Capítulo 7. Métodos de excavación

SCT

SECRETARÍA DE
COMUNICACIONES
Y TRANSPORTES

ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

DIRECCIÓN GENERAL DE
SERVICIOS TÉCNICOS

Capítulo 7. Métodos de excavación

Túnel Piedra Colorada, Carretera Durango-Mazatlán

7.1. Introducción

La elección del método de excavación de un túnel depende de varios factores dentro de los que destacan el tipo de terreno a excavar y su longitud. Hasta ahora la construcción de túneles carreteros en México se ha realizado con los métodos de excavación convencional con perforación y voladura utilizando explosivos y la excavación mecánica mediante máquinas de ataque puntual como rozadoras, martillos hidráulicos, etc. Otro método de excavación de túneles corresponde con la utilización de máquinas tuneladoras TBM (*Tunnel Boring Machine*), a la fecha en México no se ha construido ningún túnel carretero con este método.

Es importante mencionar que cada método de excavación tiene ventajas y desventajas por lo que se deberá hacer un análisis y una evaluación de cada proyecto en particular, para determinar el más conveniente.

El método de excavación con TBM permite excavar la sección completa del túnel al mismo tiempo que se realiza la colocación del sostenimiento o un revestimiento.

Para elegir este método y para que la obra resulte un éxito, el túnel debe contar con la longitud suficiente y la máquina debe ser seleccionada con base en las condiciones geológico – geotécnicas específicas y a detalle del sitio donde se pretenda construir el túnel.

La excavación con método convencional empleando equipos mecánicos con tecnología de punta y la ayuda de técnicas constructivas complementarias, es capaz de conseguir además de rendimientos óptimos, un alto nivel de seguridad, aportando grados de mecanización y automatización considerables.

La limitación más importante de la excavación convencional mecánica está en la dureza, tenacidad y abrasividad de las rocas, que repercute en rendimientos muy bajos elevando el costo de la obra hasta llegar al punto de volverla totalmente inviable.

Cuando se presentan estos casos es necesario el empleo de explosivos con los cuales se pueden conseguir avances importantes excavando a sección completa o en fases, ya sea en roca muy dura y altamente abrasiva o roca poco fracturada. Dentro de los inconvenientes de excavar con explosivos es que los perfiles de excavación son irregulares y si no se diseñan y controlan adecuadamente las voladuras, se pueden producir sobre excavaciones considerables que repercuten directamente en el costo de la obra.

La heterogeneidad del terreno y de sus propiedades geomecánicas a todo lo largo del túnel, así como las condiciones impuestas por el entorno (presencia de agua, poca cobertura, fallas geológicas, construcciones o instalaciones cercanas, etc.) plantean una serie de problemas constructivos que si no se cuenta con la maquinaria, las técnicas constructivas, los equipos y el personal adecuados para resolver diferentes situaciones imprevistas, pueden repercutir en atrasos y nuevamente en los costos.

La construcción de túneles carreteros es una disciplina altamente especializada que exige la aplicación de métodos y sistemas de trabajo que permitan obtener rendimientos adecuados manteniendo en todo momento la seguridad; para lo cual, se requiere de personal altamente calificado, responsable y con amplia experiencia en la materia.

7.2. Consideraciones para la selección del método de excavación

Para elegir el método de excavación a emplear durante la construcción de un túnel, se deben tomar en cuenta varios factores; algunos de índole técnico, económicos y de tiempo de ejecución. A continuación se describen algunos aspectos a considerar:

Cuando la roca tiene una resistencia alta, es necesario emplear excavación mediante explosivos, mientras que si la resistencia es media o baja puede emplearse indistintamente la voladura o la excavación por medios mecánicos.

La manera de excavación en roca tiene una considerable influencia sobre el desgaste producido en las herramientas de corte o excavación; aunque existe una interrelación entre la calidad, la dureza y la abrasividad de las rocas, en determinadas formaciones blandas, si la excavación se realiza con equipos continuos por el sistema de corte y rozado, los desgastes pueden llegar a elevar el costo de la excavación.

La sección del túnel puede ser una condicionante importante. Las tuneladoras permiten excavar únicamente los túneles de forma circular, por lo que en túneles carreteros que requieren una base plana, se desaprovecha bastante espacio, aunque en algunos casos se emplea para alojar algunas de las instalaciones.

En México hasta ahora, los túneles de carretera por su longitud y sección, generalmente se han excavado con método convencional, en fases, empleando perforación y voladura para rocas duras y las rozadoras y excavadoras hidráulicas para rocas blandas.

Un aspecto importante que debe tomarse en cuenta al momento de seleccionar el método de excavación de un túnel, sin duda es el costo. Las máquinas tuneladoras tienen un costo inicial elevado, esta inversión resultará rentable para una determinada longitud de túnel excavado, lo que exigirá un proyecto con importantes longitudes que permitan la amortización de la tuneladora.

Asimismo debe tomarse en cuenta que los explosivos producen vibraciones que hacen muy complicada su utilización en zonas urbanas o con edificios próximos. Incluso pueden existir problemas cuando las voladuras se efectúan en la proximidad de vías de circulación en uso, tales como carreteras, ferrocarriles, etc. En tales casos, normalmente para excavar el túnel se utilizan medios mecánicos por razones de seguridad con el fin de evitar posibles daños.

7.3. Definición de fases y secuencias de excavación

En México las dimensiones de los túneles carreteros actualmente construidos o en proyecto son para 2, 3 o 4 carriles y sus áreas de excavación varían de 80 a 230 m² aproximadamente. Dependiendo las dimensiones de la excavación, de calidad del material, de las condiciones geohidrológicas y de la cobertura del túnel en ocasiones el proyecto debe contemplar efectuar la excavación en fases, sobre todo cuando la calidad del material es muy mala y el túnel es de cuatro carriles. La excavación por fases se emplea tanto en el método de perforación y voladura como en la excavación mecánicas de ataque puntual (martillos, rozadoras, palas, etc). El método mecanizado no requiere de fases ya que la tuneladora ataca toda la sección del túnel.

Los criterios técnicos de la excavación de un túnel por fases, se resumen en los siguientes puntos:

- Una excavación de dimensiones pequeñas presenta menos problemas en cuanto a estabilidad del terreno que otro de mayor tamaño. Por lo tanto, si se excava una primera fase de dimensiones reducidas pero suficientes para que entren los equipos, los problemas que puede dar el material serán menores y más fáciles de solucionar. Además al excavar las fases restantes, se habrán mapeado las zonas de mala calidad del macizo rocoso o del suelo, por lo que se podrán implementar el tipo de sostenimiento adecuado para cada caso.
- El alcance y dimensiones de la maquinaria y equipo (excavadoras, jumbos, rozadoras, Manipuladores, etc.) está limitado a unos 6-8 metros de altura, aunque existen modelos especiales que alcanzan mayores dimensiones. El excavar secciones de más altura dificultaría enormemente las labores de excavación y sobre todo al implementar el sostenimiento: concreto lanzado, marcos metálicos, anclas, etc. Por lo anterior se recomienda diseñar la excavación de la media sección superior no mayor de 6.5 m de altura.
- Mediante la excavación por fases pueden conseguirse mayores rendimientos, ya que distintos equipos pueden trabajar simultáneamente en fases distintas a una cierta distancia, logrando avances superiores a los que se conseguirían a media sección superior o a sección completa. Aunque en ocasiones se prefiere acortar los avances y excavar a media sección superior completa, que dividirla en fases con avances largos. Al final el diseño de la excavación estará regida por las dimensiones del túnel, la calidad del material y el tipo de sostenimiento.

El esquema habitual de un túnel carretero de dimensiones para alojar dos o tres carriles, corresponde a una sección de excavación dividida en una primera fase denominada MEDIA SECCIÓN SUPERIOR y una segunda llamada BANQUEO, ambas, pueden excavarse en una o varias fases.

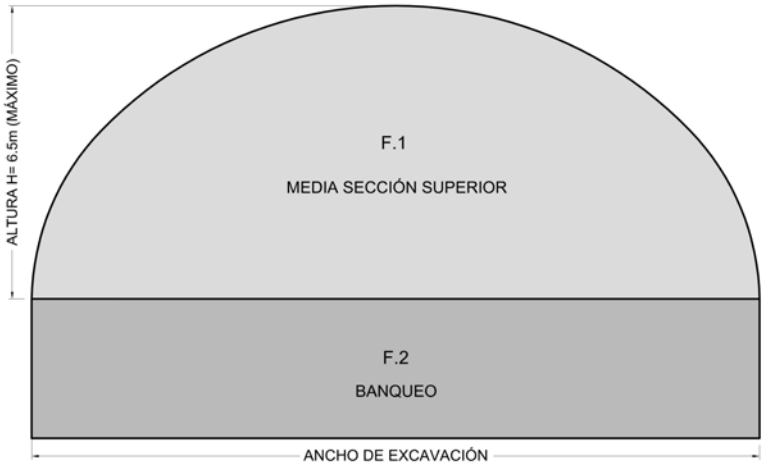


Figura 7.1. Excavación en dos fases (Media Sección Superior y Banqueo).

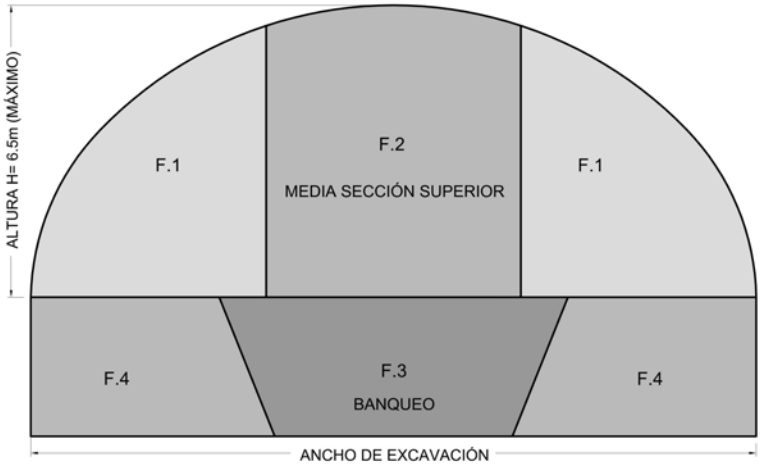


Figura 7.2. Excavación en etapas.

En ocasiones se presentan situaciones en las que se tienen materiales de mala calidad, muy deformables o materiales expansivos que requerirán la excavación y construcción de una tercera fase denominada CONTRABOVEDA.

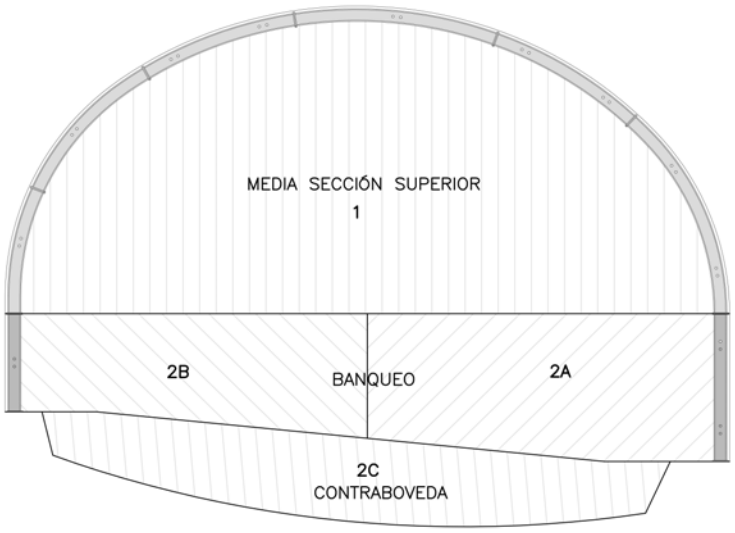


Figura 7.3. Sección de excavación con contrabóveda.

El desfase entre una fase y la siguiente, depende tanto de criterios constructivos (movimiento de máquinas, rampas, caminos, etc.), como de condiciones geotécnicas de los materiales.

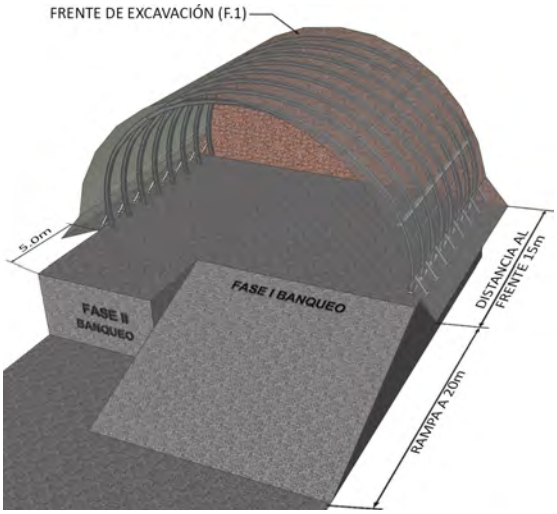


Figura 7.4. Ejemplo de excavación, media sección superior en una fase y banqueo en fases.

