h/año
Vel. excavación	0.80	m/h
Vida útil	10	años
Valor residual	5	%
Tasa anual mantenimiento	6	%
Tasa de interés	8	%
Costo anual	293,750.00	\$
Costo/metro	401.30	\$/m

Tabla 5.9 Características equipo de excavación mecanizada tipo Easer

Para este caso el acero que requiere este equipo consta de una broca tricónica, cómo se mencionó anteriormente es utilizada para realizar los barrenos pilotos de estos equipos, el tamaño de la tubería puede variar, pero una longitud nominal es de 5', o 1.52m, ya que es una obra relativamente corta para estos equipos (<40m) puede trabajar sin estabilizadores que se colocan cada 7 u 8 tuberías. Utiliza una rima, que es la cabeza de corte donde tienen cortadores como medio de desgarrar de la roca, para este diámetro la rima que utiliza y el número de cortadores son los siguientes:

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas.	Unidades/cp.	Total [DLS]
Rima	5,500	\$150,000.00	1	0.004	\$545.45
Tricónica	700	\$1,000.00	1	0.029	\$28.57
Tubería	5,500	\$6,200.00	14	0.004	\$315.64
Cortadores	700	\$2,500.00	14	0.029	\$1,000.00
				Total	\$1,889.66

Tabla 5.10 Costos y rendimientos del acero, equipo de excavación mecanizada

Los costos asociados para esta obra en particular se pueden calcular con la ecuación 5.9:

$$\text{Costo rima} = \frac{20m \text{ obra}}{5,500m} * 1pza * 150,000 \frac{\$}{pza} = 545.45\$$$

$$\text{Costo tricónica} = \frac{20m}{700m} * 1pza * 1,000 \frac{\$}{pza} = 28.57\$$$

$$\text{Costo tubería} = \frac{20m}{5,500m} * 14pzas * 150,000 \frac{\$}{pza} = 315.64\$$$

$$\text{Costo cortadores} = \frac{20m}{700m} * 14pzas * 2,500 \frac{\$}{pza} = 1,000\$$$

Las especificaciones técnicas de este equipo indican que su consumo de energía eléctrica es de 185 kWh, el tiempo de excavación es:

$$t_{exc} = \frac{20m}{0.8 \text{ m/h}} = 25h$$

Concepto	Consumo [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	Unidades/cp. [h]	Total [\$ mxn]	Total [\$ DLS]
Energía kWh	185	1.50	25	6,938	346.88

Tabla 5.11 Costos asociados al consumo de energía, equipos de excavación mecanizada

En resumen, el costo total aproximado para realizar un contrapozo utilizando un equipo de excavación mecanizada sobre neumáticos es:

CONCEPTO	Costo por cp. [DLS]
EQUIPO	\$8,025.96
ACERO	\$1,889.66
ENERGÍA	\$346.88
TOTAL	\$10,262.49

Tabla 5.12 Costos asociados excavación mecanizada equipo Easer

El tiempo necesario para preparar el equipo, ya que este se transporta sobre neumáticos y los servicios están a pie de obra es casi nulo, un tiempo extra que se añade es al momento de colocar la rima, aproximadamente 8 horas, para comenzar el rimado ascendente.

Tiempo de obra		
Preparación	10	h
Excavación	25	h
Total	35	h

Tabla 5.13 Tiempos estimados de excavación

MEDIO DE EXCAVACIÓN MECANIZADA (RAISE BORING MACHINE)

La máquina contrapocera o coloquialmente conocida como “Robbins” es capaz de operar en múltiples modos según la especificación o modelo del equipo, para este caso en particular se analiza el equipo Epiroc 53RH, un equipo de bajo perfil, ideal para ingresar al interior de la mina, capaz de alcanzar rimados de 600m de longitud, barreno piloto de 11” de diámetro. Este equipo puede realizar la obra en cuestión en modo Boxhole. Las características del equipo son:

Robbins 53RH		
Costo	1,250,000.00	DLS
Forecast	2,000	m/año
	5,000	h/año
Vel. excavación	0.70	
Vida útil	10	años vida útil
Valor residual	5	%
Tasa anual mantenimiento	6	%
Tasa de interés	8	%
Costo anual	293,750.00	\$
Costo/metro	146.88	\$/m

Tabla 5.14 Características equipo excavación mecanizada tipo raise boring



Figura 5.13 Robbins 34RH, <https://www.epiroc.com/en-uk/products/raiseboring/robbins-34rh>

Este equipo, al igual que el Easer utiliza el mismo sistema de perforación, broca tricónica, rima y cortadores. Los costos asociados al equipo son:

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas.	Unidades/cp.	Total [DLS]
Rima	5,500	\$150,000.00	1	0.004	\$545.45
Tricónica	700	\$1,000.00	1	0.029	\$28.57
Tubería	5,500	\$6,200.00	14	0.004	\$315.64
Cortadores	700	\$2,500.00	14	0.029	\$1,000.00
				Total	\$1,889.66

Tabla 5.15 Costos y rendimientos acero, equipo raise boring machine

Las especificaciones técnicas de este equipo indican que su consumo de energía eléctrica es de 300 kWh, el tiempo de excavación es:

$$t_{exc} = \frac{20m}{0.7 \text{ m/h}} = 29h$$

Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	Unidades/cp. [h]	Total [\$ mxn]	Total [\$ DLS]
Energía kWh	300	1.50	29	12,857	642.86

Tabla 5.16 Costos asociados al consumo de energía, equipos de excavación mecanizada RBM

En resumen, el costo total aproximado para realizar un contrapozo utilizando un equipo de excavación mecanizada del tipo raise boring, trabajando en Boxhole es:

CONCEPTO	Costo por cp.	Tiempo de obra	
EQUIPO	\$2,937.50	preparación	14 h
ACERO	\$1,889.66	Excavación	29 h
ENERGÍA	\$642.86	Total	43 h
TOTAL	\$5,470.02		

Tabla 5.17 Costos y Tiempos estimados excavación con RBM

Este equipo a diferencia de los anteriores, requiere más tiempo de preparación, ya que requiere una pileta que alimente el equipo, se requiere instalar una planta de energía y una cabina para operar el equipo, sumando a esto el tiempo de traslado de estos equipos es relativamente lento, ya que deben ser amadrinados y se transporta en orugas. En resumen, los costos y los tiempos con diferentes equipos necesarios para realizar 1 obra como la es el contrapozo de estudio se resumen en las siguientes gráficas

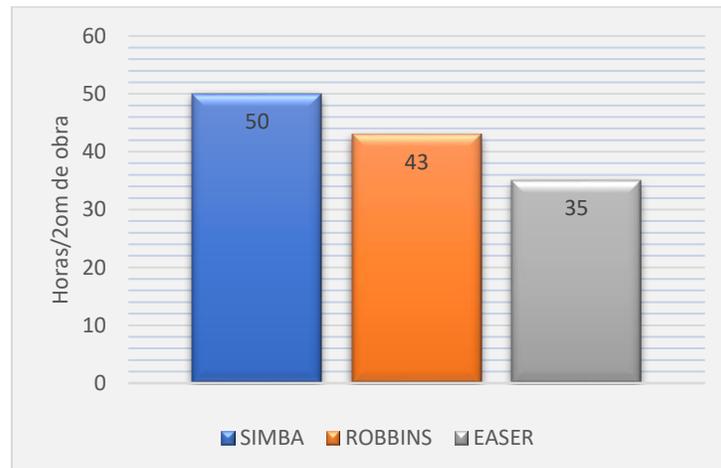


Figura 5.14 Tiempo en horas para realizar contrapozo ranura, diferentes métodos



Figura 5.15 Costo en dólares para realizar contrapozo ranura, diferentes métodos

PROYECCIONES A DIFERENTES AÑOS (1-10 AÑOS)

Para realizar un análisis complementario, se toman en cuenta los Forecast de los 3 equipos, y suponiendo que realizan la misma obra toda su vida operativa se proyectan los costos y los metros de obra que pueden realizar. Los números de piezas se calculan mediante los rendimientos y Forecast anuales.

COSTOS A 1 AÑO

P&V

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Broca	700	\$80.00	32.00	\$2,560.00	
Cople	1,400	\$40.00	16.00	\$640.00	
Barra 6'	1,400	\$100.00	192.00	\$19,200.00	
Concepto	Rendimiento [h]	Costo unitario [DLS]		Total	
Zanco	150	\$120.00	14	1,680	
			Total	\$24,080.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	100	1.5	2,000	\$300,000.00	\$15,000.00

Tabla 5.18 Costos anuales en acero y energía para P&V

El costo del explosivo:

$$\#obras = \frac{22,000m}{\frac{año}{\frac{340m}{obra}}} = 64.7 \rightarrow 65 obras \quad (5.11)$$

$$Costo = 65 obras * 1312 \frac{\$}{obra} = 84,894.12 \$[DLS]$$

CONCEPTO	Costo anual [DLS]
EQUIPO	\$173,900.00
ACERO	\$24,080.00
ENERGÍA	\$15,000.00
EXPLOSIVOS	\$84,894.12
TOTAL	\$297,874.12

Tabla 5.19 Costo anual P&V

EASER

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Rima	5,500	\$150,000.00	1	\$150,000.00	
Tricónica	700	\$1,000.00	2	\$2,000.00	
Tubería	5,500	\$6,200.00	14	\$86,800.00	
Cortadores	700	\$2,500.00	14	\$35,000.00	
			Total	\$273,800.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$ mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	185	1.50	5,500	\$1,526,250.00	\$76,312.50

Tabla 5.20 Costos anuales en acero y energía para excavación mecanizada tipo Easer

CONCEPTO	Costo anual [DLS]
EQUIPO	\$293,750.00
ACERO	\$273,800.00
ENERGÍA	\$76,312.50
TOTAL	\$643,862.50

Tabla 5.21 Costo anual Easer

ROBBINS

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Rima	5,500	\$150,000.00	1	\$150,000.00	
Tricónica	700	\$1,000.00	3	\$3,000.00	
Tubería	5,500	\$6,200.00	14	\$86,800.00	
Cortadores	700	\$2,500.00	14	\$35,000.00	
			Total	\$274,800.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$ mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	300	1.50	5,000	\$2,250,000.00	\$112,500.00

Tabla 5.22 Costos anuales en acero y energía para RBM

CONCEPTO	Costo anual
EQUIPO	\$293,750.00
ACERO	\$274,800.00
ENERGÍA	\$112,500.00
TOTAL	\$681,050.00

Tabla 5.23 Costo anual RBM

COSTOS 5 AÑOS
P&V

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Broca	700	\$80.00	158	\$12,640.00	
Cople	1,400	\$40.00	79	\$3,160.00	
Barra 6'	1,400	\$100.00	948	\$94,800.00	
Concepto	Rendimiento [h]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Zanco	150	\$120.00	14	\$1,680.00	
			Total	\$112,280.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	100	1.50	10,000	\$1,500,000.00	\$75,000.00
CONCEPTO	COSTO [DLS]				
EQUIPO	\$869,500.00				
ACERO	\$112,280.00				
ENERGÍA	\$75,000.00				
EXPLOSIVOS	\$412,342.86				
TOTAL	\$1,469,122.86				

Tabla 5.24 Costo 5 años, P&V

EASER

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Rima	5,500	\$150,000.00	1	\$150,000.00	
Tricónica	700	\$1,000.00	6	\$6,000.00	
Tubería	5,500	\$6,200.00	14	\$86,800.00	
Cortadores	700	\$2,500.00	73	\$183,000.00	
			Total	\$425,800.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	Unidades/cp. [h]	Total [\$mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	185	1.50	27,500	\$7,631,250.00	\$381,562.50
CONCEPTO	COSTO [DLS]				
EQUIPO	\$1,468,750.00				
ACERO	\$425,800.00				
ENERGÍA	\$381,562.50				
TOTAL	\$2,276,112.50				

Tabla 5.25 Costos 5 años, Easer

ROBBINS

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Rima	5,500	\$150,000.00	2	\$300,000.00	
Tricónica	700	\$1,000.00	15	\$15,000.00	
Tubería	5,500	\$6,200.00	25	\$157,818.18	
Cortadores	700	\$2,500.00	200	\$500,000.00	
			Total	\$972,818.18	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$ mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	300	1.50	25,000	\$11,250,000.00	\$562,500.00
CONCEPTO	COSTO [DLS]				
EQUIPO	\$1,468,750.00				
ACERO	\$972,818.18				
ENERGÍA	\$562,500.00				
TOTAL	\$3,004,068.18				

Tabla 5.26 Costo 5 años, RBM

COSTOS 10 AÑOS P&V

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Broca	700	\$80.00	315	\$25,200.00	
Cople	1,400	\$40.00	158	\$6,320.00	
Barra 6'	1,400	\$100.00	1,896	\$189,600.00	
Concepto	Rendimiento [h]	Costo unitario [DLS]	Pza	Total	
Zanco	150	\$120.00	14	\$1,680.00	
			Total	\$222,800.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$ mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	100	1.50	20,000	\$3,000,000.00	\$150,000.00
CONCEPTO	COSTO [DLS]				
EQUIPO	\$1,739,000.00				
ACERO	\$222,800.00				
ENERGÍA	\$150,000.00				
EXPLOSIVOS	\$824,685.71				
TOTAL	\$2,936,485.71				

Tabla 5.27 Costo 10 años, P&V

EASER

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Rima	5,500	\$150,000.00	2	\$300,000.00	
Tricónica	700	\$1,000.00	11	\$11,000.00	
Tubería	5,500	\$6,200.00	28	\$173,600.00	
Cortadores	700	\$2,500.00	146	\$366,000.00	
			Total	\$850,600.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	185	1.50	55,000	\$15,262,500.00	\$763,125.00
CONCEPTO	COSTO [DLS]				
EQUIPO	\$2,937,500.00				
ACERO	\$850,600.00				
ENERGÍA	\$763,125.00				
TOTAL	\$4,551,225.00				

Tabla 5.28 Costos 10 años, Easer

ROBBINS

Concepto	Rendimiento [m]	Costo unitario [DLS]	Pzas	Total	
Rima	5,500	\$150,000.00	4	\$600,000.00	
Tricónica	700	\$1,000.00	29	\$29,000.00	
Tubería	5,500	\$6,200.00	51	\$316,200.00	
Cortadores	700	\$2,500.00	400	\$1,000,000.00	
			Total	\$1,945,200.00	
Concepto	Rendimiento [kWh]	Costo unitario [\$/kWh]	[h]	Total [\$mxn]	Total [\$DLS]
Energía kWh	300	1.50	50,000	\$22,500,000.00	\$1,125,000.00
CONCEPTO	COSTO [DLS]				
EQUIPO	\$2,937,500.00				
ACERO	\$1,945,200.00				
ENERGÍA	\$1,125,000.00				
TOTAL	\$6,007,700.00				

Tabla 5.29 Costo 10 años, RBM

A continuación, se muestra las proyecciones de 1 a 10 años, las consideraciones que se tomaron son: El equipo de P&V, tanto como los equipos de excavación mecanizada se dedican únicamente a realizar obras de la misma sección que el ejemplo analizado, en P&V no se realiza un ajuste por posibles obras con malos resultados, el factor de corrección puede ser cercano a 85%, con su ajuste proporcional en costos por realizar nuevamente la obra.

m de obra			
años	P&V	Easer	Robbins
0	0.00	0.00	0.00
1	1,294	732	2,000
2	2,588	1,464	4,000
3	3,882	2,196	6,000
4	5,176	2,928	8,000
5	6,471	3,660	10,000
6	7,765	4,392	12,000
7	9,059	5,124	14,000
8	10,353	5,856	16,000
9	11,647	6,588	18,000
10	12,941	7,320	20,000

Tabla 5.31 metros de obra excavado a 10 años

Se puede observar que el equipo que más metros de obra proporciona, con condiciones ideales de excavación es el tipo Robbins o contrapocera convencional, debido al Forecast que tiene este equipo, aunque los costos en acero son prácticamente los mismo que con el equipo sobre neumáticos su desempeño es mayor, Los costos son mayores en equipos de excavación mecanizada que con el método convencional, incluyendo un costo adicional como son los explosivos, esto es debido al alto costo que tienen las herramientas de corte en las máquinas de excavación mecanizada.

\$ [DLS]			
años	P&V	Easer	Robbins
0	0.00	0.00	0.00
1	297,874.12	643,862.50	681,050.00
5	1,469,122.86	2,276,112.50	3,004,068.18
10	2,936,485.71	4,551,225.00	6,007,700.00

Tabla 5.30 Costos asociados a 10 años

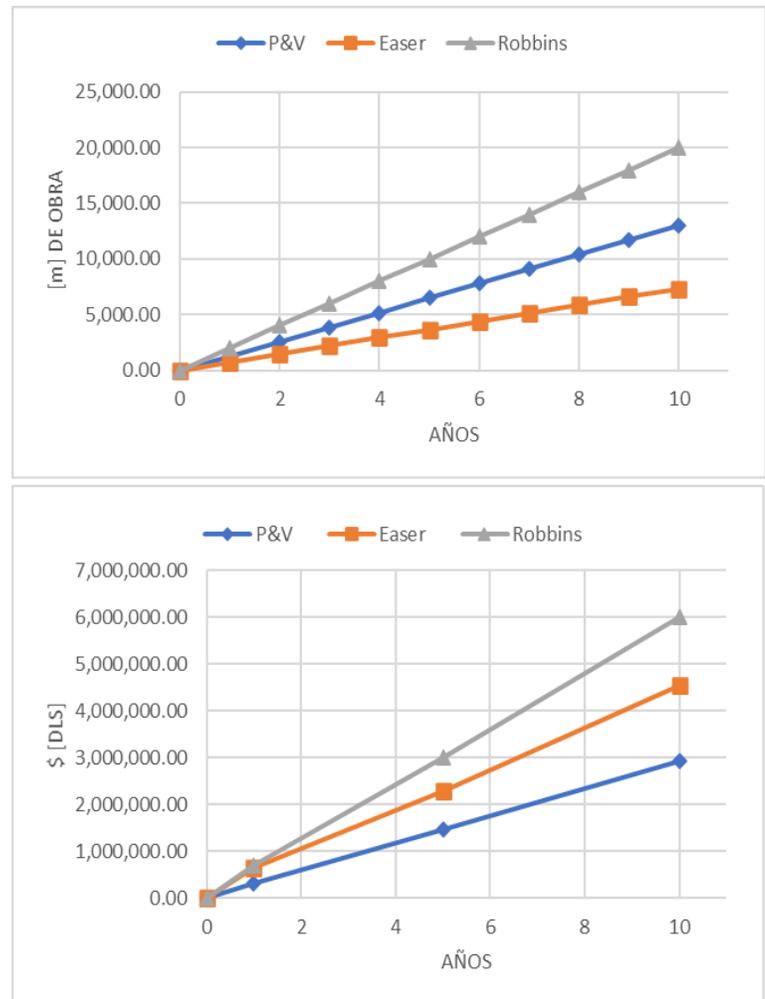


Figura 5.16 Costos y proyecciones de diferentes métodos de excavación

Los costos asociados a cada método se pueden resumir en los siguientes gráficos, para la P&V, se puede observar que el explosivo es una parte considerable en este tipo de excavación, representa aproximadamente el 30% de los costos totales, es por esta razón que las plantillas de barrenación son refinadas hoy en día con softwares especializados. Es importante recalcar que en P&V el equipo analizado, no es utilizado únicamente para este tipo de obras, es ocupado en barrenos de producción lo cuál es su principal función en los métodos de explotación de barrenación larga, los costos de los equipos mecanizados son prácticamente los mismos, el consumo de acero representa aproximadamente el 40% del costo total, mientras que el costo del propio equipo es de aproximadamente 45% del costo, en este tipo de equipos y de excavación una mala operación puede ser determinante en el éxito del proyecto, operativa y financieramente, ya que un mantenimiento correctivo mayor puede llegar a significar un costo más grande al mismo equipo, y los tiempos de entrega de estos equipos pueden llegar a ser de meses o años en función del equipo o partes dañadas.

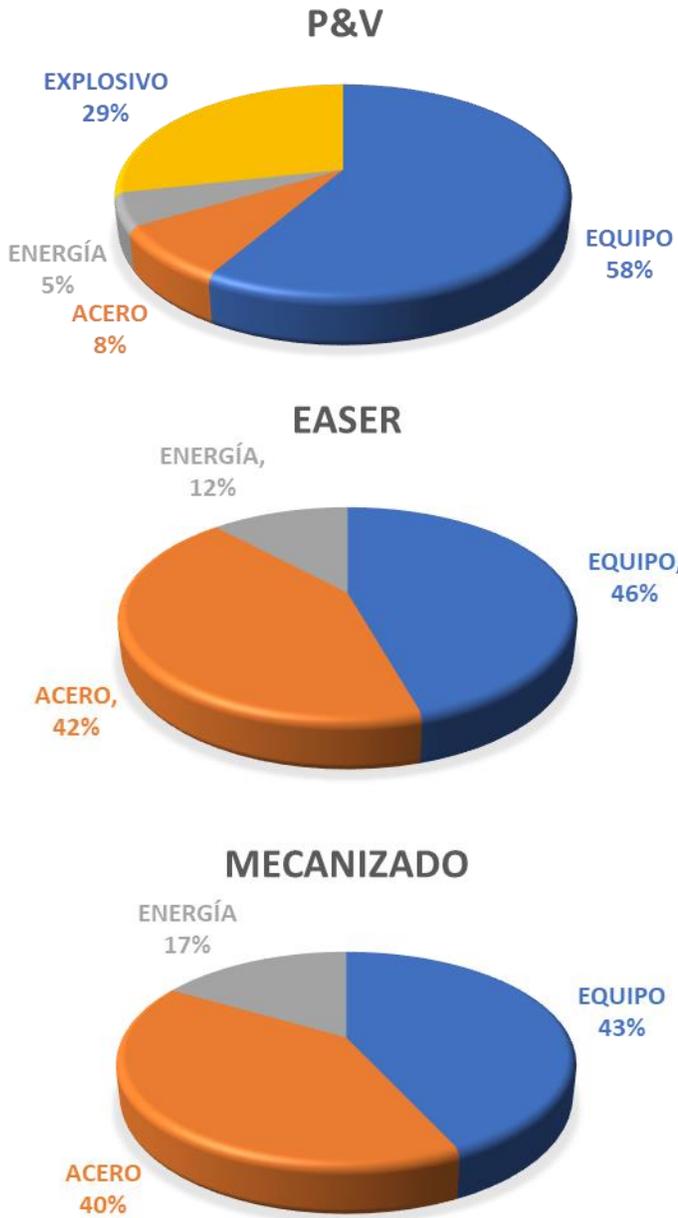


Figura 5.17 Porcentaje de costos asociados a los diferentes equipos.

CALCULOS EQUIPOS TIPO RAISE BORING8

Biling, Copur & Balci, 2014, propusieron una serie de ecuaciones para estimar la fuerza de empuje, torque, y la energía requerida para rimar una cierta obra con diferentes características, y determinar si el equipo propuesto para realizar dicha obra es el adecuado. A continuación se presenta el ejemplo.

Utilizando un equipo tipo Raise boring machine, se pretende realizar un tiro de 200m de longitud y 2.4m de diámetro, la mina se encuentra en una formación de caliza, con una resistencia a la compresión simple de 80MPa, con altos valores de RQD, Utilizando discos cortadores en (V) con diámetro de 30cm con un ángulo de contacto de 90° y una capacidad de carga de 180 kN es seleccionado debido a que el tipo de roca es de un rango medio de RCS y no abrasivo. Se considera que la fuerza de empuje máxima en 1 disco es del orden de 75% de su capacidad de carga. En la mina se operan 2 turnos de 8h c/u. El factor de utilización es del 50%. Se pretende calcular la tasa de avance neta, número de días en terminar el tiro, torque y potencia del equipo y comparar si está en la capacidad del equipo para realizar la obra. La características de la máquina son:

- Velocidad de rotación al rimado: 0-16 rpm
- Velocidad de rimado del barreno piloto: 0-50 rpm
- Funcionamiento máximo de torque: 225 kNm a 7.5 rpm
- Fuerza de rimado: 4159 kN
- Diámetro del tiro: 2.4 m
- Longitud nominal de excavación: 550m
- Potencia instalada: 305 kW
- Peso de la torre principal: 11,500 kg
- Peso de la cabeza de corte: 8000 kg
- Peso de la tubería de perforación: 290 kg/m

Solución: (Aplicado para cortadores Tipo V)

1. La penetración [p] para una revolución en la cabeza de corte se calcula mediante

$$F_N = 4\sigma_c \tan \frac{\varphi}{2} \sqrt{Dp^3 - p^4} \quad (5.12)$$

Donde:

- F_N = capacidad de carga de un disco, $F_N=75\%(180\text{kN})=13500\text{kgf}$
- σ_c = resistencia a la compresión simple, $\sigma_c = 800 \text{ kg/cm}^2$
- φ = ángulo de contacto disco, $\varphi = 90^\circ$
- D = diámetro del disco en cm, $D = 30 \text{ cm}$

⁸ Ejemplo tomado: Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries Bilgin, et.al. EUA, 2014.

Utilizando la fórmula cuadrática general, la penetración calculada es de $p=0.85$ cm/rev, para valores prácticos 0.9 cm/rev

2. Avance teórico neto:

$$\text{Avance teórico neto} = p \left[\frac{\text{cm}}{\text{rev}} \right] * \text{velocidad de rotación}[\text{rpm}] \quad (5.13)$$

$$\text{Avance} = 0.9 \frac{\text{cm}}{\text{rev}} (7 \text{ rpm}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) = 378 \frac{\text{cm}}{\text{h}} \rightarrow 3.78 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

Aplicando los turnos y el factor de utilización del equipo

$$\text{Avance diario} = 3.78 \frac{\text{m}}{\text{h}} \left(16 \frac{\text{h}}{\text{día}} \right) (0.5) = 30.2 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Para calcular el número de días para realizar la obra se considera aproximadamente y $[\Sigma]$

- Transporte y preparación de la máquina = 4 días
- Tiempo de perforación del barreno piloto = 7 días
- Reparaciones = 1 día
- Retrasos por diferentes razones = 2 días
- Desmantelar equipo = 2 días
- Tiempo de excavación= $200\text{m}/30.2\text{m}/\text{día}=6.6$ días
- Tiempo total para terminar la obra= 23 días

3. Verificar la fuerza de empuje del equipo

El número de cortadores puede estar determinado por la cabeza de corte o se puede calcular un aproximado considerando el espaciamiento típico de los cortadores, que es de 8.5cm.

$$\# \text{cortadores} = \frac{\left(\frac{r_{\text{cabeza}}}{2} \right)}{8.5\text{cm}} = \frac{\left(\frac{240\text{cm}}{2} \right)}{8.5\text{cm}} = 14 \quad (5.14)$$

$$\text{Fuerza de rimado} \quad (5.15)$$

= Fuerza total de los discos para una p determinada
 + peso máximo de las tuberías
 + peso de la cabeza de corte

$$F_r = 14(13500 \text{ kgf}) + 290 \left(\frac{\text{kgf}}{\text{m}} \right) 200\text{m} + 8000 \text{ kgf}$$

$$F_r = 255,000 \text{ kgf} \approx 2550 \text{ kN}$$

Fuerza de rimado del equipo es mayor al teórico, por lo que la fuerza de rimado no está sobrepasada (4159 kN > 2550 kN)

4. Verificar el torque, utilizando la ecuación presentada por Homes (1978)

$$\begin{aligned} \text{Torque}_{\text{teórico}} & & (5.16) \\ &= 0.66 \cdot r \cdot \text{núm de cortadores} \cdot f \cdot \text{Fuerza de empuje del disco} \end{aligned}$$

Donde;

r = radio de la cabeza de corte [m]

f = relación de fuerza de giro a fuerza de empuje, para discos cortadores $f=0.15$, para cortadores de botones $f= 0.08$

$$\text{Torque}_t = 0.66(1.2m)(14)(0.15)(135 \text{ kN}) = 224.5 \text{ kNm}$$

Torque del equipo(T) es mayor al teórico, por lo que el torque no está sobrepasado (225 kNm > 224.5 kNm)

5. Verificar la potencia del equipo

Esta se calcula mediante la expresión:

$$\text{Potencia} = 2\pi N T / \eta \quad (5.17)$$

Donde;

- N =Velocidad de rotación del equipo
- T =Torque del equipo
- η = eficiencia

$$\text{Potencia} = 2\pi(7\text{rpm}) / \left(60 \frac{\text{s}}{\text{min}}\right) \left(\frac{224.5\text{kNm}}{0.7}\right) = 235.1 \text{ kW}$$

La potencia teórica es menor a la instalada en el equipo, (235.1 kW < 305 kW), el equipo no está sobrepasado.

Solución para cortadores Tipo CCS (Sección transversal constante)

El mismo problema con roca abrasiva, con RCS de 120 MPa y resistencia a la tensión de 8 MPa. Estos cortadores deben utilizarse en roca dura y abrasiva. Cortadores de 432 mm con 15.9mm de ancho, capacidad de carga de 220 kN, se considera un 75% de su capacidad de carga.

1. Para estimar la penetración para este tipo de discos Rostami & Ozdemir (1993), propusieron un modelo basado en la presión de distribución en toda la periferia del disco en contacto con la roca.