Figura 7.5. Excavación de la media sección superior en dos fases.

Figura 7.6. Excavación del banqueo en fases.

7.4. Excavación mediante el uso de explosivos

7.4.1. Generalidades

El sistema de perforación y voladura para la excavación de túneles es una técnica convencional utilizada cada vez con mayor regularidad debido a las numerosas ventajas que presenta frente a la excavación mecánica en cuanto a tipos de roca, rendimientos altos y movilidad de los equipos. La excavación mecánica es rentable cuando se tiene una longitud considerable de túnel y se conocen

suficientemente las características geológicas y geotécnicas del terreno; debe tomarse en cuenta que en rocas muy duras, el desgaste de piezas y en ocasiones los bajos rendimientos son una clara desventaja de este sistema de excavación, como lo es también cuando se presentan zonas de falla y la presencia de terrenos mixtos.

Las partes o trabajos elementales de que consta el ciclo de trabajo característico de las excavaciones mediante perforación y voladura son las siguientes:

- Replanteo en el frente del esquema de tiro.
- Perforación de los taladros.
- Carga de los taladros con explosivo (barrenos).
- Voladura y ventilación.
- Retiro del escombro o rezaga y saneo del frente de excavación.

El esquema de tiro (Figura 7.7) es la disposición en el frente del túnel de los taladros que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir en cada uno y el orden en que se va a hacer detonar cada barreno, diseñándose al principio de la obra con base a la experiencia y a una serie de reglas empíricas que más adelante se ejemplifican. Posteriormente, a lo largo de la excavación del túnel, se va ajustando en función de los resultados obtenidos en cada voladura.

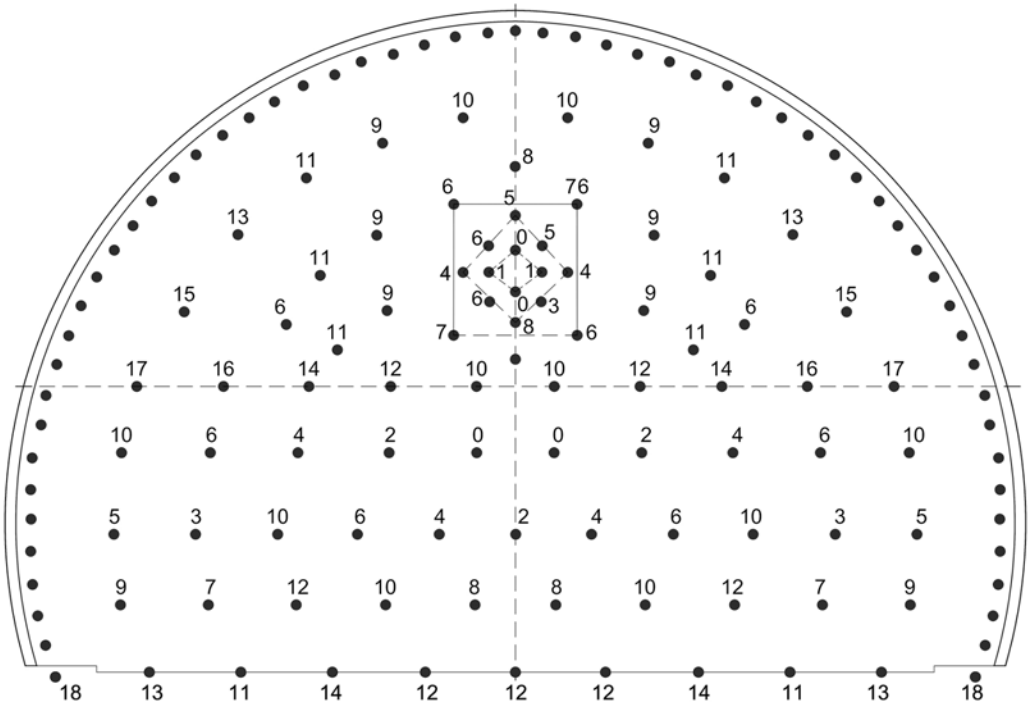


Figura 7.7. Esquema de tiro.

La voladura del banqueo con barrenos horizontales, tiene la ventaja de que se utiliza el mismo sistema de trabajo y maquinaria que la fase de media sección superior, pudiendo recortarse con la voladura la forma teórica del túnel. Por otro lado, la voladura en banco es más rápida de llevarse a cabo, con un consumo menor de explosivo, y no necesita ser retirado el escombro en cada voladura, pero requiere de un recorte posterior para conseguir el perfil del túnel en los hastiales.

Los taladros deben de tener una longitud de un 5 a 10 % superior a la distancia que se quiera avanzar con la pega, llamada longitud de avance, ya que siempre se producen pérdidas que impiden aprovechar al máximo la longitud de los taladros. Las longitudes de avance típicas están comprendidas entre 1 y 4 metros y se fijan en función de la calidad de la roca, cuanto mejor es la calidad del terreno, mayores serán los avances posibles. Con una roca de calidad media-adecuada

es habitual perforar taladros de 3 a 3.50 metros para avanzar entre 2.80 y 3.20 metros en cada voladura respectivamente.

Para la perforación y voladura, la sección teórica del túnel se divide en zonas, en las que las exigencias, tanto de densidad de perforación, como de carga específica de explosivo y secuencia de encendido son distintas. Estas zonas son:

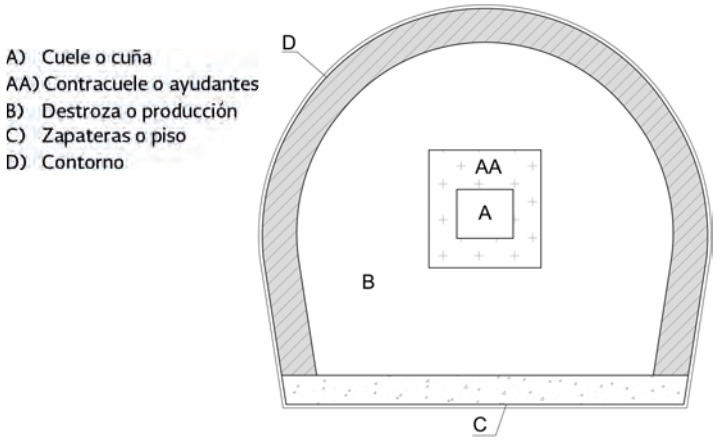


Figura 7.8. Zonas de una sección de voladura.

Cuele. Es la fase de la voladura que dispara en primer lugar. Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que puede escapar la roca con lo cual se posibilita y facilita su arranque. El cuele es sin duda la más importante de todas las fases de la voladura de un túnel en relación con el avance de la voladura.

Existen distintos tipos de cuele (Figura 7.9), los cueles en "V" y en abanico, que facilitan la salida de la roca hacia el exterior, pero tienen el inconveniente de que los taladros forman un ángulo con respecto al eje del túnel, por lo que su correcta perforación tiene una mayor dificultad y exige variar el esquema de perforación para cada longitud de avance. En túneles de secciones de excavación reducidas estos cueles no permiten grandes avances por voladura.

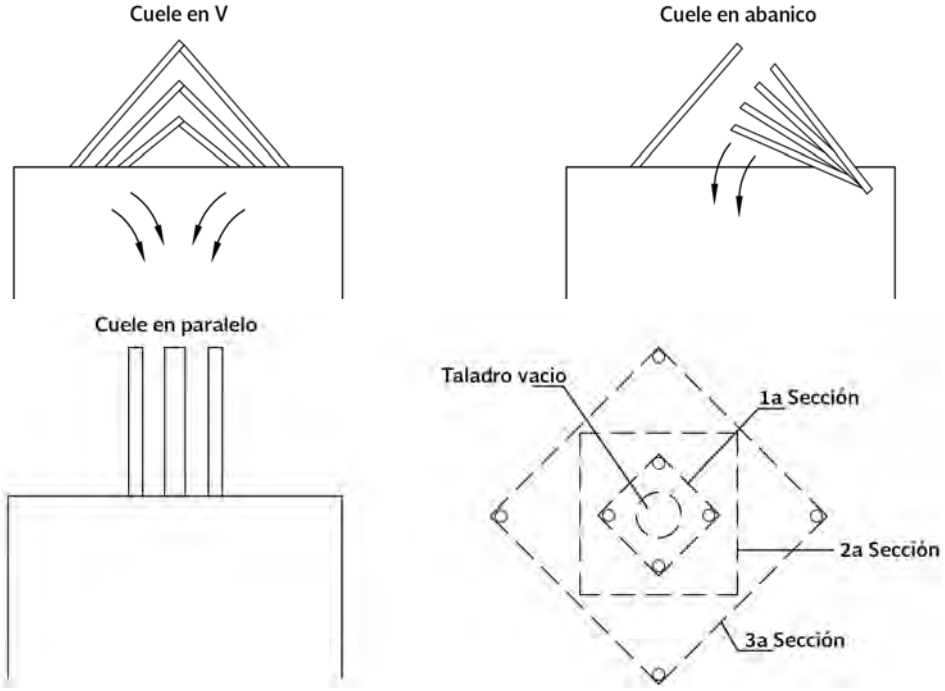


Figura 7.9. Tipos de cuele.

El cuele más usado por su simplicidad es el cuele paralelo. Consiste en un taladro vacío (barreno de expansión), sin explosivos, de mayor diámetro que el resto (de 75 a 102 mm) y, a su alrededor, tres o cuatro secciones de taladros cargados que detonan sucesivamente siguiendo una secuencia preestablecida. La misión del barreno de expansión es la de ofrecer una superficie libre que evite el confinamiento de la roca de modo que facilite su arranque. Su diámetro varía entre 100 y 300 milímetros. En ocasiones puede sustituirse por dos taladros vacíos de diámetro menor (75 mm).

Destroza. La destroza es la parte central y más amplia de la voladura, cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona del cuele y contracuele, que es la zona crítica de la voladura.

Zapateras. La zapatera es la zona de la voladura situada en la base del frente, a ras del suelo. Los taladros extremos suelen ir un poco abiertos "pinchados" hacia fuera con objeto de dejar sitio suficiente para la perforación del siguiente avance. Comúnmente los barrenos de las zapateras son los que más carga explosiva contienen ya que, aparte de romper la roca han de levantar ésta hacia arriba. Para evitar repiés, van ligeramente "pinchados" hacia abajo y son disparados en último lugar.

Contorno. Los taladros perimetrales o de contorno son importantes pues de ellos dependerá la forma perimetral de la excavación resultante. Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica, aunque las irregularidades y discontinuidades de la roca dificultan dicho objetivo.

Existen dos técnicas de efectuar los tiros perimetrales: el recorte y el precorte. El recorte, que es la técnica más empleada, consiste en perforar un número importante de taladros paralelos al eje del túnel en el contorno, a la distancia conveniente (entre 45 cm y 100 cm) y con una concentración de explosivo pequeña o incluso nula. En la secuencia de encendido son los últimos barrenos en detonar.

Por otro lado, la técnica del precorte se perfora un mayor número de taladros perimetrales y paralelos entre sí unas distancias entre 25 cm y 50 cm, con una concentración de carga explosiva entre 0.1 y 0.3 kg/m. Esta técnica exige una perforación muy precisa que asegure un buen paralelismo y una homogénea separación entre los taladros. En la secuencia de encendido, son los primeros en detonar, con lo que se crea una fisura perimetral que aísla y protege la roca de las vibraciones del resto de la voladura. La técnica del precorte, por su esmerada ejecución y costo elevado, es de uso poco frecuente en túneles, excepto en casos muy especiales.

7.4.2. Procedimiento

La sección de los túneles de carretera corresponde con una geometría elíptica y su excavación, hasta ahora se ha efectuado con las técnicas de barrenación y voladura. Gran número de innovaciones como son los equipos de perforación modernos, el resultado de un apilamiento adecuado en la rezaga y un eficiente sistema de ventilación ha provocado una disminución importante en la reducción del tiempo en su ejecución.

Para túneles carreteros se utilizan equipos de perforación llamados "jumbos", equipo montado sobre neumáticos, equipados con un número que oscila entre una y hasta 3 máquinas perforadoras, aunado al equipo de cargado y rezagado como son retroexcavadoras, cargadores frontales y camiones articulados constituyen actividades que aportan un mayor grado de rapidez y precisión en el trabajo.

Hoy en día, el cambio a productos explosivos más seguros y acordes con las nuevas tecnologías en su aplicación y manejo en el campo tales como los iniciadores electrónicos que nos ofrecen mayor precisión en los tiempos de disparo y por consecuencia una reducción importante en vibraciones que se generan con los disparos, éstos materiales explosivos constituyen de igual manera una parte muy importante para llevar a cabo la excavación de la roca con la fragmentación deseada en su mayor volumen y principalmente en los resultados en el contorno del túnel como son barrenos de cielo, tablas, piso y cuña.