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{R-p}{R}\right) \text{ en radianes} \quad (5.18)$$

Donde:

- R = es el radio del cortador [cm]
- φ = Una constante para la distribución de presión [aproximadamente 0.25]

Calculando la penetración p se obtiene un valor de 0.7 cm/rev

2. *Avance teórico neto* = $p \left[\frac{cm}{rev}\right] * \text{velocidad de rotación}[rpm]$

$$\text{Avance} = 0.7 \frac{cm}{rev} (7 rpm) \left(60 \frac{min}{h}\right) = 294 \frac{cm}{h} \rightarrow 2.94 \frac{m}{h}$$

Aplicando los turnos y el factor de utilización del equipo

$$\text{Avance diario} = 2.94 \frac{m}{h} \left(16 \frac{h}{día}\right) (0.5) = 23.5 \frac{m}{día}$$

Para calcular el número de días para realizar la obra se considera aproximadamente Σ

- Tiempo auxiliar = 16 días
- Tiempo de excavación= 200m/23.5m/día=8.5 días
- Tiempo total para terminar la obra= 25 días

3. Fuerza de empuje

Fuerza de rimado

= *Fuerza total de los discos para una p determinada*
+ *peso máximo de las tuberías + peso de la cabeza de corte*

$$F_r = 14 \text{discos} (22,000 \text{ kgf}) 75\% + 290 \left(\frac{kgf}{m}\right) 200m + 8000 \text{ kgf}$$

$$F_r = 297,000 \text{ kgf} \approx 2,970 \text{ kN}$$

Fuerza de rimado del equipo es mayor al teórico, por lo que la fuerza de rimado no está sobrepasada (4159 kN > 2970 kN)

4. Verificando el torque teórico

$$Torque_{teórico} = 0.66 \cdot r \cdot \text{núm de cortadores} \cdot f \cdot \text{Fuerza de empuje del disco}$$

$$Torque_t = 0.66(1.2m)(14)(0.15)(165 \text{ kN}) = 274.4 \text{ kNm}$$

En este caso el torque del equipo(T) es menor al teórico, por lo que el torque está sobrepasado (225 kNm < 274.5 kNm), para corregir esto, la penetración utilizada debe ser menor a los 0.7 cm/rev calculados previamente, 0.6 cm/rev para este caso.

5. Verificar la potencia del equipo

Esta se calcula mediante la expresión:

$$Potencia = 2\pi N T / \eta$$

$$Potencia = 2\pi(7rpm) / \left(60 \frac{s}{min}\right) \left(\frac{274.4kNm}{0.7}\right) = 287.4 \text{ kW}$$

La potencia teórica es menor a la instalada en el equipo, (287.4.4 kW < 305 kW), el equipo no está sobrepasado.

Solución para cortadores con botones de carburo de tungsteno (6 Hileras)

El mismo problema con roca muy abrasiva, con RCS de 250 MPa. Número de cortadores son 14 con 80 botones por cortador, 9% del cortador está en contacto con la roca al mismo tiempo. Estos cortadores son utilizados usualmente en roca dura y abrasiva. El índice de penetración (Bilgin 1989) (α) se estima presionando un botón sobre una muestra de roca en una prensa hidráulica.

1. Estimar la tasa de avance diario

$$N = 0.09N' \tag{5.19}$$

Donde

- N=Número total de botones efectivos
- N'=Número total de injertos de carburo de tungsteno

$$N = 80botones(14cortadores)(0.09) = 100$$

Índice de penetración para diferentes valores de roca		
RCS [MPa]	Índice de penetración [kgf/mm] Tamaño de injerto < 3mm	Índice de penetración [kgf/mm] Tamaño de injerto > 3mm
30-80	1500-2000	1500-2000
80-150	2000-3000	2000-2500
150-250	3000-4000	2500-3500

Tabla 5.32 Índices de penetración estimados por Bilgin 1989

Fuerza total de rimado (T) para 1 mm de penetración se calcula:

$$T = N \cdot F / d \quad (5.20)$$

$$T = 100 \left(3000 \frac{\text{kgf}}{\text{mm}} \right) = 3000 \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$$

La penetración por revolución:

$$T_{max} = T \cdot p \quad (5.21)$$

Donde T_{max} es la fuerza de rimado de la máquina (4159 kN) y p es la penetración para una revolución de la cabeza de corte

$$p = \frac{4159}{3000} = 1.4 \text{ mm/rev}$$

Ta tasa de avance diario (T_{ad}):

$$T_{ad} = p \cdot \text{rpm} \cdot \text{horas diarias de operación} \cdot \% \text{ de utilización} \quad (5.22)$$

$$T_{ad} = 1.4 \frac{\text{mm}}{\text{rev}} (7 \text{ rpm}) \left(\frac{60 \text{ min}}{\text{h}} \right) \left(16 \frac{\text{h}}{\text{día}} \right) (0.5) = 4704 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \text{ ó } 4.7 \frac{\text{m}}{\text{h}}$$

2. Torque teórico

$$\begin{aligned} \text{Torque}_{teórico} &= 0.66 \cdot r \cdot \text{núm de cortadores} \cdot f \cdot \text{Fuerza de empuje del disco} \\ \text{Torque}_t &= 0.66(1.2\text{m})(14)(0.08)(220 \text{ kN}) = 195.2 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Por lo que el torque del equipo no está limitado.

Como se puede apreciar, los parámetros operativos, así como el tipo de herramienta de corte para la selección de un equipo del tipo Raise boring deben ser previamente calculados para tener una correcta selección del equipo.

6. NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA MINERÍA

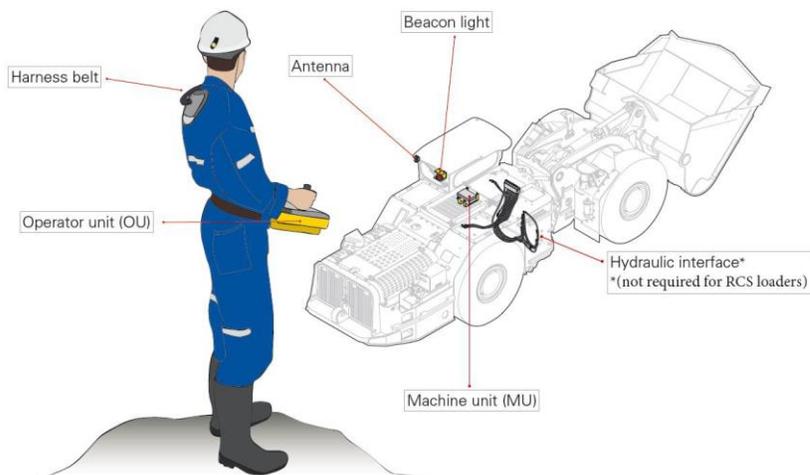
La minería subterránea avanza de una manera gradual hacia operaciones más grandes, mayor producción, mayor profundidad, mayores requerimientos de equipos, entre otras. Motivo por el cual se están desarrollando tecnologías que pueden satisfacer las nuevas necesidades como son mayor producción y productividad, aumento de seguridad operacional, asegurar la continuidad de la operación, entre otras, dentro de la industria minera. Esto conlleva a grandes cambios en que se percibirá la minería, en cuanto a producción, seguridad y otros ámbitos. En este capítulo se mencionan algunas de las tantas tecnologías en desarrollo.

EQUIPOS CON TELEMETRÍA, A BATERÍA, TELEOPERADOS Y AUTÓNOMOS.

Los equipos que actualmente se utilizan dentro de las minas subterráneas, en muchas ocasiones son equipos que han sufrido procesos de reconstrucción una y otra vez, para ser rehabilitados y puestos en operación las veces que sea necesario. Esto hace que los equipos comiencen a quedar obsoletos, debido a la adaptación de nuevas tecnologías que se pueden implementar en estos.

La telemetría, la autonomía y la teleoperación de los equipos tienen tecnología entrelazada, los equipos requieren modificaciones y adaptaciones para sistemas de telecomunicaciones. La telemetría se refiere al monitoreo del equipo, envío de sus condiciones de operación en tiempo real que sirven para retroalimentar el funcionamiento, mantenimiento, productividades del mismo. Toda esta información es enviada mediante sistemas inalámbricos o sistemas de redes que se tienen en la mina subterránea y se comunican hacia superficie.

La teleoperación se refiere al manejo de los equipos a cierta distancia, esta distancia puede variar dependiendo los accesorios e infraestructura que se tengan a la mano, así como al equipo se le puede instalar un sistema de control remoto, donde el operador se encuentra a algunos metros del equipo y lo opera remotamente desde



el lugar de operación, como el equipo puede ser operado desde las oficinas o cuartos de control situados fuera de la mina, a través de cámaras situadas estratégicamente en el equipo, que envían la información en tiempo real.

Figura 6.1 Sistema a control remoto Scoop Tram (García, Epiroc, 2019)

La autonomía de los equipos se refiere a aquellos equipos que tienen la capacidad de operar por sí mismos, un ejemplo es en los equipos de perforación, tanto para barrenar frentes o para barrenaciones largas, los equipos tienen la capacidad de posicionarse, cargar la plantilla de barrenación, iniciar el encasquillado del barreno, perforar y limpiar el barreno, en pocas palabras, queda listo para el siguiente ciclo. Esto puede ser fundamental en un futuro para reducir los tiempos muertos que presentan los equipos entre turnos, se puede programar el equipo para perforar mientras una cuadrilla de un turno sale e ingresa al interior la siguiente, puede traducirse a aumentos de productividad de los equipos, y por ende aumento en la producción del mineral o mayores frentes de disparo.

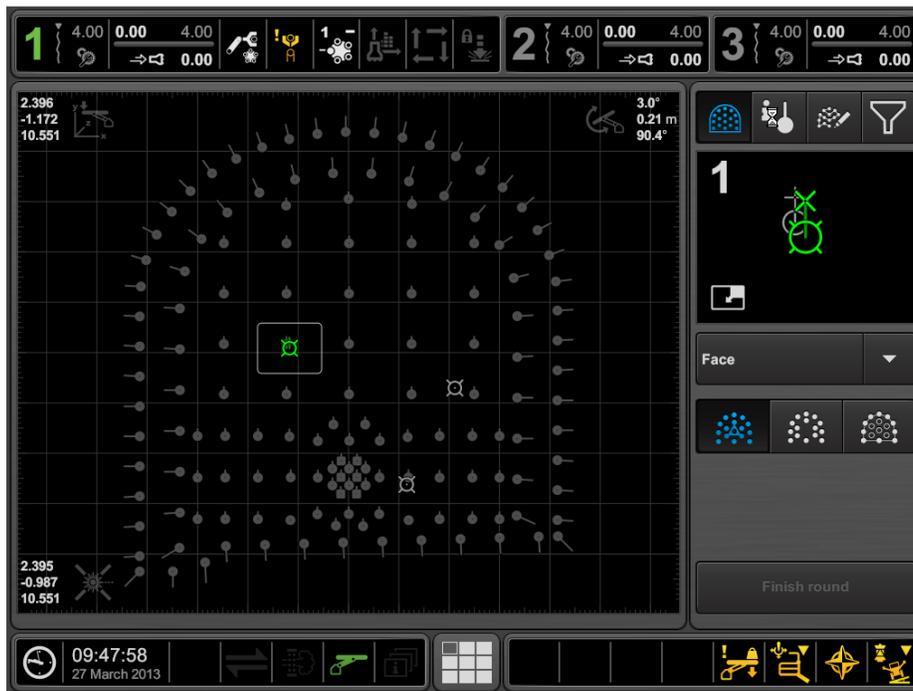


Figura 6.2 Ejemplo de una plantilla de barrenación precargada Equipo autónomo (Ibid)

Los equipos a batería surgen principalmente de la necesidad de reducir las emisiones de gases tóxicos dentro de ambientes cerrados, con poca ventilación, a su vez el precio del diésel se encuentra en un constante aumento, lo que genera costos elevados en consumo de combustible. El ejemplo claro para mejorar las condiciones de la mina, y reducir las enfermedades de trabajo causadas por gases producidos por la combustión interna, es eliminar las emisiones causadas por los equipos del tipo cargador frontal de bajo perfil o conocidos como scooptrams, estos son los causantes secundarios, después de los gases de la voladura de tener una atmosfera contaminante. Estos equipos deben ser adaptados con baterías recargables de gran amperaje, motores eléctricos, cajas de distribución, invertidor de corriente, entre otros. Además, la mina debe adaptar infraestructura dentro y fuera de la mina para realizar los mantenimientos adecuados para el equipo. Si bien, estos equipos requieren una mayor inversión los costos asociados a ventilación, mantenimiento y logística se reducen gradualmente, debido a que los equipos diésel

tienen mayores componentes de desgaste, lo que provoca tener mayor cantidad de refacciones y mayor cantidad de movimientos.

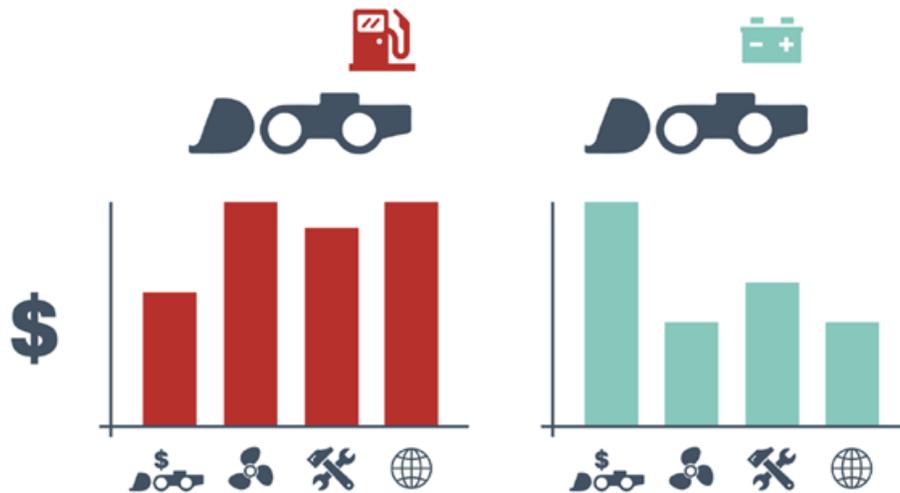


Figura 6.3 Comparación equipos a diesel-batería (Ibid.)

Es importante mencionar que los equipos a batería cuentan con la misma potencia que un equipo diésel, para asegurar la productividad de estos. La principal desventaja de estos equipos es el tiempo de batería, aproximadamente cada equipo debe cambiar la batería 1 vez por turno, ocasionando demoras en los tiempos de producción, pero mejorando considerablemente las condiciones ambientales y de seguridad dentro de la mina.

TÉCNICAS PARA OBTENER PISO PLANO UTILIZANDO TBM EN MINERÍA

Como se mencionó en los capítulos anteriores, existen equipos de excavación mecanizada con sección completa, como es el caso de las tunnel boring machine (TBM), estos equipos proporcionan una gran productividad para obras con una longitud considerable (mayores a 2km), pueden excavar en diferentes diámetros, el necesario para satisfacer la obra requerida. Estos equipos excavan en secciones circulares, óptimos para túneles cuya operación será por ejemplo un túnel de desagüe. La principal desventaja en la utilización de estos equipos es la sección que se produce, en minería subterránea lo que se requiere es un piso plano, para servir como medio de circulación para equipos, personal, etc.