Complementando lo anterior, los explosivos que se emplean en la construcción de túneles carreteros deben elegirse teniendo en cuenta la generación de humos y gases nocivos liberados por la voladura. El mantener estos factores al mínimo puede reducir considerablemente la duración total del ciclo de trabajo.

La voladura en el túnel es una de las operaciones más difíciles debido a que la única cara libre es la cara transversal del túnel, a diferencia de las voladuras de bancos, en donde existen generalmente de una hasta tres caras libres en algunos casos.

Debido al alto grado de confinamiento del frente, los bordos y espaciamientos entre los barrenos requieren de factores de explosivo más alto que fluctúan del orden de 1.2 a 3.5 kg/m^3 en la zona de inicio de la voladura (cuña).

En el desarrollo de túneles, por lo general se favorece la barrenación como ejemplo con la aplicación de procedimientos como son el de cuña quemada, que es el resultado de la falta de espacio para posicionar al equipo y hacer una cuña en "v" o una barrenación en "v", y en su caso barrenación en abanico.

Si se realiza el trabajo con un "jumbo", esta actividad puede estar apoyada utilizando brocas de mayor diámetro, con el objeto de crear una área de alivio mayor en el momento del disparo, tal que permita un desalojo eficaz y rápido del material quebrado producto de los barrenos cargados y no cargados que forman la cuña, en conjunto, se puede lograr una eficiencia del orden del 95 % de avance.

Figura 7.10 Jumbo. montado sobre neumáticos.

Después de perforar la cuña teniendo en consideración que su ubicación será en un lugar plano del frente, así como evitar perforarla en la misma área donde se ubicó en la voladura anterior; posteriormente se procede a perforar los barrenos de producción, paredes, clave y piso considerando las siguientes reglas básicas:

- Paralelismo en la barrenación
- Formación de un plano vertical imaginario al fondo de la barrenación
- Un orden de encendido de los barrenos que vaya agrandando secuencialmente la apertura del frente.

Los barrenos de producción se irán perforando en forma rotativa y secuencial aumentando su bordo según se vaya diseñando el número de cuadros calculados para complementar la plantilla de todo el frente.

Posteriormente, se perforarán los barrenos perimetrales o de contorno, ubicándolos en los límites de la excavación del túnel y se detonan después de los barrenos de producción; éstos se perforan más cerca unos de otros y se cargan más ligeros o con productos de baja densidad para minimizar el sobre-rompimiento o daños a la roca restante del perímetro de la obra.

Normalmente los últimos barrenos en ser disparados son los de piso, con el objeto de retirar la rezaga del frente del túnel.

Después de que se perforan todos los barrenos, deberá limpiarse cada uno de ellos con agua y aire antes de cargarlos.

Es indispensable el apoyarse con un atacador o fainero para proceder a realizar la actividad de carga de los barrenos, éste deberá ser lo suficiente largo para poder alcanzar el fondo de los barrenos, siendo éste de madera o en su caso con la misma manguera antiestática de la olla de presión que se utiliza para inyectar el anfo a los barrenos, esto también nos indicará que el barreno está libre de obstáculos antes de empezar a cargar.

Siempre se introducirá en el barreno primeramente el cartucho cebo con la punta del iniciador apuntando hacia la boca del barreno, debiendo empujarse hasta el fondo del barreno, nunca se debe atacar el cartucho cebado.

Figura 7.11. Cartuchos colocados en barrenos.

Durante el cargado de los barrenos, el tubo de choque deberá sujetarse de forma tirante para evitar daños provocados por el atacador o la manguera de inyección del anfo.

Es importante aplicar una presión de aire entre 70 y 100 lbs con el objeto de que el anfo quede lo suficientemente confinado dentro del barreno, que de lo contrario no realizará su función de poder generar los suficientes gases para romper y desplazar la roca.

Figura 7.12. Plantilla de barrenación.

Terminado el procedimiento de cargado de los barrenos, se procederá al amarre o conexión a la línea troncal de cordón detonante o eléctrico a una distancia más corta posible de la boca del barreno. De ésta manera, se obtendrá el ángulo de 90° recomendado entre el tubo de choque del iniciador y la línea troncal.

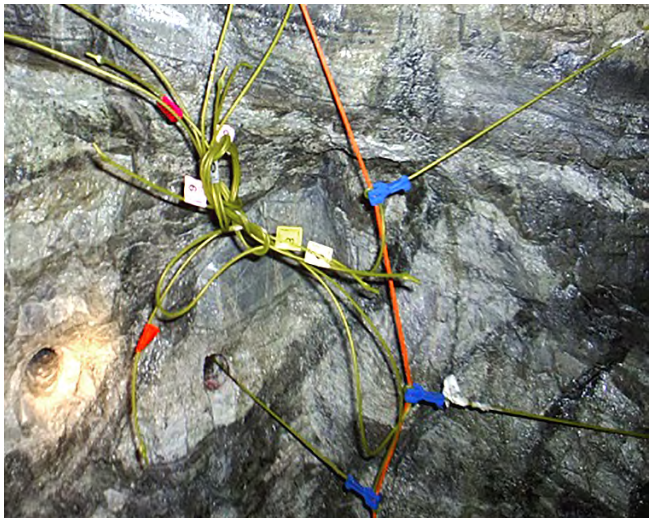


Figura 7.13. Conexión línea troncal.

Es importante formar un círculo cerrado con la línea troncal al utilizar los iniciadores "no eléctricos". Esto es para obtener mayor seguridad en su encendido, ya que así se proveen dos rutas de iniciación para cada iniciador.

Habiendo realizado las conexiones, se procederá a aplicar el protocolo de seguridad para el disparo de la voladura, iniciando con esto, una última revisión de la conexión para asegurar que todo está listo para su disparo. Se procede al disparo.

Figura 7.14. Voladura realizada.

Efectuado el disparo, se procede a llevar a cabo una inspección del resultado de la voladura, con el objeto de verificar la presencia de material explosivo "no detonado". Concluido con esto se procede a realizar el rezagado o desalojo del material excavado.

Figura 7.15. Retiro de material.

7.4.3. Maquinaria de perforación

La perforación de los taladros se puede hacer mediante el uso de martillos manuales accionados por aire comprimido, mediante martillos hidráulicos montados sobre una maquina automóvil denominada jumbo o con la utilización de track dril en las zonas donde el jumbo por cuestiones de espacio no sea funcional.

7.4.3.1. Martillos manuales

Los martillos manuales de aire comprimido funcionan a percusión, es decir, la barrena golpea contra la roca y gira de forma discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro. El detritus es arrastrado hasta el exterior del taladro mediante agua, que tiene también la finalidad de refrigerar la barrena. Los martillos manuales son actualmente de uso poco frecuente, sólo se usan, obviamente, en túneles muy pequeños o de forma accidental, pues tienen rendimientos muy inferiores a los jumbos y requieren mucha mano de obra.

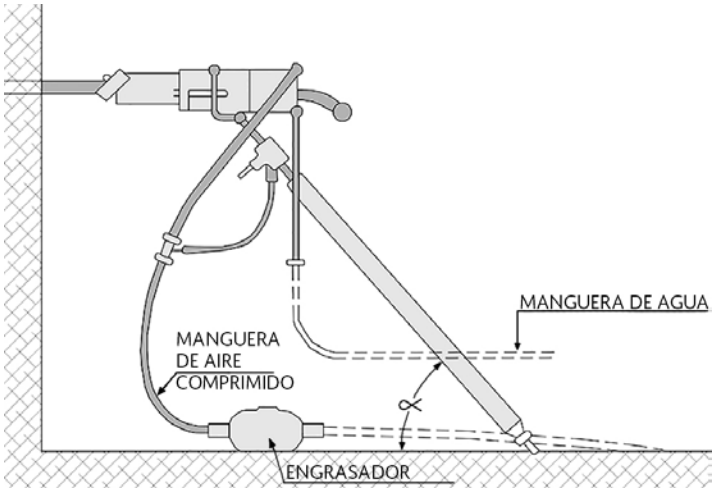


Figura 7.16. Martillo manual.

7.4.3.2. Jumbos

La máquina habitual de perforación es el jumbo, consta de una carrocería de automóvil dotada de dos o más brazos articulados, según los modelos.

En cada brazo puede montarse un martillo de perforación (perforadora) o una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente. El funcionamiento de los jumbos es eléctrico cuando están estacionados en situación de trabajo y pueden disponer también de un motor diésel para el desplazamiento. Los martillos funcionan a rotopercusión, es decir, la barrena gira continuamente ejerciendo simultáneamente un impacto sobre el fondo del taladro. El accionamiento es hidráulico, con lo que se consiguen potencias mucho más elevadas que con el sistema neumático. La refrigeración se consigue con agua.

Los rendimientos de perforación que se consiguen en los jumbos hidráulicos modernos, pueden superar los 3.5 m/min de velocidad instantánea de perforación. Los jumbos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los taladros, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar el esquema de tiro y perforar todos los taladros automáticamente.

Figura 7.17. Jumbo de 1 brazo.

Los brazos de los jumbos modernos están accionados hidráulicamente, existiendo una gran variedad de diseños, pero pueden clasificarse en los siguientes grupos: de tipo trípode, de giro en la base o en línea. Del número de cilindros y movimientos del brazo dependen la cobertura y posibilidades de trabajo de los jumbos, por lo que la selección de los brazos es un aspecto importante, ya que las labores a realizar son variadas.

También existen brazos de extensión telescópica con incrementos de longitud entre 1.2 a 1.6m. El número y dimensión de los brazos está en función del avance requerido y sección del túnel. Se aconsejan jumbos de 1 brazo para secciones de hasta 20 m², de 2 brazos hasta 100 m² y de tres hasta 180 m².

Figura 7.18. Jumbos de 3 brazos.

En los últimos años la técnica de perforación subterránea ha experimentado un fuerte impulso, basado en una mayor potencia de percusión de los martillos y en la robotización de los equipos. El control informático permite medir todos los parámetros de perforación y adaptarlos a las necesidades requeridas; además, la utilización de precisos sensores permite situar los barrenos en su posición exacta, evitándose así las imprecisiones provocadas por los errores humanos.

7.4.3.3. Track–drill e hidro-track

Los equipos conocidos como track–drill, están montados sobre chasis de orugas e invariablemente autopropulsables, el equipo cuenta con una pluma a lo largo de la cual se desplaza la máquina de perforación. Las plumas admiten movimiento vertical (con respecto al plano horizontal), con el objeto de poder perforar también con inclinaciones de hasta 45°. Actualmente en todos los casos, la presión de perforación y traslado del mismo se proporciona mediante aire comprimido que lo suministra un compresor por separado o un compresor montado en el mismo chasis (hidro-track).

Figura 7.19. Uso de Track–drill en Media sección superior y banqueo.

7.4.3.4. Canastilla de servicios

La rapidez y seguridad con la que se pueda ejecutar cada una de las actividades que intervienen en la excavación de un túnel, se requiere de la utilización de equipos auxiliares como son las canastillas para ejecutar actividades como son las de amacice, cargado de explosivos, instalación de tuberías para servicios de agua, energía eléctrica o aire para la ventilación de la obra, éste equipo va montado generalmente en neumáticos para proporcionar mayor versatilidad en sus aplicaciones.

Figura 7.20. Canastilla de servicios.

7.4.3.5. Accesorios de perforación

Los accesorios de perforación comúnmente usados son las varillas o barrenas y las bocas de perforación. Además se emplean manguitos y otros adaptadores para el ensamblaje de las piezas. Las barrenas de perforación son simplemente barras de acero con un conducto interior para el paso del agua de refrigeración y unas roscas en los extremos donde se acoplan las bocas o los manguitos.

La boca de perforación es la herramienta de corte, que generalmente es de metal endurecido (carburo de tungsteno) o widia, dispuesto en formas diversas: en cruz, en X o botones, con unos diámetros habitualmente comprendidos entre 45 y 102 milímetros.

La elección de un tipo u otro de boca, así como de sus diámetros, depende del tipo de maquinaria de perforación, de las características de la roca y del diámetro de los cartuchos del explosivo a introducir. Generalmente las bocas de botones son las que proporcionan un mayor rendimiento, al golpear la roca de forma más homogénea y ser más fácil la evacuación del detritus de roca. Para tal fin se pueden disponer varias entradas de agua frontales y también laterales. Para la elección del material de perforación y sus accesorios se recomiendan el uso de los manuales especializados facilitados por los fabricantes.

Figura 7.21. Accesorios de perforación.

7.4.4. Explosivos, iniciadores y accesorios

Los tipos de explosivo que se utilizan en túneles dependen de las características de la roca, principalmente de su densidad, resistencia a compresión y velocidad de propagación sónica de la roca. Además los explosivos, durante la detonación, deben generar gases no tóxicos, lo que limita el tipo de explosivos en interior. El tipo de explosivo también depende del grado de humedad existente en la roca.

Los explosivos industriales han evolucionado desde un inicio extremadamente rudimentarios hasta llegar a ser sofisticados, basados en la investigación y orientados en los métodos de su aplicación.