Así que cuando se realiza una obra con TBM con fines para minería subterránea y que no son únicamente para conducto de agua se tienen varias opciones para tener un piso firme. Las cuales son:

- Utilizar relleno pétreo o concreto hidráulico
- Utilizar elemento prefabricado
- Rimar el piso de la obra con un equipo auxiliar
- Uso de explosivos

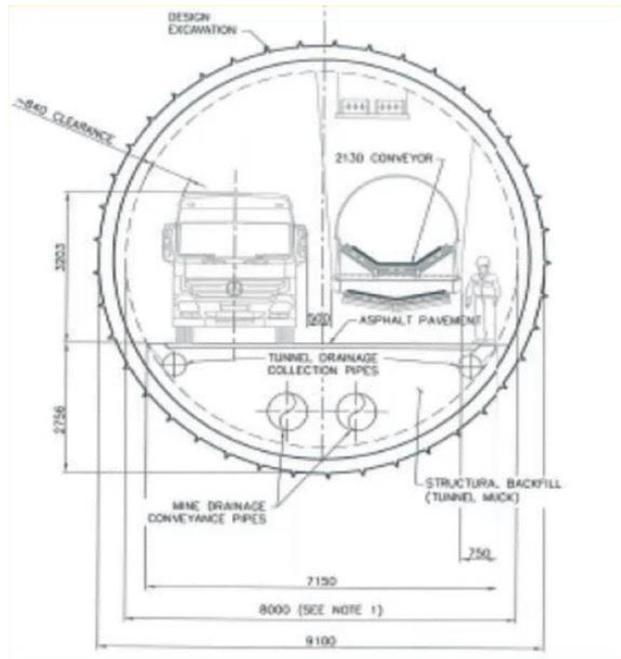
RELLENO COMO PISO

Para colocar este tipo de relleno generalmente se utiliza rezaga o material estéril proveniente de la misma obra, o de la mina, si el material excavado tiene un alto contenido en finos, no es conveniente utilizarlo como relleno, puede provocar piso altamente resbaloso debido a las lamas formadas por el contacto del material fino y el agua, resultando un piso inadecuado para la obra, otro material que puede utilizarse es balasto, con cierta granulometría, se debe evaluar los costos asociados a traer y manejar un material que no se tiene dentro de la misma obra.

La rezaga proveniente de la excavación de la TBM puede utilizarse siempre y cuando se realice un cribado y se eliminen los finos, esta clasificación puede realizarse en el back up de la máquina tuneladora o puede ser llevada al exterior para su clasificación.

En la parte superior del relleno se puede optar por colocar una capa de concreto hidráulico o asfalto.

Figura 6.4 Sección transversal con relleno como piso (Dennis Ofiara, The future of tunnel for underground mines 2020)



Otra forma de rellenar esta cavidad necesaria para que los equipos sobre neumáticos puedan circular es utilizar cemento hidráulico como relleno, esto se realiza al frente del back up de la tuneladora, el concreto se vierte y se colocan las cimbras, todo el back up pasa por encima del encofrado y cuando el back termina de pasar el concreto ya se ha endurecido y equipos sobre neumáticos puede entrar al túnel sin ningún problema.



Figura 6.5 Piso con cemento hidráulico (Ibid.)

USO DE ELEMENTO PREFABRICADO PARA TENER PISO

Otra forma de adaptar un piso plano a la excavación producida por las TBM es utilizar un elemento prefabricado, estos elementos cuentan con espacios internos, esto con 2 fines, para no crear un elemento totalmente sólido en su interior, lo que conlleva a un elemento más económico y ligero, que puede manipularse de una manera más sencilla. El otro fin es para utilizar estos espacios interiores como medios para la ventilación, tuberías, servicios, drenaje, etc., y así adaptar y maximizar el espacio disponible para estas obras. En la figura siguiente se muestra la distribución de un elemento prefabricado dentro del túnel.

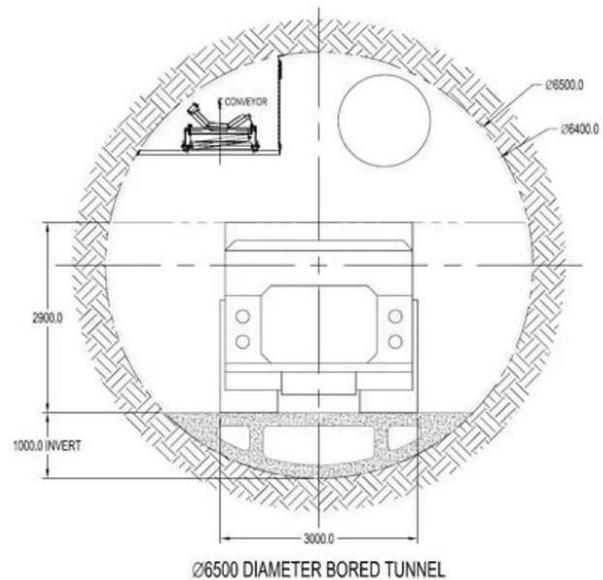


Figura 6.6 Piso con elemento prefabricado (Ibid.)

Dentro de la mina Grosvenor, mencionada en capítulos anteriores en donde se explota carbón con una vida útil de explotación de al menos 50 años se utilizaron dovelas prefabricadas debido a la mala calidad de la roca, y asegurar la vida útil, debido a esto decidieron realizar una gran inversión en esta obra y colocar elementos prefabricados para tener un piso plano. En la figura 6.7 se muestra el túnel con 2 diferentes planos de inclinación.



Figura 6.7 Mina Grosvenor 15% pendiente. Piso prefabricado (Ibid.)

RIMADO DE LA OBRA

Otro método para obtener un piso plano es la utilización de máquinas auxiliares para el rimado inferior, el proceso constructivo de este método es mediante la excavación circular por medio de la TBM, posterior al paso del back up, se utiliza una rimadora o minero continuo que tenga la capacidad de excavar roca a un ritmo similar al de la TBM, para combinar ciclos de excavación y así hacer más eficiente el proceso. Este método puede llegar a ser más visto en un futuro debido a que puede llegar a ser un método muy productivo, no daña la roca circundante como el explosivo y la forma final es deseable para la minería, manteniendo la forma abovedada en la clave del túnel y un piso totalmente plano en la parte de la cubeta.

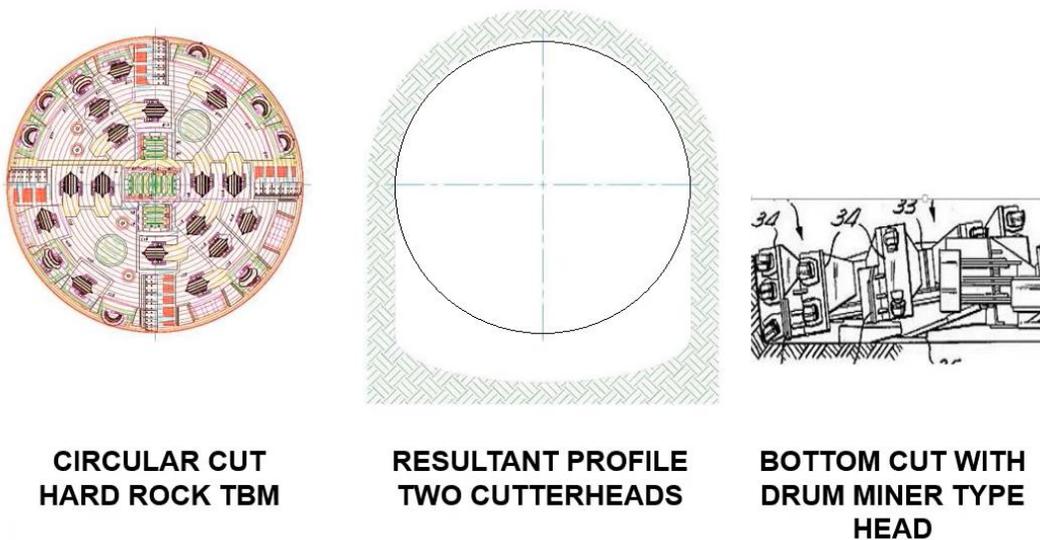


Figura 6.8 Excavación con equipo auxiliar para rimar piso (Ibid.)

USO DE EXPLOSIVOS

Un método que no es recomendable para obtener un piso firme, más sin embargo no se puede excluir, es el uso de explosivos, una vez que la TBM excava la parte circular y el back up mantiene una cierta distancia para resguardarse de la voladura un equipo de barrenación puede realizar barrenos de piso para dar forma.

Las principales desventajas de combinar un método de excavación mecanizado y un método convencional es que el segundo puede interferir con tareas del método mecanizado, tal como dañar tuberías, bandas transportadoras, entre otras. Esto si no se realiza una adecuada barrenación y cargado. Puede controlarse mediante los cálculos y controles correspondientes de barrenación y voladura.

Otra desventaja que presenta este método es que se requiere un equipo de rezagado, por lo tanto, se debe de disponer de al menos 2 equipos adicionales a la TBM, los cuales pueden estar realizando diversas tareas en otras áreas de la mina.

Adicional a los anteriores el daño producido por el explosivo a la roca modifica los estados de esfuerzo que se logran al excavar con método mecanizado, más aún en las esquinas inferiores de la obra, zonas donde se concentran los esfuerzos.

EXCAVACIÓN MECANIZADA CON SECCIÓN RECTANGULAR

Una de las primeras tecnologías diseñadas para minar en secciones rectangulares fue el Jarva Slot Machine, diseñado con un eje vertical en la cabeza de corte, para minado de mantos de carbón, este equipo tenía grippers que lo auxiliaban para sujetarse a las paredes de la mina, no podía cortar la totalidad del cuerpo, se



utilizaba para minar la parte inferior del manto una vez que había sido extraído por otros métodos. Es notable observar que únicamente la mitad de los discos de corte atacan el frente de excavación.

Figura 6.9 Equipo Jarva Slot Machinem Minería del Carbón (Ibid.)

EQUIPO DE EXCAVACIÓN MOBILE MINER

Robbins continuó diseñando equipos de excavación mecanizada con piso plano, posteriormente la tecnología fue adquirida por Epiroc, anteriormente conocida como Atlas Copco. Continuaron con el diseño del equipo Jarva para minería de carbón. Así desarrollaron los equipos Mobile Miner. En la mina Rio Tinto, se pretendía realizar el desarrollo para minar mediante el método block caving, el cual necesitaría cerca de 100 km de túnel que podría llevar 7 años para preparar los rebajes. Se decidió pedir el equipo, pero no se colocaron discos de corte durante 5 años, debido a los bajos precios de los metales, la compañía Rio Tinto tuvo que suspender este desarrollo, la máquina fue vendida a un contratista sueco.

Esta tecnología combina la tecnología de las TBM de viga principal y la tecnología del equipo Jarva, utiliza un eje horizontal en la cabeza de corte, es preciso notar que únicamente una pequeña porción de la cabeza de corte entra en contacto con el frente de excavación, debido al gran tamaño de la cabeza de corte requiere un boom (soporte) demasiado grande para poder sostenerla.

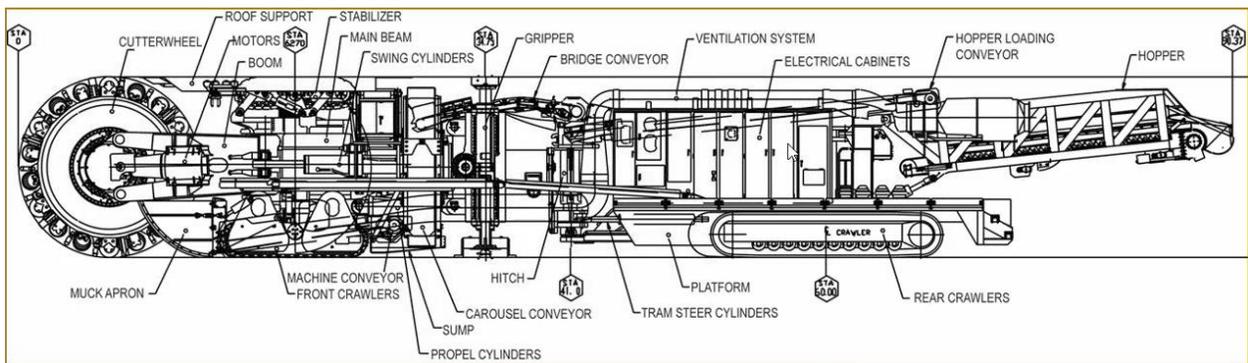


Figura 6.10 Equipo 55V, mecanismos principales de operación (Ibid.)

Estos equipos, Mobile Miner 22H(a), 40V(b) y 55V(c) (Fig. 6.11) excavan una zanja vertical(V) u horizontal(H), sea el caso del equipo, mientras utiliza gripper se sujetan a la roca, tienen la característica que el boom con ayuda de gatos les permite realizar movimientos laterales y verticales mientras excava, para aumentar el perfil del corte.

Algunas de las características disponibles de automatización son la navegación con láser, la monitorización y control remotos, y el corte automático del frente de roca.

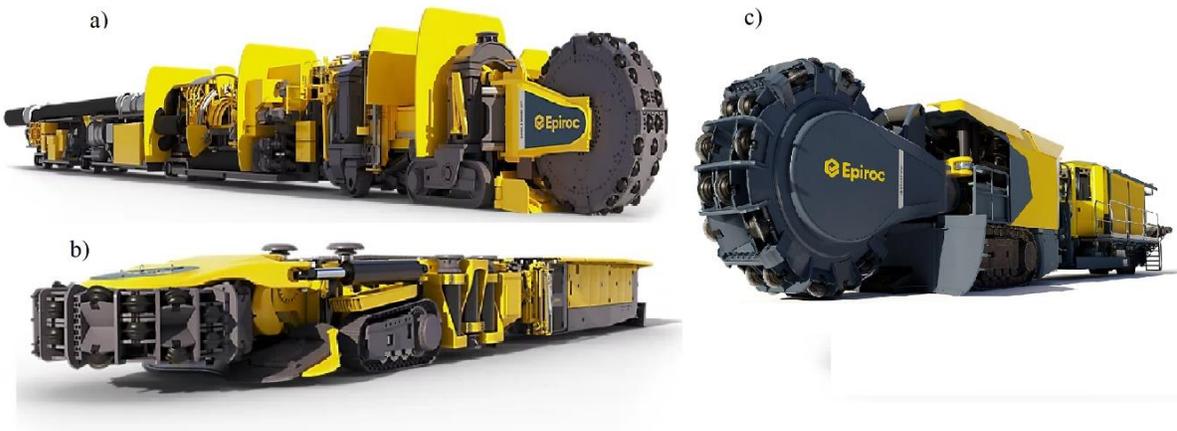


Figura 6.11 Equipos Mobile Miner a)22H, b)40V, c)55V (<https://www.epiroc.com/>)

Alguna de las características y perfiles típicos de excavación de los equipos se muestran en la figura 6.12 Es notable mencionar que los equipos tienen secciones mínimas y máximas, el perfil mínimo está limitado por el tamaño del back up, mientras que la sección máxima está limitada por la articulación y los gatos que permiten el movimiento de la cabeza de corte. Los perfiles máximos, diámetros de rueda de corte, orientación de la rueda, peso del equipo sin back up, y potencia requerida para operar se muestran a continuación. La información corresponde a, Mobile Miner 22H(a), 40V(b) y 55V(c) respectivamente.

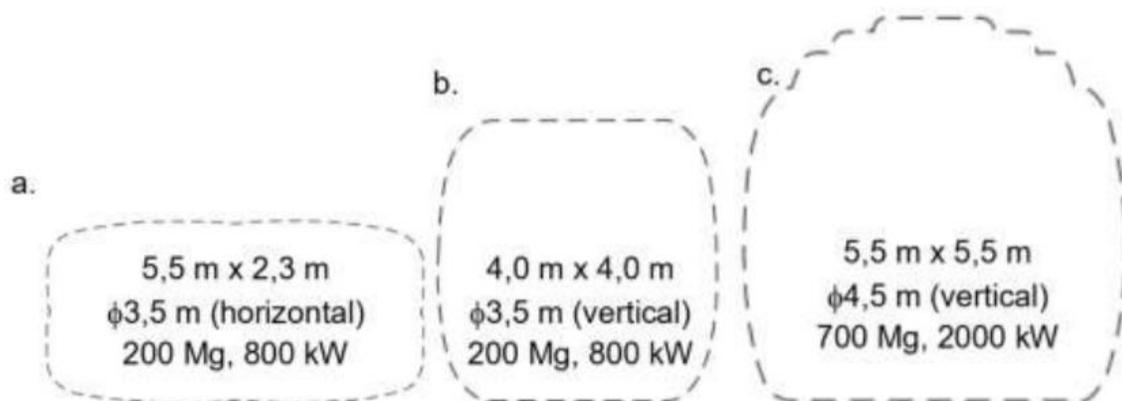


Figura 6.12 Perfiles máximos de los equipos Mobile Miner (Łukasz Bołoz, 2020)

Los valores teóricos estimados dados por laboratorio, en condiciones óptimas de rpm y aplicando una prueba brasileña de tensión con un esfuerzo de compresión del 5-10% se muestran en la tabla siguiente:

RCS [MPa]	Tasa de penetración [mm/min]
50	300
75	300
100	255
125	170
150	130
175	105
200	85
225	75
250	65
275	55
300	50

Tabla 6.1 Tasa de penetración [mm/min] en condiciones óptimas (Alfredo Bertrand, Epiroc, 2019)

Estos equipos pueden excavar a una producción teórica de 10-20 m/día

En la figura 6.13 se muestra una excavación realizada por el equipo 22H en el lado izquierdo, y en condiciones similares de geología una excavación realizada por el método convencional de perforación y voladura (derecha)



Tunnel by Reef Miner at
Atlas Copco test centre, Sweden

Tunnel by careful blasting at
Äspö Hard Rock Laboratory, Sweden

Figura 6.13 Secciones excavada con mobile miner 22H (izq) y método convencional (Der) Johnny Lyly, et. al. Epiroc, 2018)

Las características del equipo 40V se muestran en la tabla siguiente:

Características 40 V	
Perfil Mín. (ancho x alto)	3.1 m x 3.6 m
Perfil Max.	4.5 m x 4.5 m
Radio de giro	13 m
Diámetro cabeza de corte	3.5 m
Ancho de la cabeza de corte	1.15
Cortadores	17 in
Longitud del equipo	20 m
Altura	3.5 m
Ancho	2.5 m
Peso	200 ton
Energía	800 kW, 4160 V
Inclinación	+/-20%

Tabla 6.2 Características mobile miner 40V (Asliddin Maxmadoliev, et.al. 2020)

Estos equipos, al igual que las TBM poseen back ups implementados para el soporte y sostenimiento de la roca, refugios mineros, sistemas de bombeo, etc. El rezagado del material excavado se realiza mediante un sistema similar a las máquinas rozadoras, explicadas anteriormente, mediante sistemas de paletas o brazos que giran hacia dentro del equipo y lo transportan por medio de banda transportadora al final del mismo, donde es cargado a equipos de cargado de bajo perfil o bien puede continuar mediante un sistema de bandas transportadoras al exterior de la obra. (Fig. 6.14)

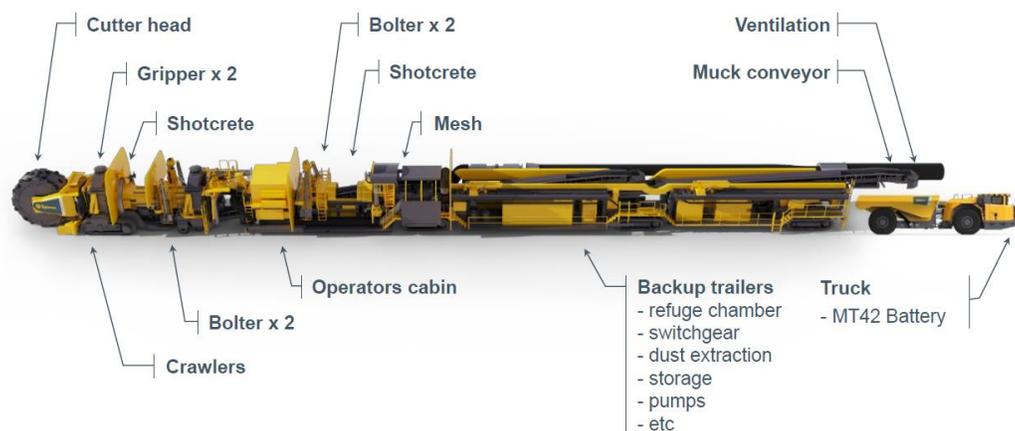


Figura 6.14 Sistemas principales equipo mobile miner (op. cit.)

El costo aproximado de estos equipos es de 1,800,000€ y su construcción y entrega tiene una duración aproximada entre 1.5 a 2 años.

EXCAVACIÓN MECANIZADA CON TBM VIGA PRINCIPAL FORMA OVALADA

Robbins modificó la tecnología de una TBM de viga principal para realizar una excavación con piso totalmente plano, esto se logró modificando la cabeza de corte, añadiendo cortadores en el costado de la cabeza de corte, una vez que realiza la excavación circular con un cierto avance, utilizando el sistema de grippers modificado para estabilizar este tipo de corte, la cabeza se desplaza de manera horizontal hacia el extremo derecho, una vez excavado realiza la excavación en el lado izquierdo de la obra, así obteniendo un perfil ovalado. (Fig. 6.15)

El ciclo de excavación se prolonga debido a estas excavaciones adicionales, pero, en consecuencia, ya no se tiene el principal problema de excavar con TBM para labores mineras, el cual es la sección circular.

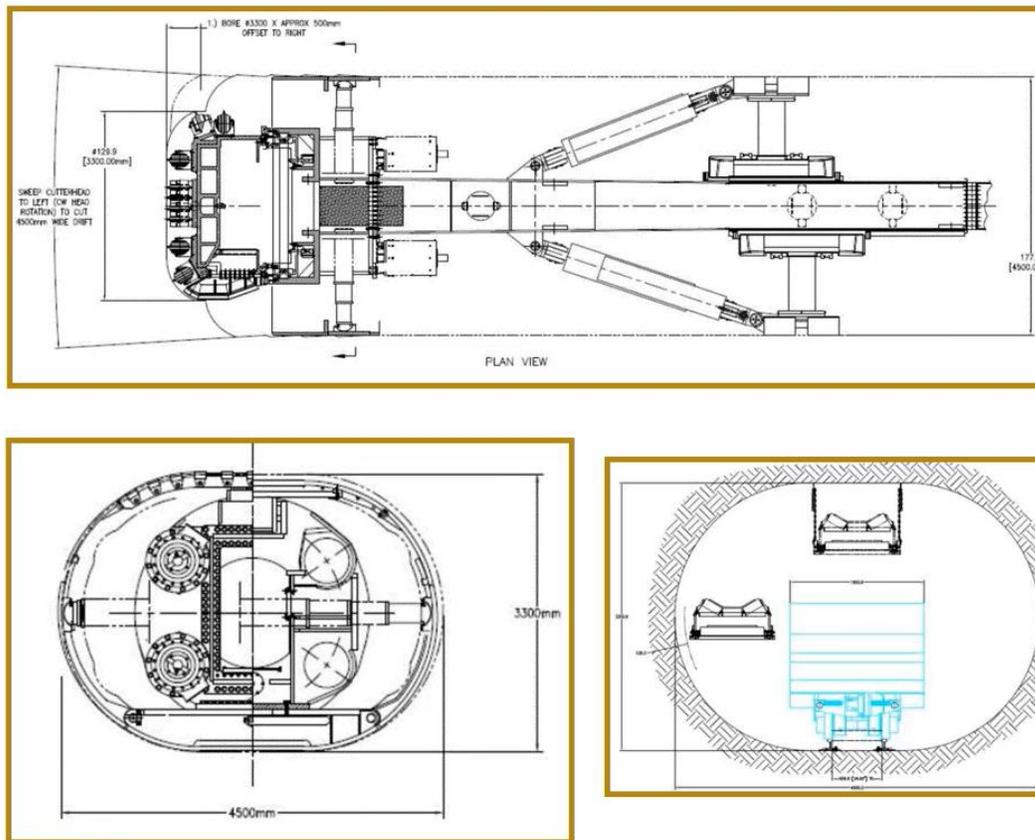


Figura 6.15 TBM Robbins viga principal, modificada para excavar secciones ovaladas. (op. cit.)

EXCAVACIÓN MECANIZADA CON SECCIÓN RECTANGULAR COMPLETA

Robbins diseñó una máquina que pudiera satisfacer la necesidad prioritaria de una obra dentro de una mina subterránea, la cual es tener un piso plano, creó la máquina MDM5000, por sus siglas en inglés Mine Development Machine. Las dimensiones del perfil de excavación de esta máquina son de 5.0 m x 4.5 m. El principio de funcionamiento de la máquina MDM5000 es similar a la de una TBM de viga principal, utiliza grippers y cilindros de empuje para sostenerse en la roca y realizar el corte a través de la cabeza de corte, utilizando discos como medio de desgarre

de la roca. La principal diferencia, además de la forma de la cabeza de corte, es que cuenta con un mecanismo de levante en dirección vertical, apoyándose en un eje horizontal, lo que permite que la cabeza de corte tenga movimiento hacia arriba y abajo, esto permite que excave completamente la sección y obtener un perfil rectangular.

Algunas aplicaciones adicionales para la máquina MDM, donde se requieran pisos planos puede ser utilizada, como túneles ferroviarios o carreteros en aplicaciones civiles.

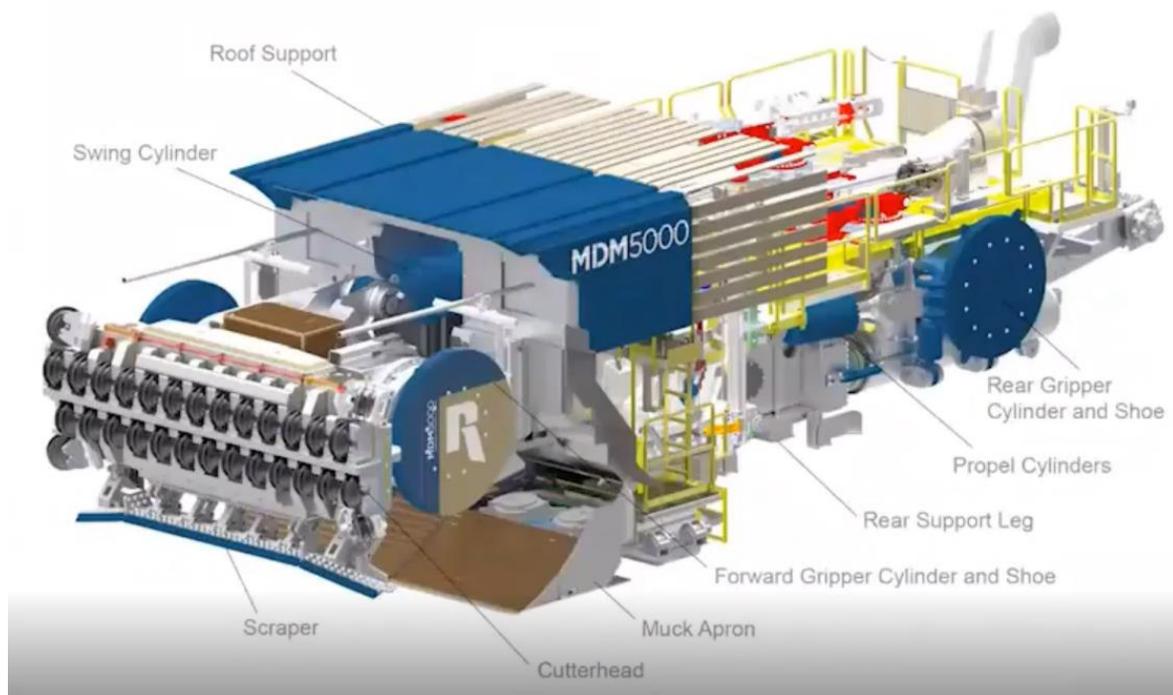


Figura 6.16 Partes Máquina MDM 5000 (Lok, 2021)

Detrás de la cabeza de corte, la MDM cuenta con barras que funcionan como un escudo, donde se lleva a cabo el sostenimiento de la roca y obras auxiliares, como son la colocación de tubería, ventilación, iluminación, etc.

El transporte de la rezaga o del material excavado es un poco diferente al de una TBM convencional, utiliza el movimiento descendente de la cabeza de corte para “barrer” o arrastrar el material con scrapers hacia los elementos de recogida y estos lo llevan al sistema de extracción a través de bandas transportadoras, similar al de las TBM.

Actualmente este equipo se encuentra operando en la mina de Fresnillo PLC, excava en rocas andesitas y esquistos con incrustaciones de cuarzo, donde anteriormente equipos rozadoras habían intentado excavar sin éxito. La roca in situ tiene una RCS aproximada de 200 MPa, ha excavado más de 1,700 m, con tasas

de excavación de 52m/semana y 191m/mes. Lo que rectifica la idea que la excavación mecanizada es más productiva que el método convencional en este tipo de obras.



Figura 6.17 Sección excvada por la Máquina MDM5000 (Robbins.com)

Un punto importante a considerar es el volumen excavado que se tiene entre una excavación circular con TBM o una excavación rectangular con los equipos anteriormente mencionados, si se requiere un piso para transitar de 5.0m de ancho, entonces se requiere una excavación circular de 6.5m de diámetro con TBM, lo que tiene un área de excavación de 33.2m², mientras que en sección rectangular de 5.0m x 4.5 m, se tiene un área de excavación de 22.5 m², esto significa que se produce un exceso de volumen del 48% más en secciones circulares, si se lleva a obras que tienen más de 1 km de excavación, el material en cuestión puede significar gastos importantes, tanto de logística como de operación.