Proveedora de poderosos instrumentos para extraer materias primas de la tierra y construir nuestro mundo moderno. Durante los últimos 25 años, nuevos productos como hidrogeles, emulsiones, e iniciadores han sido perfeccionados; éstos desarrollos han apresurado cambios dramáticos en la industria de los explosivos, industria que en un tiempo dependió únicamente de la dinamita y anteriormente en la pólvora negra para llevar a cabo el trabajo pesado que previamente se dejaba a los músculos de los hombros del hombre.

Los componentes que forman los explosivos y que al ser detonados generan una gran cantidad de energía y poder, y que se multiplican varias veces en una voladura de mina de superficie o en construcción, sin embargo, para el usuario una voladura bien diseñada se distingue no solo por la violencia de la detonación, sino por la progresión ordenada del movimiento de la roca y el sonido sordo de ésta.

Cuando el explosivo se retarda y se confina apropiadamente en el macizo rocoso, la mayor parte de la fuerza demoledora de éste, se absorbe y la energía se puede controlar, pero tal control puede llevar al usuario a una sensación falsa de seguridad, por lo cual sin importar cuán bien controladas hayan estado las voladuras anteriores o que tanta confianza tenga el usuario en su experiencia, siempre debe preparar cada voladura de modo que, tanto la vida, como la infraestructura que se encuentren en él área, queden debidamente protegidas en caso que se pierda el control de dicha energía.

La SEDENA (Secretaria de la Defensa Nacional) clasifica todos los productos explosivos de la siguiente manera:

- Altos explosivos
- Agentes explosivos
- Cordón detonante
- Conductores
- Iniciadores

Los productos que se utilizan comúnmente en la construcción de túneles, son los siguientes:

Altos explosivos: hidrogeles, emulsiones y booster´s (PETN y TNT)

Medidas: 2" x 16" para excavación de portales

1" x 8"; 1" x 16"; 1 ¼"x 8", 16"; 1 ½" x 16" para barrenos de producción

1" x 39" con densidad de 0.85 g/cc para barrenos de perfilamiento y precorte

HIDROGELES EMULSIONES

Figura 7.22. Hidrogeles y emulsiones.

Figura 7.23. Iniciadores de alta presión de detonación (Boosters) y emulsiones.

Agentes explosivos (ANFO): Mezcla de nitrato de amonio y diésel, en el mercado nacional se producen 2 tipos, Anfo normal (0.85 g/cc) y de baja densidad (0.65 g/cc); éstos productos se inyecta en las frentes mediante una olla de presión que deberá trabajar entre 70 y 100 lbs.

Las ventajas de un producto de baja densidad son:

Menor generación de gases, más rápida la ventilación, rendimiento mayor del orden del 29%.

Figura 7.24. Anfo.

Cordón detonante: Son 3 tipos, de 4, 5 y 10 granos de PETN, tela trenzada y otros materiales, con un núcleo de Tetranitrato de Pentaeritritol (PETN); solo los cordones reforzados (10 granos) se utilizarán para iniciar un alto explosivo.

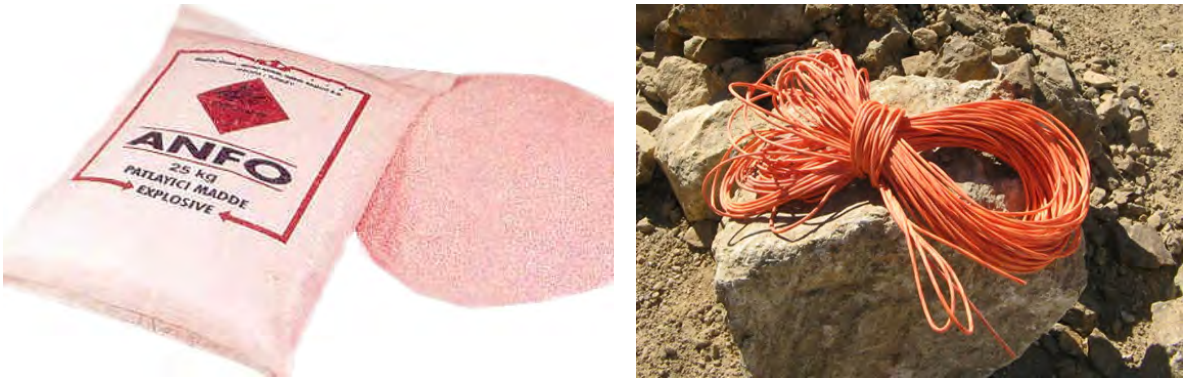


Figura 7.25. Cordón detonante.

Conductores: Mecha de seguridad; ésta mecha consiste en un corazón de pólvora negra fina, envuelta en yute acordonado fuertemente y sumergido en barniz caliente; tiene una velocidad de 135 seg/m.

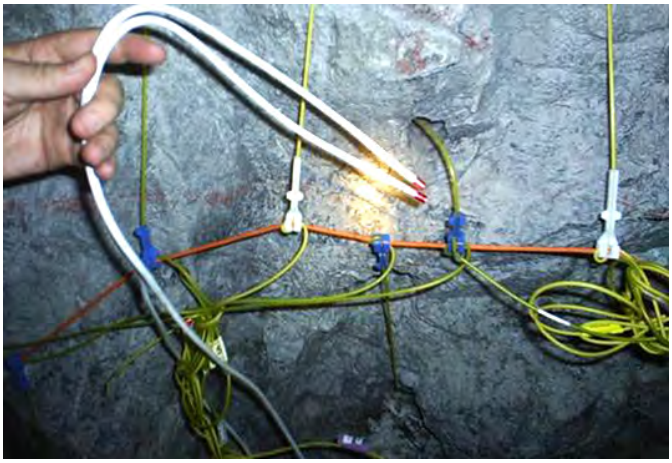


Figura 7.26. Conductores.

Iniciadores: El tipo de iniciadores que se encuentran en el mercado son eléctricos con y sin retardo, no eléctricos con retardo y electrónicos.

Iniciadores eléctricos con retardo: Cápsulas de cobre o aluminio que mediante el método de alambre–puente se produce el calentamiento, y a su vez, el encendido de la carga primaria y posteriormente con esto se hace detonar la carga base.

Tiempos de retardo que van desde los instantáneos hasta 1,000 ms.

Figura 7.27. Conectores eléctricos MS.

No eléctricos con retardo: Son iniciados por la onda que viaja a través del tubo de choque, contiene internamente otro tubo con una pequeña capa de material reactivo con cierta densidad lineal, la capa de éste material origina una señal de baja energía que viaja a lo largo del tubo de choque a una velocidad de 2,000 m/seg.

Existen en forma general 2 tipos de éstos iniciadores:

- Detonadores no eléctricos
  - **MS** (milisegundos)
  - Tiempos desde 25 ms–600 ms
  - Color naranja
- Detonadores no eléctricos
  - **lp** (períodos largos)
  - Tiempos desde 200 ms–9,600 ms
  - Color amarillo

Figura 7.28. Cielo abierto (Portales).

Figura 7.29. Subterráneo (túneles).

Figura 7.30. Cargando una frente.

Figura 7.31. Iniciador de doble retardo.

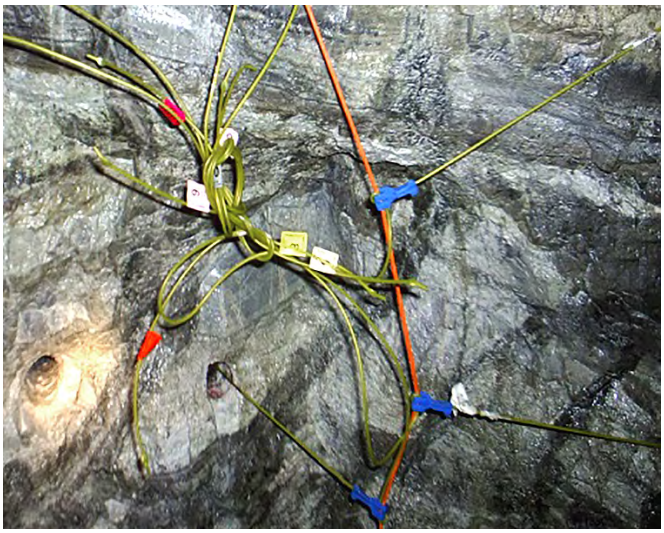


Figura 7.32. Conexión de los iniciadores con cordón detonante.

Fulminantes: Cápsulas de aluminio con una carga primaria de azida de plomo y estibnato de plomo, así como una carga base en la punta del fulminante de PETN.

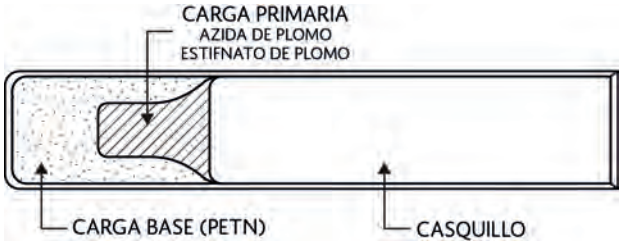


Figura 7.33. Fulminantes.

Iniciadores electrónicos: A diferencia de los iniciadores eléctricos, los electrónicos tienen la característica de que se pueden programar e iniciar mediante un sistema computarizado de campo, tal que se les pueden asignar tiempos con diferencias de un tiempo de 1 ms.

Figura 7.34. Iniciadores electrónicos y programador de tiempos.

Figura 7.35. Realizando la conexión a la línea troncal del circuito.

7.4.5. Cálculo de parámetros

Ejemplo de cálculo de parámetros para tuneleo:

DISEÑO DE CUÑA

1. Diámetro equivalente de un sólo barreno vacio:

$$DH = dh \sqrt{N} \tag{7.1}$$

Donde: DH= Diámetro equivalente de un sólo barreno vacio(mm)

dh= Diámetro de los barrenos vacios (mm)

N= Número de barrenos vacios

2. Cálculo de la profundidad del Barreno:

$$PB = \frac{DH + 16.51}{41.67} \tag{7.2}$$

Donde: PB= Profundidad del barreno en metros

DH= Diámetro del barreno equivalente en milimetros

3. Profundidad de avance (L) esperado:

$$L = 0.95\ PB \tag{7.3}$$

Ó SEA EL 95 %

EJERCICIO:

$$DH = dh \sqrt{N}$$

dh = **3" =** 76mm

N = **5**

$$DH = 76 \sqrt{5} = 169.94mm$$

Diámetro equivalente

$$PB = \frac{DH + 16.51}{41.67} = 4.47m$$

Prof. del barreno

$$L = 0.95\ PB = 4.24m$$

Avance esperado

Cuadro resumen indicando los factores que multiplican el diámetro del barreno para obtener los siguientes cuadros de perforación.

Cuadro No.	1	2	3	4
B=	1.50 D_H	2.12 D_H	4.50 D_H	9.54 D_H
R=	1.50 D_H	3.18 D_H	6.75 D_H	14.31 D_H
Sc=	2.12 D_H	4.50 D_H	9.54 D_H	20.23 D_H
T=	1.50 D	$_H$1.06 D_H	2.25 D_H	4.77 D_H
Revisar	$S >_c L\sqrt{}$	$S_c > \sqrt{L}$	$S_c > \sqrt{L}$	$S_c > \sqrt{L}$

Ejemplo práctico de cálculo de parámetros para tuneleo:

CÁLCULO DEL BORDO MÁXIMO

$$B = De\left[\left(\frac{2 \cdot SGe}{SGr}\right) + 1.5\right] \quad (7.4)$$

B= Bordo (Pies)
SGe= Densidad del explosivo
SGr= Densidad de la roca
De= Diametro del Barreno (Pulgadas)

Ejercicio:

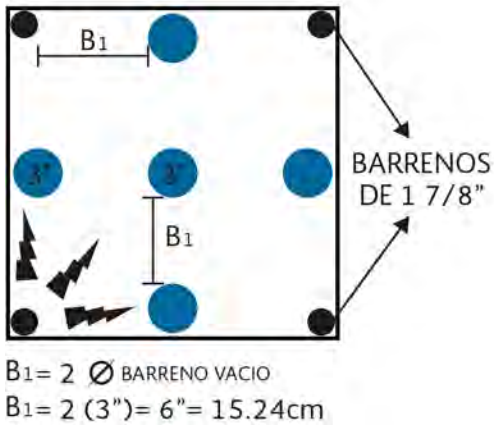
- Barrenos vacios: 3”
- Barrenos cargados: 1 7/8”=1.87
- Densidad del explosivo: 0.65 g/cc
- Densidad de la roca: 2.5 g/cc