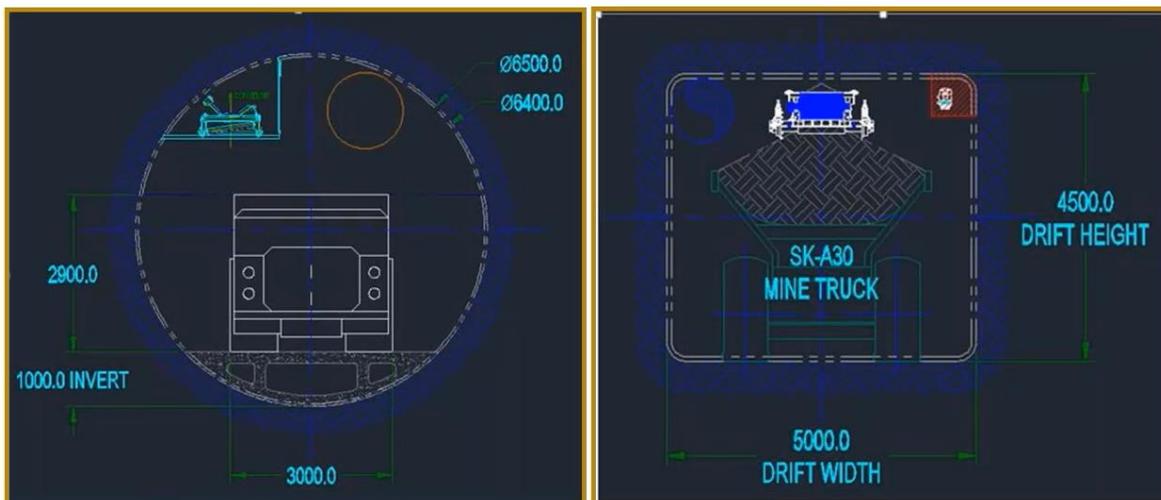


Figura 6.18 Izq Sección TBM 6.5m Diámetro. Der. Sección rectangular 5.0 m x 4.5m, mismo piso de trabajo (op. cit.)

MEASUREMENT WHILE DRILLING (MWD)

El monitoreo de los parámetros de perforación se realiza a través del sistema Measurement While Drilling (MWD), y consiste en el registro automatizado de estos parámetros que proporcionan información objetiva y consistente de las condiciones del macizo rocoso. Esta información ayudará a prever el comportamiento geotécnico de la roca y permitirá ajustar la excavación y sostenimiento a las condiciones reales del macizo rocoso. Es por esto por lo que el uso de la respuesta de los parámetros de perforación en excavaciones subterráneas se ha convertido en una herramienta útil en la evaluación de las características estructurales del macizo rocoso. La esencia del monitoreo es explorar las características de la roca in situ de un macizo rocoso y extraer información útil de manera automática de los datos de perforación

Las características geológicas como la dureza de la roca y las fracturas influyen en los parámetros de perforación. Sin embargo, los parámetros más importantes para caracterizar el macizo (tasa de penetración y presión de torque) también responden a variaciones externas como el largo de la perforación. Por lo tanto, para realizar una interpretación adecuada de los datos obtenidos es necesario normalizar estos parámetros.

El monitoreo de estos parámetros se realiza durante la perforación a través de sensores instalados cerca de las válvulas que controlan las presiones hidráulicas que se emiten, la cantidad de datos que se tomen va a depender exclusivamente de la cantidad de perforaciones que se realicen.

El sistema MWD al estar incorporado en las máquinas de perforación, se puede utilizar en varios tipos de perforación, tales como en sondajes exploratorios (de alerta temprana), perforación para la preinyección (alerta temprana, siendo ésta una ventaja comparativa en cuanto a su multifuncionalidad.

Tiene varias ventajas en comparación con otros métodos como el costo, la pronta interpretación, entre otros.

	Geology	Fractures	Mechanical Properties	Chemical Properties	Sample Handling time	Time to result	Provided rock mass resolution	Cost Including analysis
Geological Mapping	X	X			Average	Short	High	Average
Analysis of Drill cuttings	X			(x)	Average-Long	Long	Average-high	Average-high
Diamond Drilling	X	X - X	(x)	(x)	Long	Long	Low	High
Bore hole geophysics	(x)	(x)	X		Average	Short	Very high	Average
MWD	(x)	X	X		No	Very short	Very high	Low
Single rock samples	X		(x)	(x)	Short	Long	Very low	High
Visual hole inspection	X	X			Average	Average long	High	Average

X – to large extent, **X** – to small extent, **(x)** – After analysis/correlation

Tabla 6.3 comparativa de diferentes métodos de exploración (Parmesh Kumar, Epiroc, 2014)

PARÁMETROS DE PERFORACIÓN Y FUERZA DE PERFORACIÓN

Los parámetros recogidos durante la perforación de un macizo rocoso son esenciales para una interpretación in situ de las condiciones de la roca. Existen varios parámetros que pueden ser medidos, pero los más importantes son los siguientes:

- Posición de la perforación.
- Profundidad de perforación [distancia]. [HD]
- Tasa de penetración [distancia/tiempo]. [PR]
- Presión de torque o presión de rotación [bar].
- Presión de percusión [bar].
- Empuje o presión de avance [bar o KN]. [FP]
- Presión en la cabeza [HP]
- Presión de agua [bar]. [WP]
- Flujo de agua [litros/minutos]. [WF]
- Tiempo [T]
- Presión de amortiguamiento [DP]
- Velocidad de rotación [RS]
- Presión de rotación/Torque [RP]

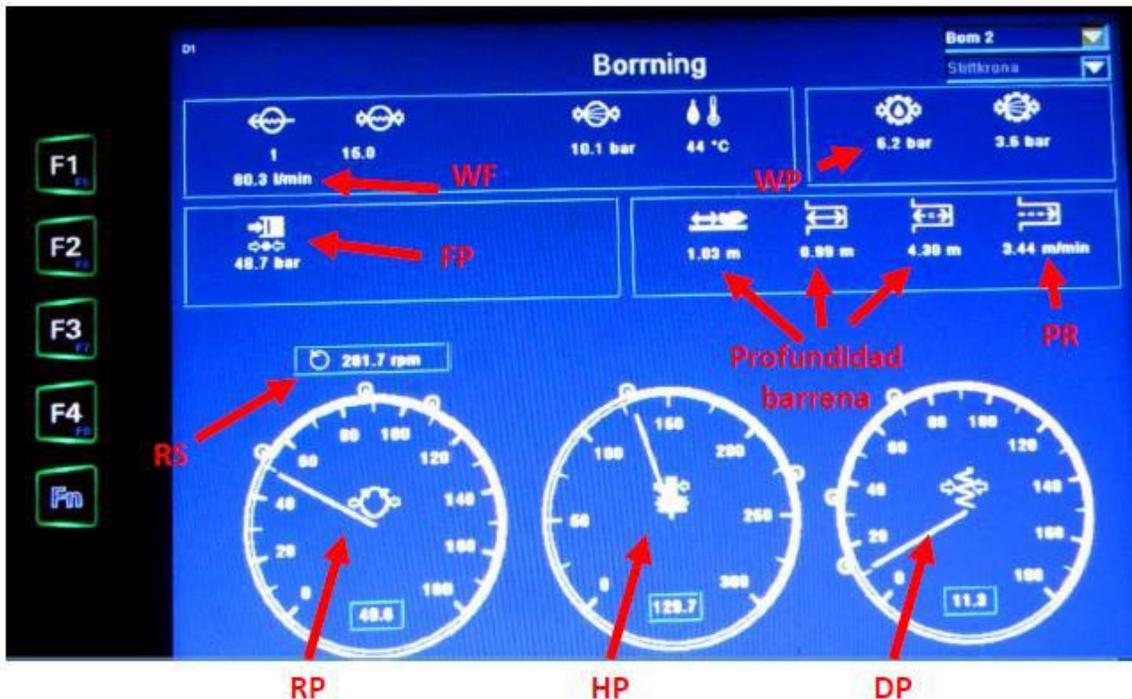


Figura 6.19 Pantalla de control del jumbo WL3C de Atlas-Copco donde se señalan los parámetros medidos (González, España, 2015)

Existen también otros parámetros secundarios con menor relevancia pero que de igual manera aportan información, estos se utilizan en estudios con una finalidad muy específica y con un nivel muy grande de precisión.

- Vibración (vertical y horizontal)
- Presión relativa
- Caudal de retorno
- Pulsaciones
- Intensidad
- Tensión eléctrica
- Temperatura

Los sensores de medida de los sistemas MWD normalmente son acelerómetros, magnetómetros y sensores de rayos gamma. Los dos primeros se encargan de dar la información de posicionamiento y las medidas físicas tales como presiones, caudales, fuerzas.

Los dos parámetros más importantes para la caracterización de la roca son la tasa de penetración y la presión de torque. La tasa de penetración normalizada es un buen indicador para la dureza de la roca y la presión de torque normalizada, para las fracturas

La tasa de penetración se define como el parámetro más usado para la clasificación de la roca y es la variable de mayor interés en el estudio del MWD, Dado que el barreno de perforación penetra con mayor facilidad roca blanda se puede concluir en primera instancia que la tasa de penetración es un indicador de la dureza de la roca. El estudio de la presión de torque normalizada indica que tiene una buena correlación para identificar el fracturamiento de la roca, por lo tanto, es un buen indicador de la homogeneidad de ésta.

Cómo se mencionó anteriormente el MWD puede interpretar múltiples parámetros.

Ej. Para un túnel de 100 metros que está loggeado cada 0.05m con diferentes parámetros

Depth (m)	Penetration (m/mln)	Rotatlon pressure (bar)	Feeder pressure (bar)	Hammer pressure (bar)	Rotatlon speed (rpm)	Water pressure (bar)	Water flow (l/mln)
0,351	1,9	89	53	111	268	25	120
0,401	1,8	95	54	111	271	25	119
0,454	2,0	94	58	121	271	25	120
0,505	2,5	89	64	149	272	25	120
0,556	2,9	90	68	168	272	25	118
0,609	3,6	90	71	176	272	25	116
0,66	3,5	99	77	180	272	25	116
0,71	3,4	108	79	182	268	25	117
0,761	3,4	109	79	180	266	25	116
0,813	3,5	111	78	184	266	25	116
0,866	3,4	108	78	182	266	25	116
0,918	3,3	107	78	183	267	25	116

Tabla 6.4 Valores Típicos de Medición MWD para un túnel de 100m (op. cit.)

Los resultados sin tomar en cuenta la velocidad de rotación son los siguientes:

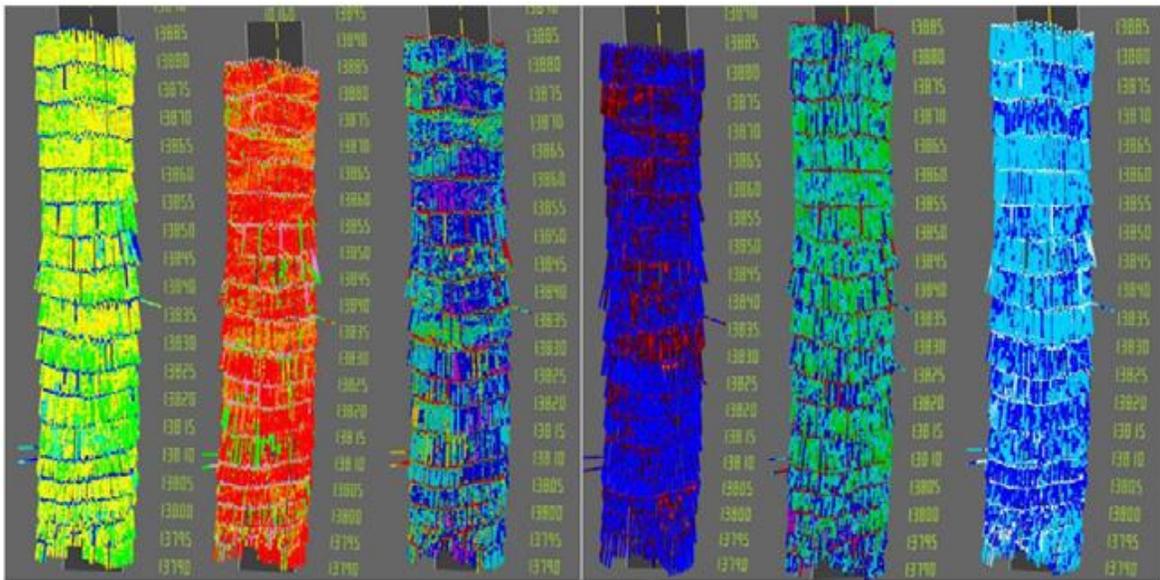


Figura 6.20 Mapeo de los diferentes parámetros medidos sin contar velocidad de rotación (Norwegian Tunnelling Society, 2019)

Normalización de los parámetros de perforación

La normalización de los parámetros de perforación se realiza para estandarizar el método debido a la gran sensibilidad que presenta, puesto que durante la perforación diversas respuestas se pueden registrar, tales como las propiedades de la roca, variaciones causadas por lo cambios en las condiciones de la roca y otras variaciones generadas por los equipos de perforación

Dentro de las variaciones que se producen están las variaciones no sistemáticas y las sistemáticas. Las primeras tienen relación directa con las condiciones de la roca, mientras que las sistemáticas son causadas por los equipos de perforación y el largo de la perforación. La tasa de penetración y la presión de torque dependen en gran medida de la longitud de perforación y de las variaciones sistemáticas (presión de percusión y de avance), por lo que estos patrones tienen que ser identificado para ser eliminado de la toma de datos.

En el Túnel Strindheim, Trondheim, Noruega se aplicó este método, se comparó los datos obtenidos por el MWD y un sondeo geológico y los resultados son los siguientes:

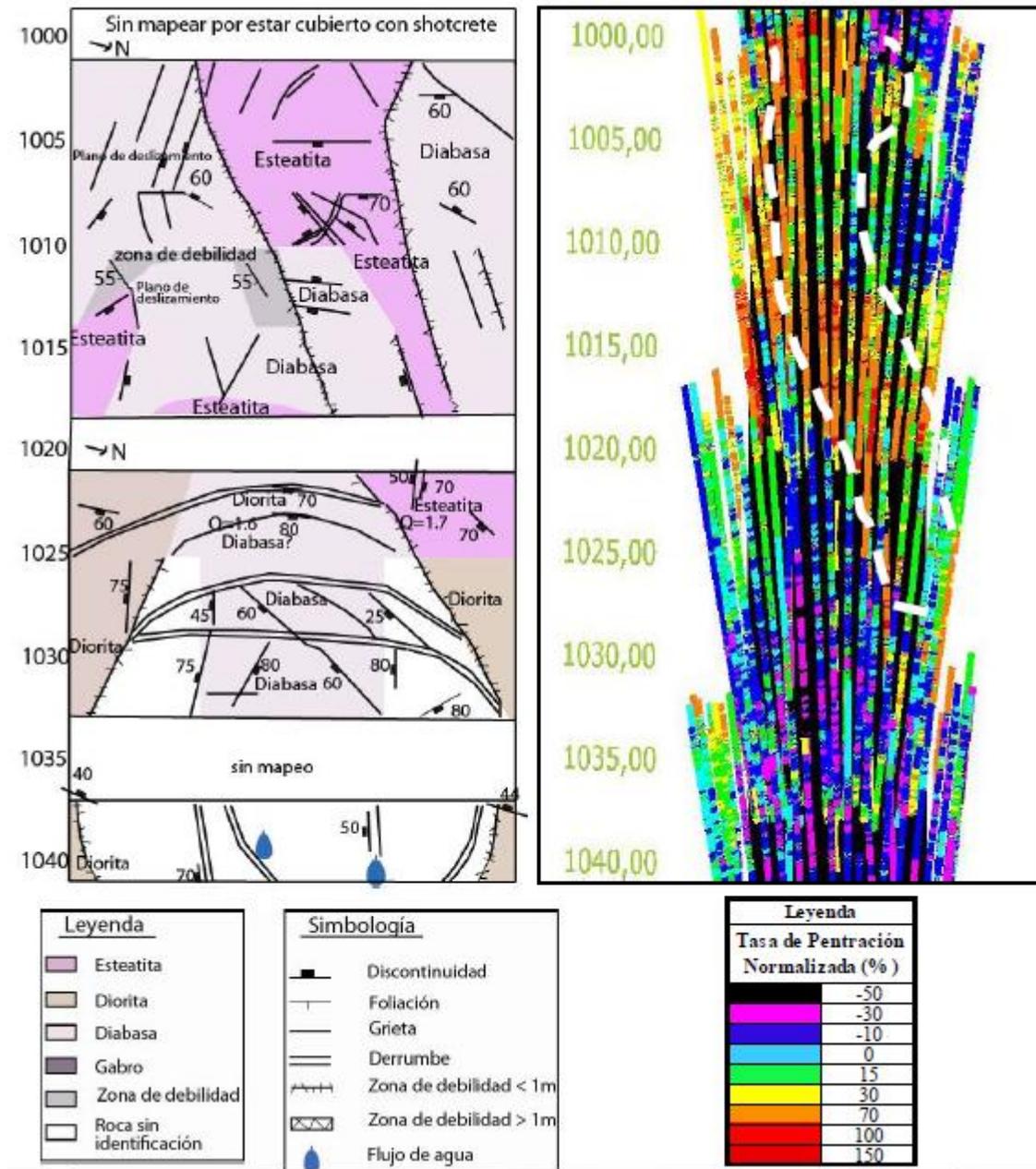


Figura 6.21 Izq. interpretación geológica y a la derecha mapeo con MWD (Norwegian Tunnelling Society 2019)

Cómo podemos observar en la figura de arriba con la tasa de penetración y la interpretación del mismo pudieron llegar casi a la misma configuración que la interpretación geológica. En la zona donde se encuentra la esteatita se ve su semejanza con el método MWD con una tasa de penetración de 70%.

COSTOS MWD

Debido a que el sistema MWD viene incorporado en el equipo de perforación, éste no requiere mayores costos que la adquisición del Jumbo. El sistema MWD no presenta costos operacionales adicionales, sólo los relacionados con el Jumbo (gastos de combustible, personal de mantención de éste, operador, etc.).

Los costos del MWD se centran en la licencia del programa y soporte de éste.

Costos del primer año para un proyecto con 1 usuario y 1 Jumbo cuando el usuario no es dueño de éste.

PRIMER AÑO			
Ítem	NOK	USD	CLP
Jumbo	16.353.065	2.780.021	1.356.288.834
Licencia Bever Team estándar	65.000	11.050	5.381.350
Licencia MWD	100.000	17.000	8.293.790
Soporte MWD	12*4.000=48.000	8.160	3.981.019
TOTAL	16.566.065	2.816.231	1.373.944.993

Costos a partir del segundo año para un proyecto con 1 usuario y 1 Jumbo cuando el usuario no es dueño de éste.

SEGUNDO AÑO			
Ítem	NOK	USD	CLP
Soporte MWD	12*4.000=48000	8.160	3.981.019
Soporte Bever Team + actualizaciones	1*0,18*65.000=11.700	1.989	970.373
TOTAL	59.700	10.149	4.951.392

Tabla 6.5 Costos Asociados al Sistema MWD (Epiroc, Op. Cit.)

ROBOTS EN MINERÍA

Las condiciones actuales de muchas minas dificultan de gran manera los procesos operativos que se ven involucrados día a día. Zonas colapsadas, zonas inundadas, presencia de gases, son solo algunos de los obstáculos que se deben de prever para acceder a ciertas zonas. Para estas condiciones muchas empresas se han dado a la tarea de crear tecnologías no pilotadas, autónomas, con telemetría y con enlace en tiempo real que permiten visualizar zonas no accesibles para el personal.

MAPEO CON DRONES

Este tipo de levantamiento utiliza drones como principal herramienta, se acopla a estos un sistema Lidar, que permite ubicar la distancia entre el láser proyectado y un objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada. Esto genera una nube de puntos que tiene como finalidad mapear zonas de la mina con difícil acceso, como son: zonas colapsadas, zonas con peligro potencial de caídos, contrapozos o tiros de paso de mineral, zonas minadas, entre otros. Tal es el caso de la mina sueca LKAB, que sufrió un evento sísmico que ocasionó estallido de roca en un nivel y debido a esto tuvo que detener operaciones. Con este levantamiento, se pudo visualizar, mangas de ventilación, caídos, zonas de estallido de roca, condiciones del sostenimiento, etc, mientras que el personal encargado del levantamiento permaneció en una zona segura.



Figura 6.22 izq. Levantamiento con sistema Lidar, Der. Uso de drones en mina LKAB (<https://www.emesent.io/>)

ROBOTS SOBRE NEUMÁTICOS Y ORUGAS

En esta clasificación se pueden encontrar diversos tipos de robots, estos pueden tener varias utilidades, como son: combatir el fuego en el interior de una mina, mapear zonas de difícil acceso, reconocer condiciones atmosféricas, con posibilidad de explosión, ayudar al rescate de personal dentro de la mina tras un colapso o un incendio, etc.

Debido a las condiciones actuales de la minería subterránea muchos robots para mapeo de condiciones atmosféricas han sido creados, entre algunos se pueden mencionar Groundhog, Wolvarine V-2, Gemini-Scout, MPI, GMRI, entre otros.



Figura 6.23 Robot Grounhos (izq), Robot anti-incendios (der) (Sebastian Thrun, et. al., 2003) (Página web, Tangshan Kaicheng Electronic)

ROBOTS ACUÁTICOS

Estos robots fueron concebidos principalmente para reconocer minas abandonadas, debido que al finalizar las operaciones subterráneas el bombeo que mantiene el agua subterránea fuera de las laboras es retirado, y el agua comienza a llenar las cavidades de la mina hasta alcanzar el nivel freático, lo que puede ocasionar que la totalidad, o gran parte de la mina quede bajo el agua. Actualmente existe una gran cantidad de minas abandonadas, que, en su momento de explotación o minado, solo se minaban ciertos minerales, con el descubrimiento de nuevas tecnologías estas minas pueden contener minerales raros que pueden costar operaciones de

rehabilitación. Para encontrar dichos materiales se pueden utilizar este tipo de robots. El robot UX-1 es una esfera de 60 cm de diámetro, emplea cámaras acústicas, SONAR, scanner laser, computadora, baterías recargables, péndulo, sistema de control de flotabilidad y un casco para protección de las presiones. Utiliza la cámara multiespectral para determinar los minerales presentes. Puede realizar recorridos autónomos.



Figura 6.24 Robot UX-1 Chakravorty, A. (2019)

SOFTWARES DE INTEGRACIÓN

Actualmente la minería demanda una gran cantidad de tráfico de información, lo que promueve la creación y adaptación de nuevos softwares que puedan contener la mayor cantidad de información en tiempo real para monitorizar todas las operaciones que se realizan en la mina. Alguno de los softwares que permiten integrar toda la información son:

- Mobilaris
- Becker
- Newtraxx
- Pitram

Todos estos sistemas requieren una infraestructura mínima de telecomunicaciones dentro y fuera de la mina para poder interoperar en tiempo real. Estos sistemas pueden utilizar tags, tanto en los equipos como en el personal, para poder monitorizarse. Cuentan con un sistema de planeación de equipos, se refiere a las actividades que el equipo debe realizar, cuales se han cumplido y cuales otras están por cumplirse, así puede visualizarse la productividad de los equipos.

También se pueden utilizar como sistemas de posicionamiento real, para optimizar una ruta más rápida a un destino de la mina, analizando el tráfico y posicionamiento de los equipos operativos dentro de la mina. De igual manera cuentan con sistemas de seguridad, si dentro de la mina ocurre un colapso o un incendio el tiempo es vital para las personas dentro, estos sistemas envían una alerta inmediata al personal para que eviten la zona del colapso y se dirijan al refugio minero más próximo, también este sistema puede monitorizar las condiciones de operación del refugio minero en tiempo real.

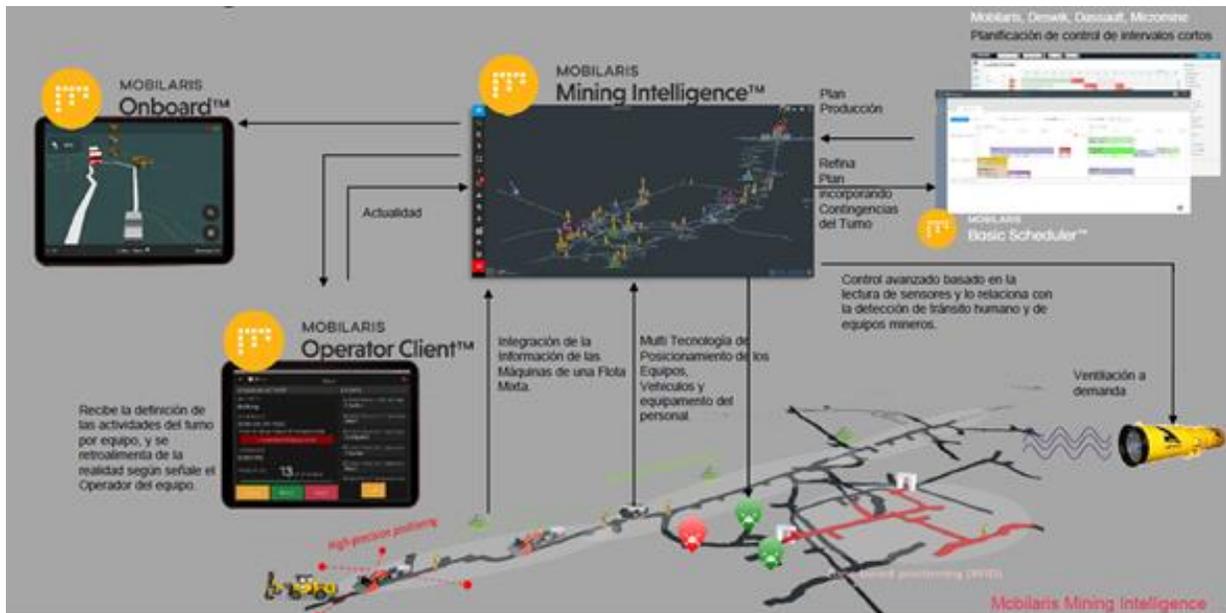


Figura 6.25 Sistema Mobilaris-Mina Digitalizada (Epiroc, Cortez, 2020)

La ventilación bajo demanda utiliza la infraestructura operativa de la mina, sensores ubicados en diferentes partes de la mina para detectar presencia de gases, cantidad de oxígeno en el aire, temperatura, flujo entre otros. Adicionalmente se entrelaza con los otros sistemas para visualizar cual área debe priorizar una ventilación, utilizando tags de posicionamiento de las personas. Este sistema puede activar y apagar los ventiladores según los requerimientos. Un caso de estudio por el equipo Mobilaris implementando este sistema en la mina Kankberg en Suecia estimó que por ahorro en consumo de energía redujo los costos asociados en 100,000 a 150,000 e por año.



Figura 6.26 Visualización digital de la mina en tiempo real (Mobilaris.com)

CONCLUSIONES

La minería subterránea es una industria que se mantiene en continuo desarrollo, en la actualidad se invierte una gran cantidad de recursos en encontrar, desarrollar y minar nuevos yacimientos minerales, esto debido a la creciente demanda global de minerales, muchos de ellos a grandes profundidades, que superan con facilidad 1km de profundidad. Estos nuevos cuerpos y la profundización de los que se encuentran en explotación, son minados en condiciones geotécnicas más desfavorables, debido a grandes esfuerzos provocados por la profundidad, agua subterránea, alteración de la roca, temperatura, nula ventilación, entre otros.

Estas condiciones que actualmente se están presentando, han dado pie al desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías que únicamente se habían utilizado en obras de ingeniería civil, tal es el caso de las Tunnel Boring Machine (TBM), y el desarrollo de algunas nuevas como los equipos de excavación mecanizada con secciones rectangulares u ovaladas, tal es el caso para obras horizontales y con pendiente como niveles de extracción y rampas de acceso respectivamente.

Si bien es conocido que cada obra es diferente a otras y tienen sus propias particularidades, referente a condiciones geológicas, geometría, condiciones geotécnicas, etc., y otras particularidades de aspecto más técnico, como lo son, experiencia en construir con este tipo de equipos, disponibilidad de personal capacitado, etc. En conjunto estas peculiaridades deben ser analizadas y tomadas en cuenta para propiciar la correcta selección del método de excavación y de optarse por el método mecanizado, la correcta selección de la máquina TBM, si bien es un equipo que cuenta con altas tasas de excavación en comparación al método convencional, esto lo hace atractivo económicamente cuando se trata de túneles con una longitud considerable (>2km), pero no siempre va representar la mejor solución si no son consideradas las características anteriores, lo que puede poner en riesgo el proyecto mismo, si las condiciones son favorables para la selección de una máquina TBM, entonces esta traerá reducción en los tiempos de excavación, el tiempo de la puesta en operación del proyecto minero será menor y generará condiciones más favorables de seguridad.

Algunos puntos a considerar para la selección entre un equipo TBM que produce una sección circular y un equipo de sección rectangular son:

1. Las máquinas TBM proveen un perfil circular, lo que favorece a la obra en el estado de esfuerzos, mientras que una sección rectangular debe ser evaluada geotécnicamente para prever su comportamiento en la excavación.
2. La cantidad de material excavado en una sección circular es alrededor de 48% mayor para obtener la misma longitud de piso plano que una obra rectangular. Una obra más pequeña siempre será más estable que una con mayores dimensiones
3. Las tasas de excavación con TBM son mayores (2 o 3 veces más) que la de un equipo de sección rectangular, pero se debe considerar y evaluar los

tiempos y costos que implica excavar o colocar un piso plano, apto para labores mineras.

Los equipos de excavación mecanizada tienen tasas de excavación más altas que las del método convencional, en cuanto a TBM se refiere, pueden excavar con tasas de 20 a 50 m/día, las máquinas de sección rectangular 10-20 m/día, rozadoras de 4-8 m/día, mientras que la P&V alcanza tasas de 6-9 m/día, en una misma obra.