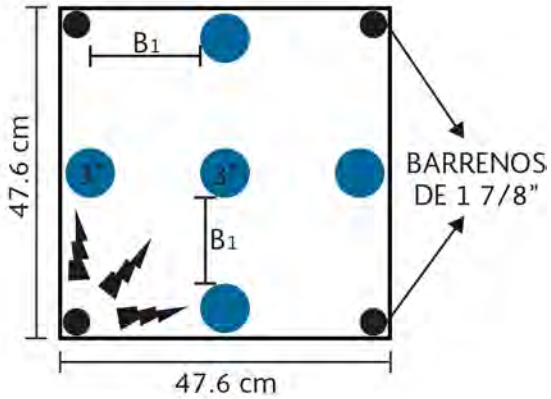
$$B = 1.87\left[\left(\frac{2 \cdot SGe}{SGr}\right) + 1.5\right]$$

$$B = 1.87\left[\left(\frac{2 \cdot 0.65}{2.5}\right) + 1.5\right]$$

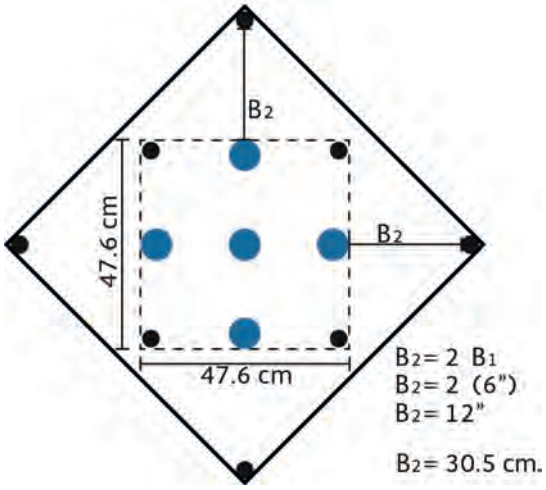
B= 3.77 Pies= 1.15 m

CÁLCULO DE LA CUÑA

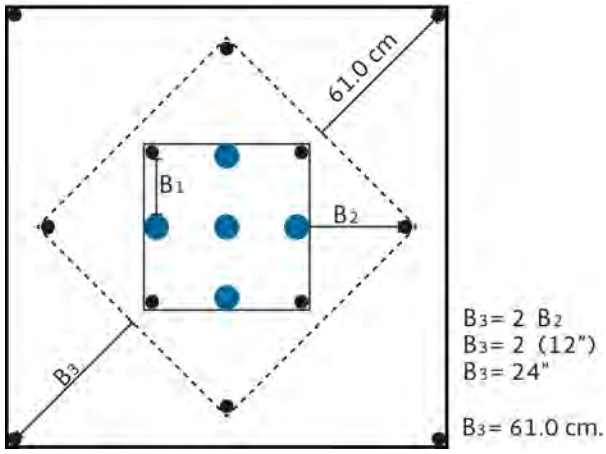




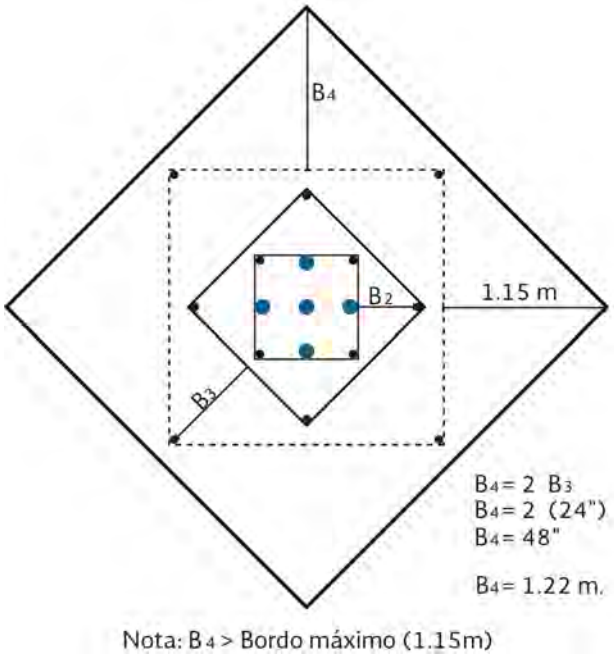
BARRENOS AYUDANTES



BARRENOS DE 1ER CUADRO



BARRENOS DE 2o. CUADRO



BARRENOS DE CONTORNO O POSTCORTE

E= 10 veces Ø BARRENO
(dependerá del tipo de roca)

DONDE:

E= Espaciamiento
Diámetro de barreno= 1 7/8"

E= 10(4.75)
E= 47.5 cm

7.4.6. Control de vibraciones

Los trabajos de voladura para la excavación de túneles, son operaciones muy complejas y delicadas, sobre todo cuando se tiene la presencia de edificaciones o estructuras próximas a los portales de los túneles o en superficie. Sin embargo, en la actualidad se cuenta con procedimientos y tecnologías en el uso y manejo de explosivos, que hacen posible la excavación de un túnel, sin perturbar o dañar las posibles estructuras en las zonas aledañas a la construcción del túnel.

También se cuenta con diversos dispositivos para monitorear si los diseños de las voladuras, producen vibraciones que estén dentro de los niveles de seguridad permisibles para no causar daños a las estructuras o edificaciones aledañas a los túneles.

7.4.6.1. Proceso para la obtención del permiso para el uso y manejo de explosivos

El uso y manejo de explosivos en las obras de ingeniería civil, es un proceso complicado y delicado; tan es así que el permiso correspondiente, se debe solicitar ante la Secretaria de la Defensa Nacional, acorde a la Ley General de Armas de Fuego y Control de Explosivos. Dentro de los requisitos para conseguir los permisos para el uso de explosivos, a continuación se describen los siguientes:

a. Solicitud modelo oficial
b. Certificado de seguridad del municipio
c. Referencia del lugar o lugares de consumo emitido por el presidente municipal
d. Anuencia del gobernador o visto bueno del mismo
e. Certificado de polvorines 1 y 2 (Inspección aprobatoria por parte de protección civil y SEDENA)
f. Plano escala 1: 4000 tanto del lugar de consumo como de polvorines
g. Tabla de consumo de material de explosivo (cantidades de consumo mensual y anual)
h. Nombre de las personas que van a estar a cargo del proyecto
i. Descripción de medidas de seguridad antes, durante y después de una voladura a cielo abierto o en el túnel

j. Tiempo aproximado de la ejecución de la obra

k. Nombre de la casa proveedora y numero de permiso general con el que se cuenta

l. Distancia que se encuentra de la casa proveedora de los explosivos con relación a polvorines y al lugar de obra

7.4.6.2. Funcionamiento de los explosivos

Un explosivo es un compuesto químico o mezcla de compuestos (unos combustibles y otros oxidantes), que iniciados debidamente, dan lugar a una reacción muy rápida y a una gran producción de calor (reacción explosiva). En la reacción se producen gases a temperaturas y presiones muy altas. Dependiendo del tipo de explosivo, su composición será diferente, y por tanto sus propiedades finales; ello conlleva a que para cada tipo de aplicación se deberá escoger el explosivo más idóneo.

Para un correcto dimensionamiento de las cargas, se debe tomar en cuenta que la carga detonante actúa en el medio circundante en dos fases, la primera fase del efecto de choque de la explosión, produce en el material un esfuerzo por la onda, con una presión de detonación inicial del orden de 105 a 106 kg/cm^2, lo que en un medio cerrado produce que dicha carga exceda la resistencia a la compresión del material. Debido a que la energía de la onda disminuye rápidamente en la distancia con respecto al lugar de colocación de la carga, ésta pierde rápidamente el efecto de compresión en el material, por lo que sólo el esfuerzo cortante y el esfuerzo de tensión tienen efecto; en una onda de choque las ondas de esfuerzo son reflejadas y regresan en forma de onda de tensión, si la energía (que depende del tamaño de la carga) es suficiente para sobrepasar la resistencia a la tensión del material, ocurrirá la desintegración del material.

En la segunda fase, la presión de los gases de los explosivos (del orden de 104 kg/cm^2) empuja al material hacia afuera del cráter ocasionado una segunda desintegración del material.

En conclusión, una gran presión ejercida por los gases a altas temperaturas después de la detonación, es lo que rompe el medio que contiene el explosivo. Esto se efectúa en dos pasos, el primero debido a la presión de la detonación ejercida en un principio por el iniciador y el segundo por la presión de explosión, siendo ésta última la más importante en el rompimiento de los materiales.

7.4.6.3. Monitoreo

El uso de explosivos en las cercanías de zonas urbanas u obras de infraestructura crea molestias a la población por el ruido de las detonaciones, el polvo que desprenden y las vibraciones del suelo principalmente. Por lo anterior y para prevenir molestias y problemas con los pobladores; durante la construcción del túnel se deben diseñar y revisar cuidadosamente las voladuras, con objeto de permitir mantener el confort del entorno de la obra y la seguridad de sus instalaciones e inmuebles.

Para garantizar estos satisfactores, el Departamento de Minas de los Estados Unidos de Norteamérica (USBM), así como las oficinas de investigación de países vanguardistas, sobre todo europeos, han emitido diferentes normas de seguridad que especifican los valores máximos permisibles, tanto de los niveles de vibración como en la sobrepresión de la onda de aire. Dichas normas se elaboraron a partir de un gran número de mediciones sísmicas y de la sobrepresión de la onda de aire de las voladuras realizadas en distintos tipos de roca y suelo, usándose también diferentes explosivos.

Las miles de voladuras instrumentadas y la recopilación del comportamiento de otras realizadas en diferentes partes del Mundo, hacen que estos criterios se apliquen con éxito en otros países como en el caso de México, donde la Norma USBM-RI8507 se adecuo muy bien durante la demolición de los edificios con explosivos en los años 1985 y 1986, realizadas en la Ciudad de México. Por tal motivo, este mismo criterio es un buen punto de partida para demostrar que las voladuras realizadas en la construcción de los túneles carreteros no ocasionen afectaciones ni daños a las viviendas ubicadas en las inmediaciones de la obra.

7.4.6.4. Criterios de seguridad

Existen diversos criterios de seguridad para salvaguardar la integridad de inmuebles, obras de infraestructura, monumentos, equipos delicados de precisión, etc. A continuación, se mencionan tres criterios actualmente vigentes y en uso a nivel mundial.

Estos criterios de seguridad son los que se aplican, con un alto grado de confiabilidad, para demostrar que las voladuras efectuadas durante la construcción de los túneles carreteros no afecten en lo más mínimo las estructuras cercanas. En las siguientes figuras se muestran gráficamente los límites establecidos por estas normas.

El emitido por el Departamento de Minas de la Unión Americana (USBM), en 1980, de acuerdo con el reporte de investigación RI-8507.

Figura 7.36. Criterios de seguridad para voladuras propuesto por la USBM, según reporte RI 8507.

El emitido, en 1983, en Alemania Occidental por el departamento de Exploración Geológica, conocido como DIN 4150.

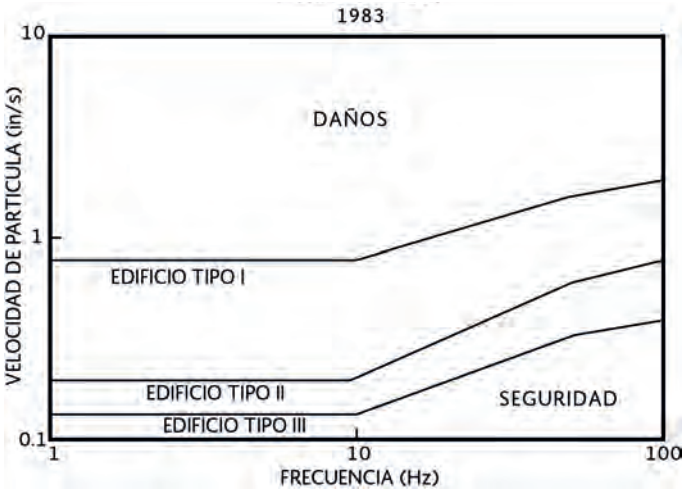


Figura 7.37. Norma DIN 4150.

La norma de Estandarización Europea para salvaguardar la integridad de monumentos antiguos o históricos propuesta por Konon y Schuring en 1985.

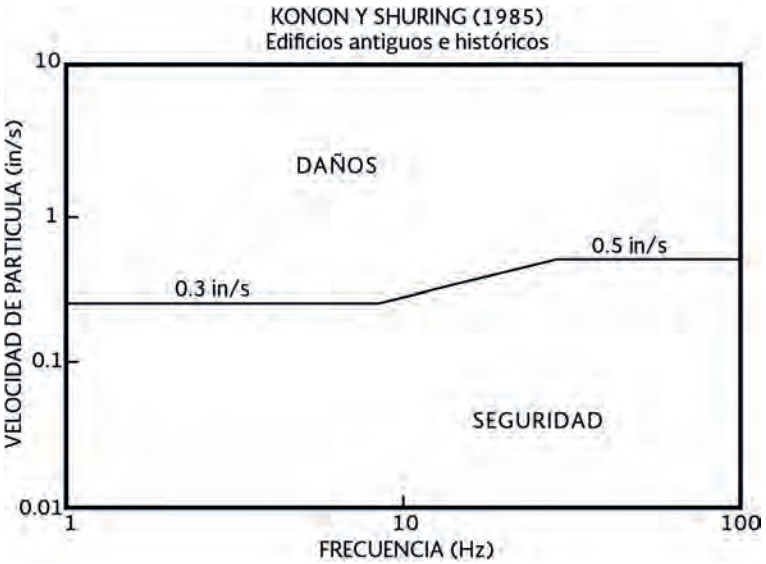


Figura 7.38. Edificios antiguos e históricos; Konon y Schuring.

7.5. Excavación mecánica

La introducción en años recientes a nuestro país de equipos de perforación modernos, equipados, más grandes y eficientes; de brocas, accesorios y acero de barrenación altamente mejorados y, de equipos de rezaga de gran capacidad, ha contribuido de forma importante a una aplicación más amplia, eficiente y segura de la técnica de excavación mecánica de un túnel, efectuada cuando no se requieren o se tiene la limitante de emplear explosivos.

A continuación se enuncian algunos de los equipos utilizados para excavar mecánicamente un túnel:

7.5.1. Martillos hidráulicos pesados

Se montan sobre retroexcavadoras convencionales, algunos incluyen utensilios especiales, como brazos telescópicos que facilitan el acceso a todo el frente de excavación. Adicionalmente se requiere la utilización de palas cargadoras para retirar el material excavado.

Figura 7.39. Martillos hidráulicos rompedores.

Los martillos hidráulicos realizan un ataque puntual, la energía se genera mediante motores eléctricos o diésel y se transmite a través de un circuito hidráulico a la punta situada en el extremo articulado de la máquina. La roca se quiebra mediante la energía de impacto generada y el material rocoso excavado se desprende en bloques.

Estos martillos suelen emplearse en macizos rocosos con una matriz dura, fuertemente plegados o fracturados. La excavación con martillo es posible en terrenos de buena calidad, sin embargo los rendimientos son muy bajos y los costos muy altos; no obstante, como ya se ha comentado, en circunstancias especiales se requiere su utilización en macizos rocosos de calidad media a alta.

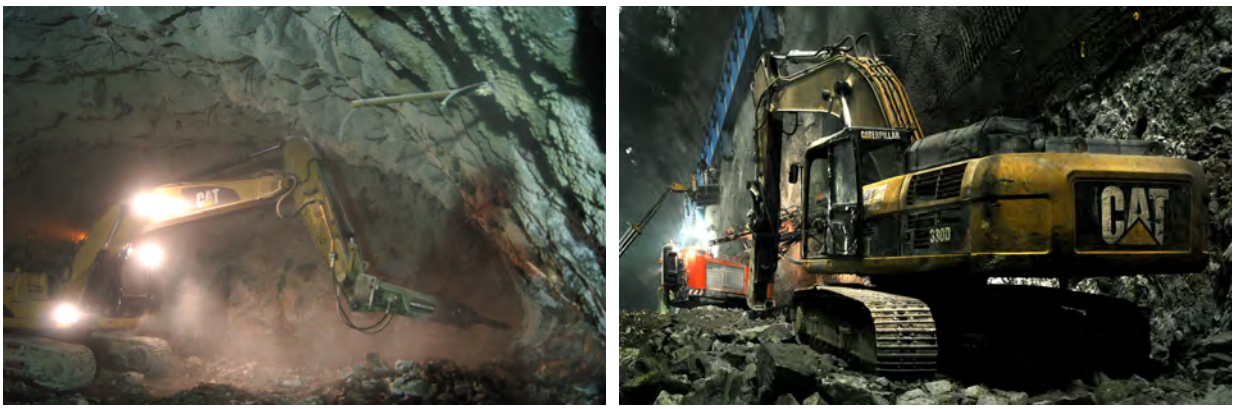


Figura 7.40. Martillo Hidráulico.

7.5.2. Pistola Neumática

Es un equipo de perforación ligero que trabaja con una presión de aire de 100 lb/in, maniobra en forma ascendente, descendente o de frente principalmente. Está constituida por una pistola común con un sistema de montaje sobre una pierna neumática.

Aunque en túneles carreteros su utilización es mínima, en ocasiones se emplea para llevar a cabo galerías de conexión, nichos para instalaciones especiales, nichos SOS, túneles piloto, etc.

Figura 7.41. Pistola neumática.

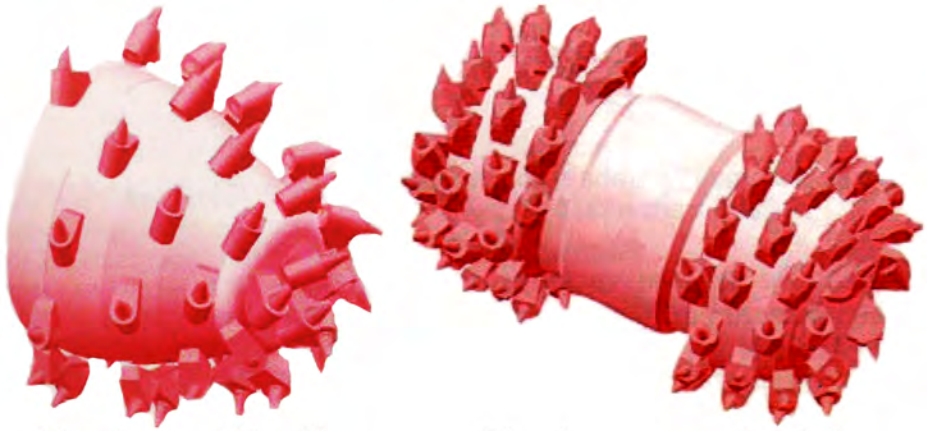
7.5.3. Rozadoras

Son máquinas que excavan mediante una cabeza giratoria, provista de herramientas de corte (dientes) que inciden sobre la roca, van montadas en un brazo monobloque o articulado y todo el conjunto sobre un chasis móvil de orugas.

Existen dos sistemas distintos de corte en las rozadoras actuales: el milling de cabezal radial y el ripping de cabezal frontal. En el milling la cabeza gira en torno a un eje longitudinal, paralelo al eje del túnel.

Las picas van dispuestas en forma helicoidal y golpean a la roca de forma lateral. En el ripping la cabeza gira en torno a un eje que es perpendicular al eje del túnel, tratándose en realidad de dos cabezas simétricas. Las picas golpean frontalmente a la roca.

Figura 7.42. Rozadora.



Cabeza de corte axial tipo milling Cabeza de corte transversal tipo ripping

Figura 7.43. Tipos de cabezas de corte para rozadora.

Ambos sistemas proporcionan resultados similares, por lo que no se puede considerar que uno sea mejor que el otro, si bien a igualdad de potencia de la cabeza de corte y para una roca de dureza determinada, el rendimiento de excavación de las rozadoras de cabezal frontal es un 30% superior al de las rozadoras con cabezal radial, sin embargo el empleo de una u otra estará en función de las condiciones geológico-geotécnicas del material.

Las picas son de dimensiones y formas distintas según el uso. Cada fabricante proporciona unos criterios y consideraciones de uso de sus picas, que debe comprobarse sobre el terreno a excavar hasta elegir el tipo más adecuado. Generalmente se usan picas delgadas y estrechas para suelos y rocas blandas y, picas gruesas de forma fusiforme para las rocas más duras.

Las rozadoras se clasifican por su peso, dado que la fuerza que ejerce la cabeza contra la roca es contrarrestada únicamente por el peso de la máquina. De este modo, a mayor peso mayor será la capacidad de la rozadora para excavar rocas más resistentes, y por tanto irá dotada de mayor potencia de corte.

La excavación mediante rozadoras ofrece diferentes ventajas entre las que destacan:

- Las secciones de excavación grandes pueden subdividirse y excavarse en fases sucesivas; también es posible ajustarse a una determinada secuencia de excavación.

- Permite un perfilado de la sección prácticamente sin sobreexcavación y se trabaja con un frente limpio y muy accesible.
- No genera mayores vibraciones.
- El empleo de rozadoras puede ser por lo general, en terrenos de resistencia media a blanda y en rocas fracturadas de calidad media a baja.

Figura 7.44. Rozadora tipo Ripping.

Figura 7.45. Rozadora utilizada en el túnel "Libramiento Puerto Vallarta" 1980.

7.5.4. Máquinas de precorte

El método de precorte mecánico con revestimiento previo a la excavación, preserraje mecánico de anillos o "premill", es una técnica muy moderna que consiste en realizar un corte al avance, a partir del frente de excavación en el extradós de la sección de excavación del túnel. Este método se emplea en suelos y rocas blandas.

Este procedimiento constructivo cae dentro de los métodos denominados de presostenimiento al avance. Se emplea en la ejecución de túneles en entornos urbanos o semiurbanos, que tengan limitaciones de deformaciones en la superficie por la existencia de estructuras, vías de comunicación y servicios situados por encima de la clave del túnel.

Con el método de precorte mecánico se produce un confinamiento del frente de excavación, previo a la realización de la misma, con ventajas importantes en cuanto a la estabilidad del frente.

Este corte se efectúa con una máquina específica con una sierra que consta de dientes de widia. La ranura que se genera con el corte tiene un espesor de entre 18 y 25 cm de espesor y una profundidad de alrededor de 3.5m. Esta se rellena con concreto lanzado de alta resistencia y fraguado rápido en todo el perímetro, obteniéndose una bóveda estabilizante.

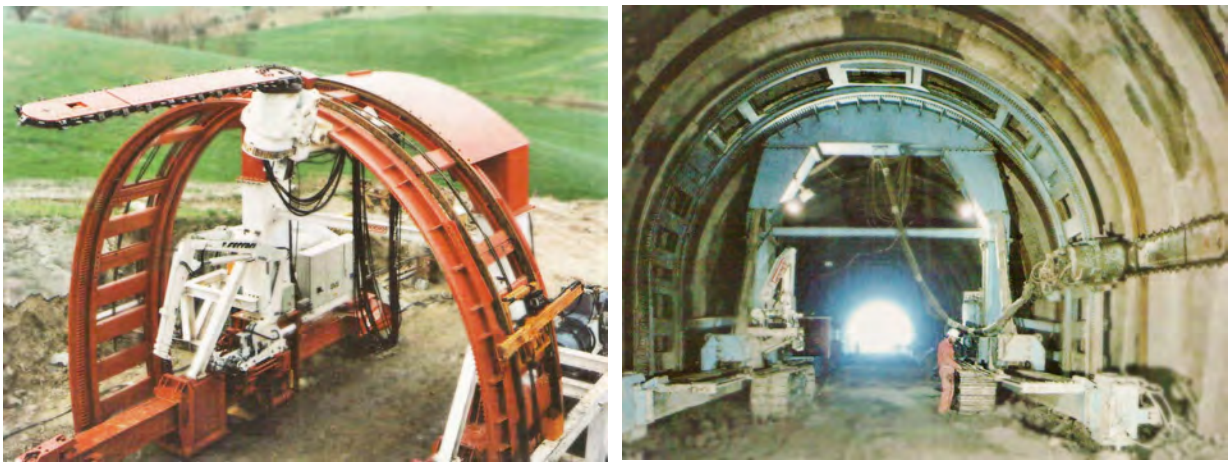


Figura 7.46. Máquinas de precorte mecánico. Tomada de Lunardi (2008).

Una vez ha fraguado el concreto de la bóveda, se asegura la estabilidad de la excavación, creando el sistema de sostenimiento. Posteriormente se efectúa la excavación del material que queda por debajo la bóveda. En caso de ser necesario se pueden realizar refuerzos con marcos metálicos o anclajes.

Se pueden conseguir avances de 3.0 a 3.5 m traslapando de 0.5 a 1.0 m entre prebóvedas de concreto. A la menor distancia posible del frente de excavación, sin que se interfiera con los trabajos en el frente de excavación, se colarán los muros laterales que empotran las bases de los anillos para finalmente, mediante una cimbra metálica convencional, se cuela el revestimiento.

Figura 7.47. Ejecución de precorte mecánico. Tomada de Lunardi (2008).

7.5.5. Máquina tuneladoras

Las máquinas topo, tuneladoras o TBM (Tunnel Boring Machine) son máquinas integrales de construcción de túneles, por cuanto son capaces por sí solas de excavar roca o suelos, retirar el escombro y aplicar el revestimiento del túnel. La máquina va avanzando dejando detrás de sí el túnel terminado con un rendimiento elevado con promedios alcanzables incluyendo los preparativos y curvas de aprendizaje de 400 m/mes, pero que también en terreno estable se pueden alcanzar en el mejor de los casos, rendimientos de más de 1,000 m/mes.

Anteriormente se mencionó que en México a la fecha no se ha construido ningún túnel carretero con tuneladora, sin embargo es tal la necesidad en nuestro país de contar con túneles cada vez más largos, que seguramente en los próximos años se construirá el primero, por lo que, a continuación se describen este tipo de equipos y se mencionan alguna recomendaciones generales para su implementación.

El criterio de selección de tuneleras en general está directamente relacionado como se indica en la Tabla 7.1, en el tipo de terreno por excavar y si su frente es estable.