Si el tiempo de concepción varía entre estos métodos es importante analizar si la mina cuenta con algún desarrollo que tenga una longitud mayor a 3km para que sea factible el uso de TBM y de 5 km en el caso de equipos con sección rectangular. (Ver gráfico)

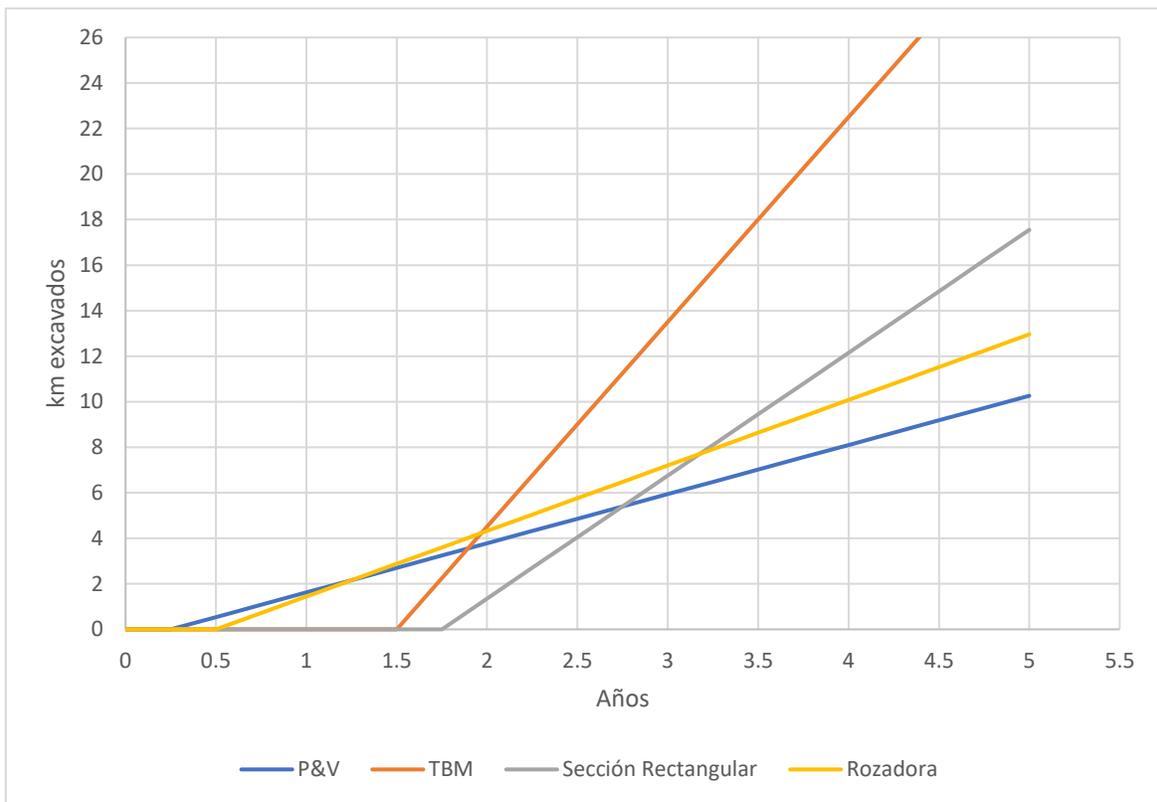


Ilustración 1 tiempo de concepción para iniciar la excavación diferentes métodos.

En la minería del carbón subterránea es de notoriedad observar que el desarrollo, explotación y extracción del mismo se realiza mediante medios mecanizados, el uso de explosivos es inexistente en este tipo de minados, esto consecuencia de las condiciones al interior de la mina, la presencia de una atmosfera explosiva. De alguna manera esto hace reflexionar sobre el uso y versatilidad de los equipos de excavación mecanizada, y como esto se puede superponer al minado de yacimientos polimetálicos que cuenten con similitudes geológicas.

En el capítulo 5 se analizó la preparación de un contrapozo ranura de 20m de longitud para iniciar una explotación, algunas consideraciones extra que se deben considerar es que en el método de P&V no se asume ninguna obra quedada o con

un resultado ineficiente, también se asume que el equipo de perforación larga únicamente se utiliza para este tipo de obras. Un equipo tipo RBM puede llegar a ser el doble de costoso, pero debe considerarse que su eficiencia de excavación es del 100%, mientras que el método de P&V tiene una eficiencia variable, pudiendo caer a 50% o menos, lo que significaría un costo mayor al uso de un equipo de excavación mecanizada. Los equipos tipo RBM, no dañan la roca circundante de la excavación, la vibración es mínima y las condiciones de seguridad aumentan.

En cuanto a la excavación de obras verticales y profundización de las mismas, se han desarrollado y mejorado tecnologías para aplicarse en la industria minera, como los equipos de desarrollo y profundización de tiros para diámetros considerablemente grandes (>5m) y para obras de menor diámetro se han desarrollado equipos más versátiles por ejemplo, equipos sobre neumáticos que cuentan con la tecnología Raise Boring Machine (RBM) y sus derivadas, cómo la tecnología Boxhole, Pilot Drilling, entre otras.

Es una realidad que muchas obras verticales hoy en día se siguen excavando con métodos convencionales, como máquina de pierna, máquina trepadora tipo Alimak, estas obras conllevan un gran riesgo de seguridad al personal, debido a la acumulación de gases producto de la voladura en la parte superior de la obra, tal es el caso del monóxido de carbono (CO), que es altamente dañino para el ser humano. Un equipo de excavación vertical es capaz de eliminar este riesgo presente en la minería subterránea.

El desarrollo de nuevas tecnologías en la minería es esencial para sostener una minería segura y más productiva a medidas que las condiciones de operación van siendo más desfavorables, cómo se mencionó anteriormente, el uso de robots, drones, softwares de integración, entre otros, ayudará notablemente al mejorar las condiciones de seguridad y operación dentro y fuera de la mina y aumentará la productividad de las operaciones.

REFERENCIAS

A framework for the introduction of mechanized mining R.P.H. WILLIS, J.R. DIXON, J.A. COX, and A.D. POOLEY, Turgis Consulting, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2004.

Automation and Robotization of Underground Mining in Poland Łukasz Bołoz and Witold Biały, Department of Machinery Engineering and Transport, Department of Production Engineering, Poland, October 2020

Aplicación de la tecnología measurement while drilling en túneles, Dixie Rivera Bernal. Universidad de Chile Santiago de Chile. Julio, 2012.

Autonomous Exploration and Mapping of Abandoned Mines Sebastian Thrun, et. al. Computer Science Department, Stanford University, Stanford, CA, 2003.

Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana Volumen conmemorativo del centenario Revisión de algunas tipologías de depósitos Minerales de México Vol. 58, núm. 1, 2006

Carbón, Dr. Vicente J. Cortés, Catedrático de la Escuela de Ingenieros de Sevilla. 2011

Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining, Y.L. Zheng, Q.B. Zhang, J. Zhao, Department of Civil Engineering, Monash University, VIC 3800, Australia, January 2016

Coal mining M. Albert Evans See All Contributors. Mining consultant. Coauthor of Technical Manual on Longwall Mining Systems. Pennsylvania, USA.

Considerations for large-diameter raiseboring, RR Lyle Cementation Canada Inc., a, Underground Mining Technology, Sudbury, Canada, 2017.

Development of new empirical models for performance estimation of a raise boring machine, Aydin Shaterpour-Mamaghania, Hanifi Copura, Engin Doganb, Tayfun Erdoganc, Mining Engineering Department, Ankara, Turkey, August 2018

Diario oficial de la federación (ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. 2020)

Diario oficial de la federación (ACUERDO por el que la Secretaría de Energía aprueba y publica la actualización de la Estrategia de Transición para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles más Limpios, en términos de la Ley de Transición Energética. 2020)

Digitalisation in norwegian tunnelling, Publication No. 28, Norwegian Tunnelling Society 2019

Diseño y ejecución de obras subterráneas, Carlos López Jimeno, España, 1995.

Effects of overburden characteristics on dynamic failure in underground coal mining. Mark K Larson, International Journal of Mining Science and Technology, Washington, USA, 2017

EIA International Energy Statistics : Coal : Recoverable Reserves. USA, 2012.

Estado del arte de brocas de perforación, Grupo de Investigación: Perforación, Jorge Luis Ramos Ramos, Universidad de América, 22 de noviembre de 2011.

Evaluación de los parámetros de perforación en barrenos y correlación con la geología del terreno, diego González cabrero. Escuela técnica superior de ingenieros de minas y energía, España, 2015.

Epiroc mobile miner – hard rock cutting is now a reality, Johnny Lyly, et. al. Sweden, 2018

Explosive gas zone formation in underground coal longwall bleeder ventilated gobs with an adjacent panel using cfd modeling, r. C. Gilmore, Colorado School of Mines, USA, February 2016.

Hardrock Tunnel Boring Machines, Willy Ritz, Martin Herrenknecht, Bernhard Maidl, Leonhard Schmid, In co-operation with Gerhard Wehrmeyer and Marcus Derbort, Berlin, 2008.

Herrenknecht Mining | Pioneering Underground, Technologies, Herrenknecht Shaft Boring Technology, Association of British Mining Equipment Companies, Nottingham, ABMEC, Richard Dexter, November 2018.

Herrenknecht Mining | Pioneering Underground Technologies, Mechanized Shaft & Raise Excavation Webinar, Patrick Rennkamp & Danny Harquail January, 2020.

Investigation ahead of the tunnel face by use of a measurement-while-drilling system at olkiluoto, Finland. Jouni Valli. January 2010.

Innovative mechanical excavation techniques for mining applications, jack brockway ceo and president of hts Usa/Canada Herrenknecht ag. Toronto, march 2014.

Integration of the mining plan in a mining automation system using stateof-the-art technology at De Beers, Finsch Mine, D.J. Burger, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, August 2016.

Key technologies of drilling process with raise boring method, Zhiqiang Liua,, Yiping Meng, Institute of Mine Construction, China Coal Mine Engineering, China, December 2014

Las máquinas rozadoras en túneles y minas, Laureano Cornejo Álvarez, España 1984.

Machines for Mechanical Mining of Hardly Workable and Abrasive Rocks, Antoni Kalukiewicz, AGH University of Science and Technology, Poland, 2020.

Maquinaria para sondeos y perforaciones. Yepes, V. Apuntes de la Universidad Politécnica de València, Ref. 209. Valencia, 2014.

Mechanical Excavation in Mining and Civil Industries, Nuh Bilgin, HAnifi Copur, Cemal Balci, Florida USA, 2014.

Mechanized shaft sinking system, Łukasz Bołoz, AGH University of Science and Technology in Kraków, January 2018.

Mechanized Tunnelling in Urban Areas, desing methodology and construction control, Vittorio Guglielmetti, Piergiorgio Grasso, et. al. London, 2007.

Manual de diseño y construcción de túneles de carretera, SCT., México, 2016

Manual de perforación y voladura de rocas. 2ª edición. López Jimeno, C Instituto Tecnológico Geominero de España, IGME. Madrid. 1994.

Minería y Alta Tecnología, Alfredo Bertrand, Epiroc Mexico S.A. De C.V., 2019.

Mining & Construction, Una revista de Epiroc, La edición sobre Diversidad, Örebro, Suecia, 01–2020.

Mining-RoX – Mobile Robots in Underground Mining, Steve Grehl Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2015

Minería y alta tecnología Alfredo Bertrand –Epiroc Mexico S.A. De C.V., 2021.

Mobile mechanical vein miner; New machine developed for Lucky Friday Mine, Clayr Alexander, Mark Board, Wes Johnson and Mikael Ramström, January, 2018.

Multi-Sensor Fusion and Error Compensation of Attitude Measurement System for Shaft Boring Machine, Xinliang Wang et. al, School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology, China, November 2019.

New tunnel boring machine accelerates tunnel construction in deep mining operations, Fred Christopher Delabbio, July 2010

Perfil de Mercado del carbón. Secretaria de Economía. México, D.F. 2014.

Plataforma trepadora “Alimak”, Daniel Alcides Carrión, Universidad nacional, Facultad de ingeniería, Cerro de Pasco, Agosto 2009.

Reach first ore quicker: rethinking underground mining using next generation boring machines, Lok Home, President Robbins, Mining Magazine, Virtual Event. November 2021.

Raise boring equipment, Sandvik, Sandviken, Sweden. 2007.

Realtime On-Board Rock Mass Analysis, Sandvik geoSURE, Tuomo Pirinen, ITA Tunnelling Awards, November 2016.

Shaft sinking for all ground conditions, Herrenknecht, Germany.

SME Mining Engineering Handbook 2nd Edition Volume 2, Howard L. Hartman, Professor Emeritus of Mining Engineering, The University of Alabama, LitUeton, Colorado ,1992.

Supporting Technology Analysis and Attitude Control Principle of MSJ5.8/1.6D Shaft Boring Machine, Tan Hao, University of Science and Technology Beijing, China, 2019.

Technique of Measuring Initial Deformation Around an Opening, Analysis of Two Raise-Bore Tests, Galen G. Wadell, Bureau of Mines Report of Investigations, April 1971.

Technical considerations for TBM tunneling for mining projects, Dean Brox, Dean Brox Consulting, Ltd., Vancouver, Canada. 2013.

The application of Epiroc 40V mobile miner in place of drilling and blasting machines in underground mining operations and its efficiency indices. Asliddin Maxmadoliev, et.al. Tashkent State Technical University, May 2020

The cost and effect of powered roof support in longwall installation cost, mustafa emre yetkin, ferhan şimşir, m. Kemal özfirat and hayati yenice, Mining Engineering Department, Turkey. 2017

The future of tunnel for underground mines. Boring Cutting-Edge Conference, Virtual event, Advances in tunneling technology. Dennis Ofiara. 2020.

The Next Generation of TBMs for Mining Applications, Dennis Ofiara, Greg Watson The Robbins Company Solon, Ohio USA, 2016

The Next Level: Why Deeper Is Better for TBMs in Mining, Ryan Gratias, Craig Allan, and Desiree Willis, The Robbins Company. North American Tunneling Conference, 2014

Underground robots: How robotics is changing themining industry, A. Chakravorty, (2019), EOS. University of Wisconsin-Madison.

Vertical shaft machines. State of the art and vision, Peter Schmäh, Acta Montanistica Slovaca Ročník, 2007.

Void fill and support techniques to stabilize drift excavated through a transition zone mined by a TBM at the Stillwater mine, Johnson Josh. Et. al. Minova, Georgetown, KY, USA 2016.

Well engineers notebook, 2nd Edition, Shell international exploration and production B.V. EP Learning and Development, 2001.

Página Web de Mobilaris, <https://www.mobilaris.se/>

Página Web de Emesent <https://www.emesent.io>

Página Web Robbins <https://www.robbinstbm.com/products/mining-machines/mine-development-machine/>

Coal-bed Methane (CBM) drainage from Underground Coal Mines Partha Das Sharma <https://saferenvironment.wordpress.com/2008/10/15/coal-bed-methane-cbm-drainage-from-underground-coal-mines-%E2%80%93-safer-and-eco-friendly-option-of-green-energy/>

https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/pm_carbon_2014.pdf

El carbón como recurso natural y su impacto ambiental. Facultad de química de la UNAM. http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/carbon_32596.pdf

<https://www.therobbinscompany.com/es/projects/grosvenor-decline-tunnel/>

<https://www.tunneltalk.com/Australia-30Sep2014-Robbins-success-opens-door-to-future-TBM-application-for-coal-mine-access.php>

<https://tunneltalk.com/Australia-06Nov2013-Robbins-EPBM-launches-for-Redpath-on-coal-drift-excavation.php>

Raise boring machine www.terratec.co