CRITERIO GEOTECNICO PARA LA SELECCION DE TBM															
TIPO DE MAQUINA A EMPLEAR		RESISTENCIA DE ROCA					ESTRUCTURA DE ROCA							INGRESO DE AGUA	
		RESIS. COMP. (Mpa)	COHESION CU KN/m²	SOPORTE FRENTE	ESCUDO	INST. RECUBR.	JUNTAS		TAMAÑO GRANO		SOPORTE DEL FRENTE	ESCUDO	INST. RECUBR	VOL POR 30 m³	CONSECUENCIAS EN
							RQD	DISTANCIA	<0.02mm	<0.06mm					
TBM's ESCUDOS PARA SUELOS EPB SLURRY / TBM ESCUDO SENCILLO / TBM CON ESCUDOS / TBM PARA ROCA	ROCA	>250												ILIMITADO	CAP DE BOMBEO
		250 - 100				ATRAS DE TBM	100 - 90%	> 2 M					ATRAS DE TBM	ILIMITADO	CAP DE BOMBEO
		100 - 50				ATRAS DE TBM	90 - 75%	2.0 - 0.6 M				POSIBLE	ATRAS DE TBM	> 20L/S	CAP DE BOMBEO
		50 - 25			RECOMENDADO	ATRAS DE TBM	75 - 50%	0.6 - 0.2 M			POSSIBLE MECANICO	RECOMENDADO	EN AREA TBM	> 10 L/S	SOPORTE DE FRENTE
		25 - 5			REQUERIDO		50 - 25%	0.2 - 0.06 M			MECANICO	REQUERIDO	CON ESCUDO	> 5 L/S	SOPORTE DE FRENTE
		5 - 1		RECOM.	REQUERIDO	CON ESCUDO	<25%	< 0.06 M			MECANICO POSIBLE EPB / SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO	> 2L/S	METODOLOGIA
		<1	>30		REQUERIDO	CON ESCUDO	<25%	< 0.6 M	VARIABLE		MECANICO POSIBLE EPB / SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO	> 2L/S	METODOLOGIA
	SOIL		30 -10	RECOM.	REQUERIDO	CON ESCUDO	<25%		>30%		MECANICO POSIBLE EPB / SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO	> 2L/S	METODOLOGIA
			10 - 5	RECOM.	REQUERIDO	CON ESCUDO / INYECCION DE MORTERO INMEDIATA			>20%	<50%	EPB / SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO / INYECCION DE MORTERO INMEDIATA	> 2L/S	METODOLOGIA
			5 - 1	REQUE.	REQUERIDO	CON ESCUDO / INYECCION DE MORTERO INMEDIATA			>10%	<30%	EPB / SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO / INYECCION DE MORTERO INMEDIATA	> 2L/S	METODOLOGIA
			0	REQUE.	REQUERIDO	CON ESCUDO / INYECCION DE MORTERO INMEDIATA			>10%	<20%	EPB / SLURRY	REQUERIDO	CON ESCUDO / INYECCION DE MORTERO INMEDIATA	> 2L/S	METODOLOGIA

Tabla 7.1. Criterio geotécnico para selección de una TBM, con base a la experiencia en tuneleo mecanizado. Lars Babendererde. 3er Curso Internacional de Túneles, Guadalajara, México.

Tipos de tuneleras:

- Tuneleras para roca:
  - Tunelera abierta de viga principal con zapatas laterales
  - Escudo sencillo
  - Escudo doble
  - Escudos con rozadoras
- Tuneleras para suelos:
  - EPB's
  - Slurry TBM
- Tuneleras tipo dual
  - Crossover TBM's

A continuación se describen brevemente algunos de éstos equipos.

7.5.5.1. Tuneleras para roca

- ***TBM Tunelera abierta de viga principal con zapatas laterales para roca dura***

La tuneladora de roca dura es una máquina abierta (no protegida totalmente) cuyo avance progresa al excavar la roca del frente por medio de sus herramientas de corte mecánico, con las que se aplican los esfuerzos combinados del par de giro de su cabeza y del empuje longitudinal conseguido por reacción contra la roca de unas zapatas extensibles (los "grippers"), con las que se fija la parte estática de la máquina. A estas máquinas se aplica también la denominación específica de "topos", y "mole" en inglés.

La alta abrasividad de algunas rocas así como los contenidos elevados de sílice pueden producir elevados desgastes en los cortadores, lo que conlleva un aumento en el costo.

Figura 7.48. Tuneladora abierta de gran diámetro. Cortesía de Robbins.

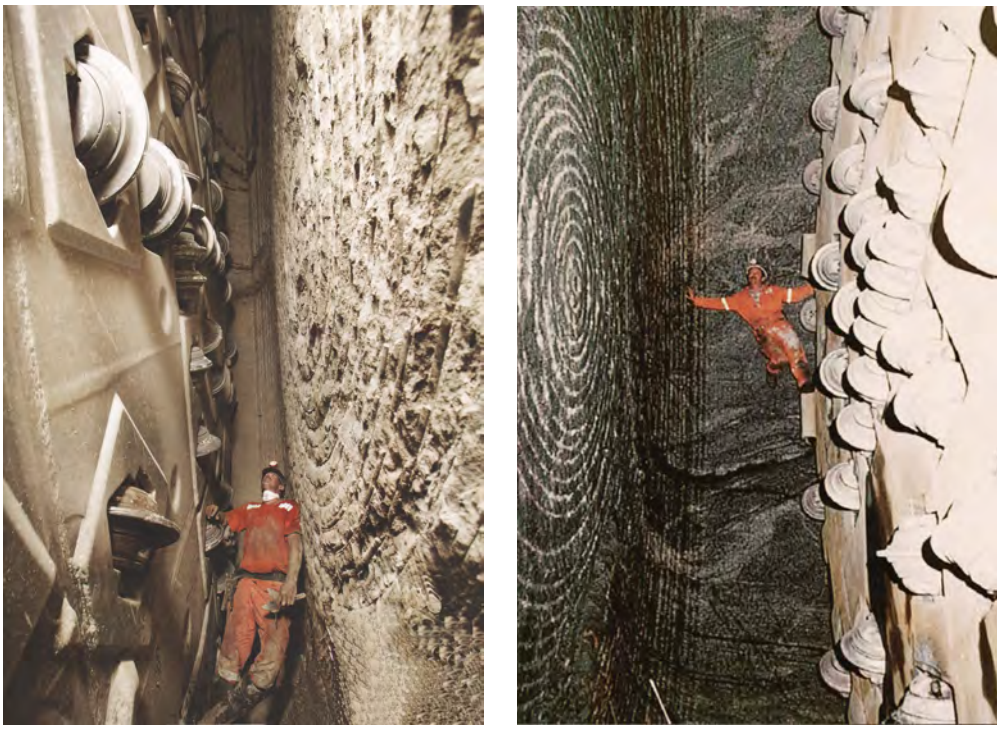
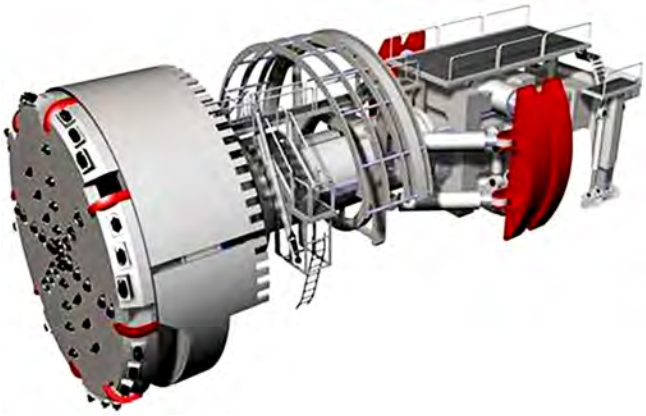


Figura 7.49. Cabeza de corte. Cortesía de Robbins.

También pueden existir sistemas adicionales de colocación de anclas, marcos metálicos y lanzado de concreto. Los topos también pueden tener sistemas para colocación de railes sobre los que circulan las vagonetas y una plataforma donde va alojado todo el sistema de control, guiado y suministro de energía. En definitiva, el topo consta de todos los elementos necesarios para completar el túnel, montados uno tras otro y actuando de forma sucesiva.

Figura 7.50. Maquina Tuneladora y cabeza de corte. Cortesía de Robbins.



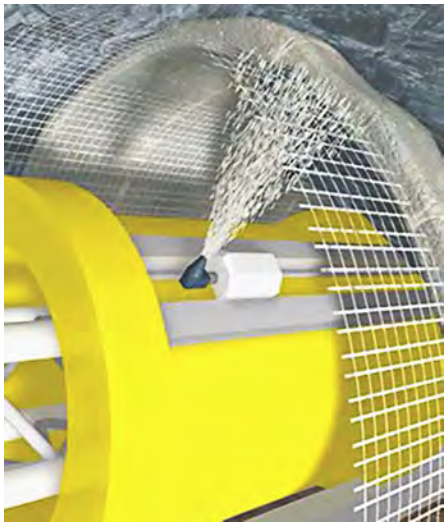


Figura 7.51. Máquina TBM para roca dura con sistema de lanzado de concreto. Cortesía de Robbins.

- ***TBM Escudo sencillo***

Consta de una cabeza de corte giratoria de forma circular donde van alojados los discos cortadores. Detrás de la cabeza se encuentra un sistema formado por gatos que presionando sobre el terreno y sobre la cabeza ejercen en ésta la presión necesaria para realizar con éxito la excavación de la roca. El escombro se carga automáticamente en el frente y se conduce hacia atrás mediante una cinta transportadora, que lo deposita en unas vagonetas para su traslado al exterior, o sistema de bandas continuo.

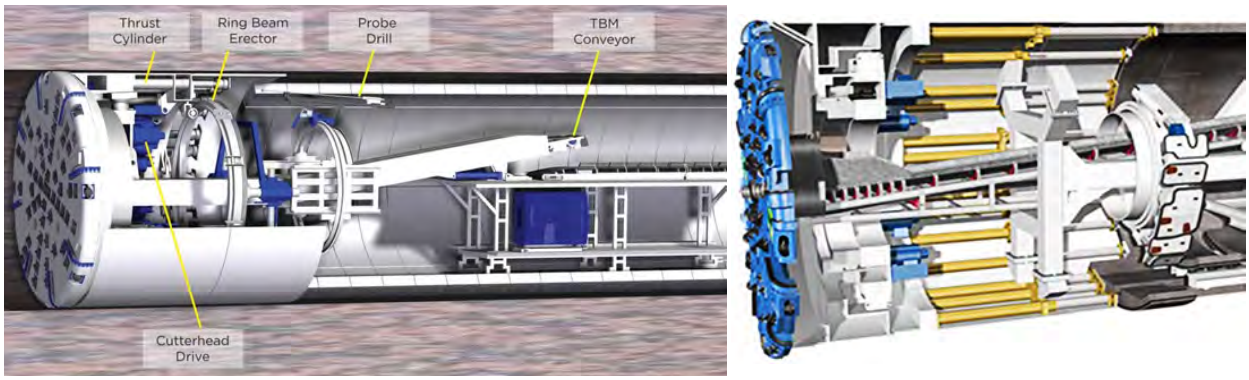


Figura 7.52. Máquina TBM de escudo sencillo. Cortesía de Robbins.

- ***TBM Escudo doble***

Esta máquina es similar a la anterior de escudo sencillo con la ventaja de tener doble escudo que le permite realizar dos operaciones simultaneas, la de excavar avanzando la cabeza cortadora al mismo tiempo que en el escudo trasero se instalan las dovelas correspondientes del recubrimiento primario.

Otra ventaja importante es que al estar en terreno muy fracturado o débil, la maquina se puede impulsar del mismo recubrimiento primario de dovelas.

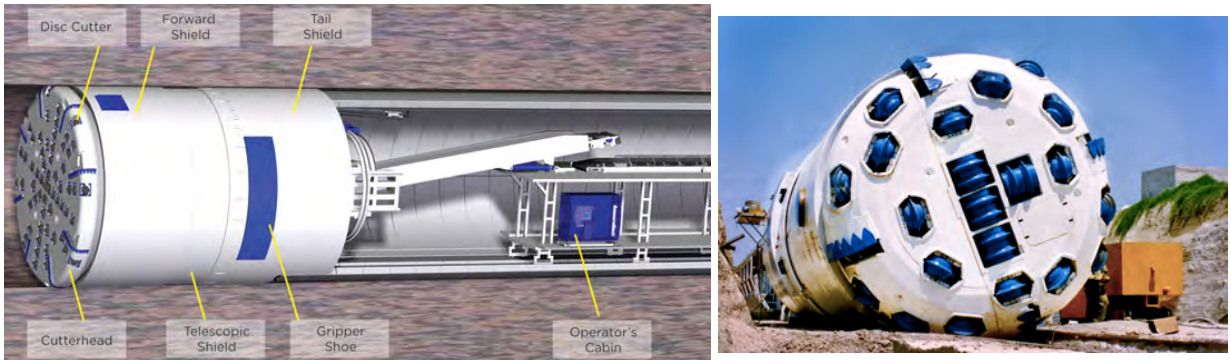


Figura 7.53. Máquina Tuneladora Doble Escudo, 3.4 metros diámetro. Cortesía de Robbins.

- ***Tuneleras para suelos EPB's***

En la figura siguiente se muestra una tabla que relaciona la granulometría de los suelos, con una posible aplicación de las diferentes maquinas tuneleras para suelos.

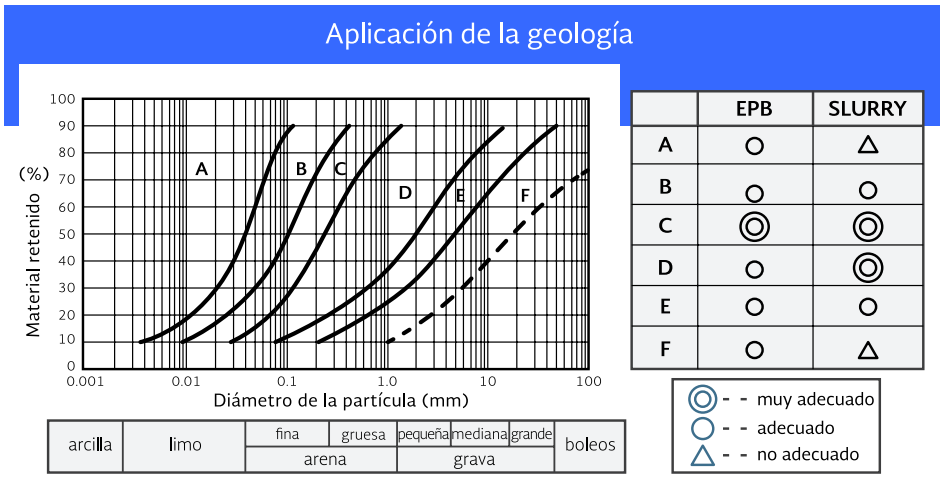


Figura 7.54. Diferentes tipos de suelo para diferentes tipos de máquinas para suelos. (Robbins).

- ***EPB's para suelo blando***

El escudo, cuyo avance progresa de forma similar a las tuneladoras de roca dura, es una máquina que incorpora un sistema integral de protección, y en la que el empuje longitudinal se logra por reacción contra un revestimiento, al no ser la roca suficientemente competente para poder aplicar "grippers" contra ella. Los escudos tienen tres elementos distintivos:

- La EPB se aloja dentro de una estructura de acero laminar (la coraza o "escudo"), cuya misión es el sostenimiento del terreno en la zona ya excavada y todavía ocupada por la máquina.
- La tuneladora dispone de un sistema de colocación de anillos de revestimiento, de concreto o marcos metálicos, que permite completar el ciclo de avance, al sustituir a la coraza metálica como sostenimiento.
- El diseño básico ofrece versiones para trabajar en frentes altamente inestables, manteniendo las condiciones de seguridad.

Figura 7.55. TBM Tipo escudo utilizada en TEO (Túnel emisor Oriente). Cortesía de Robbins.

Los tipos de TBM para suelos blandos son:

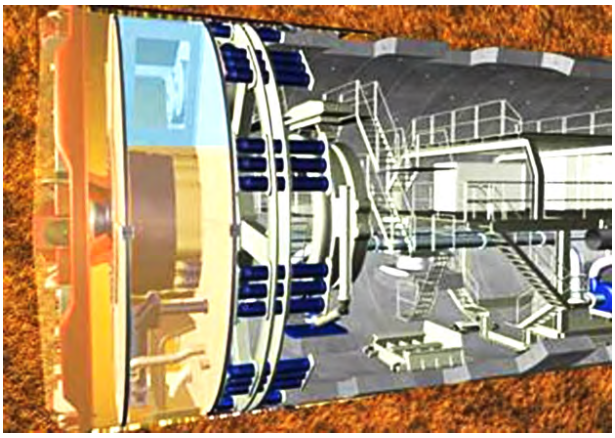


Figura 7.56. TBM Hidroescudo

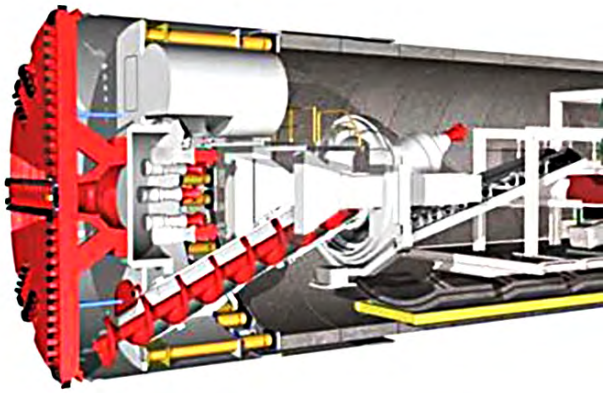


Figura 7.57. TBM de Escudo EPB (Earth Pressure Balance = escudo de presión de tierras).

Las principales limitaciones de este método de excavación están ligadas a la geometría

- La sección debe ser circular y la longitud tal que permita asumir una inversión elevada y unos gastos igualmente importantes de transporte y montaje en obra.
- El radio de curvatura mínimo esta alrededor de los 300 m, aunque son deseable al menos 500 m
- La pendiente máxima debe ser tal que permita una circulación fluida de carros para retiro del material producto de la excavación está en un entorno máximo del 3.5 al 4%. Está pendiente se puede superar en el caso de extracción de material con cintas, aun en este caso es necesario disponer de vías para poder introducir al frente de excavación materiales, repuestos, etc.

Otras limitaciones se refieren a la geología y a la geotecnia de los materiales a atravesar. Así en terrenos excesivamente blandos o con problemas de sostenimiento podría hacer inviable la utilización de este método.

Las fallas son un inconveniente cuando se utilizan topos; debido a que los sostenimientos no pueden actuar hasta la colocación de dovelas, por lo que el avance suele ser lento, los tiempos que transcurren son demasiado largos favoreciendo el desprendimiento del terreno.

7.6. Extracción de material producto de la excavación

7.6.1. Generalidades

Un sistema eficiente de transporte y extracción del material producto de la excavación reduce el tiempo de los ciclos de construcción y por consiguiente el costo del túnel. Una excavación subterránea normalmente dispone de poco espacio y además el acceso al frente de excavación es muy restringido. Es fundamentalmente retirar la rezaga rápidamente para que pueda iniciarse la implementación del sostenimiento.

El sistema y el equipo a emplear dependen de la cantidad de material a transportar por ciclo de excavación y de la longitud del transporte. En túneles carreteros en México las secciones de excavación van de los 80 a los 230 m² aproximadamente, por lo que el volumen de rezaga es importante. El equipo de retiro de material es principalmente con maquinaria sobre neumáticos y camiones; sin descartar la utilización de vagones, rieles y bandas de transportación, lo cual depende de la longitud del túnel.

Los equipos de rezaga que existen en el mercado son muy variados, sin embargo los más empleados son los que van montados sobre vía o sobre neumáticos.

El transporte que corre sobre rieles tiene la ventaja de dar un rendimiento superior en relación con la sección del túnel, ya que los vagones guiados sobre rieles, pueden ocupar una mayor parte de la sección. Se pueden organizar además grandes trenes para evacuar de un solo viaje, la rezaga de la voladura y a velocidades apreciables.

Por otro lado, el transporte sobre neumáticos se adapta mejor a las pendientes, es más flexible y se utiliza, sobre todo en túneles de gran sección, como los túneles carreteros. Para realizar un transporte rentable y eficaz es indispensable construir caminos hacia el frente de excavación y mantenerlos libres de obstáculos para que los vehículos operen con las velocidades habituales e impedir el deterioro de los neumáticos.

El constructor deberá evaluar el sistema de retiro del material producto de la excavación que más convenga para cada proyecto en particular, tomando en cuenta tamaño de la sección del túnel, longitud, tipo de material, método de excavación, pendientes, bancos de tiro, etc.

7.6.2. Equipos para carga y retiro de material

7.6.2.1. Pala excavadora

Es una máquina autopropulsada, sobre neumáticos u orugas, con una estructura capaz de girar al menos 360º (en un sentido y en otro, y de forma ininterrumpida) que excava terrenos, o carga, eleva, gira y descarga materiales por la acción de la cuchara, fijada a un conjunto formada por pluma y brazo o balancín, sin que la estructura portante o chasis se desplace.

Existen dos tipos de excavadoras diferenciadas por el diseño del conjunto cuchara-brazo-pluma y que condiciona la forma en que trabaja:

a) Excavadora frontal o pala de empuje: se caracteriza por tener la cuchara hacia arriba. Tiene mayor altura de descarga; es útil en trabajos de carga de materiales a los camiones.

Figura 7.58. Excavadora frontal.

b) Retroexcavadora: tiene la cuchara hacia abajo. Permite llegar a elevaciones cotas más bajas. Se utiliza sobre todo en construcción del banqueo, de zanjas para drenaje y otras actividades que por cuestión de espacio, el tamaño la pala excavadora no sea funcional. También se pude utilizar para realizar retiro de material a través de su cargador articulado.

Figura 7.59. Retro excavadora.

7.6.2.2. Cargador frontal

Es un equipo tractor, montado sobre ruedas, que tiene un cucharón de gran tamaño en su extremo frontal, se utiliza para realizar trabajos de rezaga. Son equipos de carga y eventualmente de acarreo; su buena movilidad le permite moverse fuera del túnel circulando siempre con seguridad.

Los cucharones varían en tamaño desde 0.20 hasta 19.0 metros cúbicos de capacidad, el tamaño del cucharón está directamente relacionado con el tamaño de la máquina en general, descarga en forma lateral y frontal principalmente. Para agilizar las labores de rezaga se apoyan en camiones de volteo de 14 m³ o camiones articulados de mayor capacidad.

Figura 7.60. Cargador frontal.

Figura 7.61. Camión articulado (Dumper).

7.6.2.3. Cargador LHD

La característica fundamental del cargador LHD (Load-Haul-Dump: Carga–transporte-vertido) es su diseño compacto, tanto en altura como en ancho; cuenta con una estructura articulada, que le permite un radio de giro mínimo y por lo tanto mejor maniobrabilidad en zonas estrechas.

Las principales características de estos equipos son:

- Capacidades de cuchara a partir de 0.3 m³ y carga útil a partir de 0.6 ton.
- Están montados sobre neumáticos e impulsados por cuatro ruedas motrices.
- Su estrechez y bajo perfil hacen que se adapten a gálibos de túneles muy pequeños.
- Poseen una articulación central que les da una gran maniobrabilidad en curvas.

La principal desventaja de los cargadores LHD está en su capacidad de carga, por lo que en túneles de sección grande pueden llegar a no ser tan productivos.

Figura 7.62. Cargador LHD.

7.6.2.4. Cintas Transportadoras

En túneles largos con métodos de excavación convencional y sobre todo con máquinas tuneladoras (TBM), el riesgo de incidencias por el transporte es alto, por lo que el empleo de cintas puede ser una alternativa viable para lograr mayor producción.

Las principales ventajas son:

- Operación continúa
- Altas capacidades de transporte
- Capacidad de transportar el material excavado con diferentes ritmos de avance
- Adaptables a cualquier tamaño de túnel
- Necesidad de un espacio reducido para su instalación
- Adecuadas para fuertes pendientes
- Adaptable al transporte de materiales a granel en el túnel
- Bajos costos de mantenimiento y operación
- Accionamiento eléctrico
- Facilidad de automatización

Por otro lado también presenta diversos inconvenientes:

- Fuertes inversiones iniciales
- Limitación en el tamaño máximo de roca a transportar
- Necesidad de un sistema de soporte estructural
- Requiere de un sistema complejo de almacenamiento en el frente de excavación
- Necesidad de diseños especiales en tramos curvos

Las cintas o bandas transportadoras en algunos casos constituyen un elemento más del sistema como sucede en las máquinas tuneladoras.

Figura 7.63. Cinta transportadora.

7.6.2.5. Retiro de material con ferrocarril

En túneles de pequeña y mediana sección y cuando la distancia de transporte supera los 1,000 m se pueden considerar equipos de transporte sobre vía para el retiro de material producto de la excavación, considerando que en pendientes superiores al 2.0% empiezan a ser poco rentables.

Las ventajas del transporte por ferrocarril son la alta capacidad de transporte, seguridad y bajo costo de operación y mantenimiento. La principal desventaja es la elevada inversión y los costos de instalación.

Referencias

1 Lunardi, P. Desing and Construction of Tunnels. Analysis of Controlled Deformation in Rock and Soils (ADECO-RS), Springer 2008.

2 López J. C. Manual de Túneles y Obras Subterráneas, Tomos I y II, Ingeniería de Túneles, 2011.

3 Cornejo L. Excavación Mecánica de Túneles, Rueda 1988.