

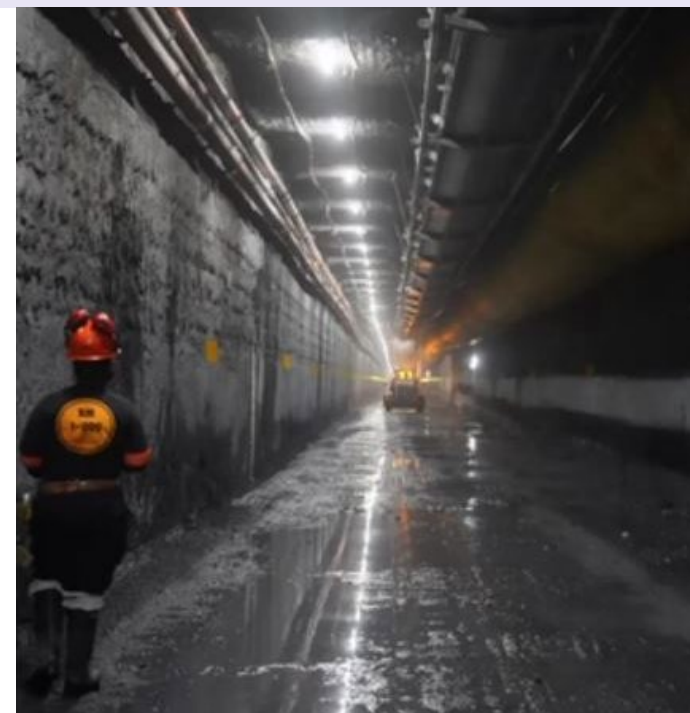
ARTÍCULO TÉCNICO

Tuneleo no circular en roca: Un nuevo camino a seguir

Artículo presentado en el 6o Simposio Internacional de Túneles y Lustreras en Suelos y Rocas.

Dennis OFIARA
Robbins, Solon, Ohio, E.U.A.

Mike LEWIS
Robbins, Solon, Ohio, E.U.A.

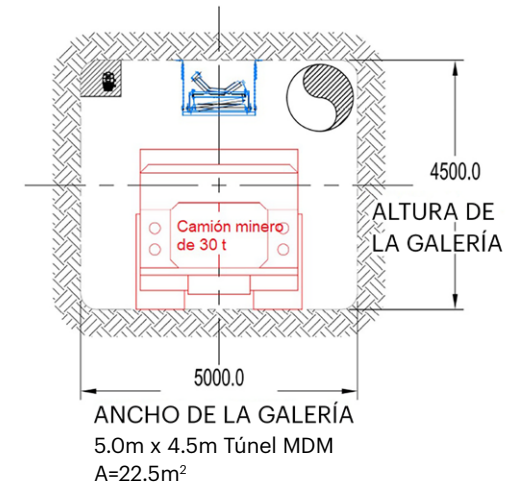


1. Introducción

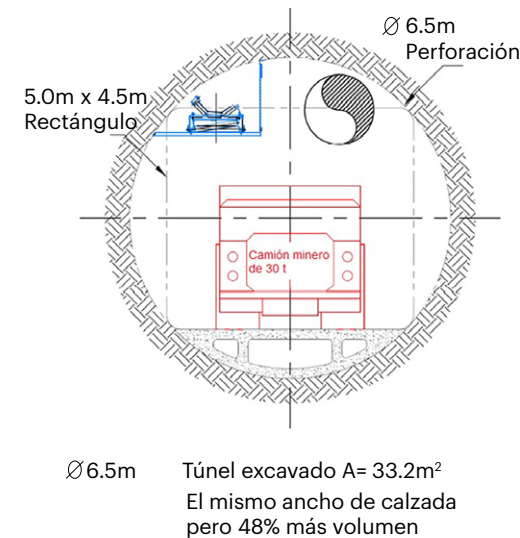
La "Mine Development Machine" o MDM 5000 (Máquina de Desarrollo Minero) fue diseñada para excavar túneles mineros en roca para la mina de plata "Fresnillo" en Fresnillo, México. Fresnillo es una de las minas más antiguas del mundo que todavía se encuentra en funcionamiento y que ha mantenido su operación por casi cinco siglos. Esta mina tiene un largo historial en lo referente a la adopción de nuevas tecnologías. En 1838, una máquina de vapor original de la marca Watts fue traída desde Inglaterra a México, arrastrada sobre el terreno por yuntas de bueyes e instalada en la mina para expulsar el agua de las filtraciones. La máquina aún se exhibe en la mina, ostentando con orgullo su legado.

Más recientemente, Fresnillo ha mostrado entusiasmo por adoptar la excavación mecánica para galerías de desarrollo minero. Fresnillo evaluó la posibilidad de construir un megatúnel circular de 25 km de longitud excavado por

una tuneladora TBM para conectar cuatro yacimientos de minerales en la región de Fresnillo. El megatúnel debía ser perforado con una tuneladora TBM de 5 m de diámetro, para roca dura, con un sistema de banda transportadora continua para el acarreo de la rezaga (escombro). Se consideró colocar una losa prefabricada de concreto para crear una base de camino dentro de la perforación circular del túnel. Fresnillo pospuso el concepto de megatúnel por motivos económicos, pero siguió interesado en encontrar una herramienta de excavación mecánica para acelerar la excavación de caminos para el desarrollo minero. Estos túneles necesitan de un piso plano para permitir el uso de la flota de camiones mineros y otros equipos para mina, con llantas de hule. Robbins y su agente, Topo Machinery, trabajaron con Fresnillo para desarrollar una propuesta de Máquina de Desarrollo Minero, adecuada. Igualmente, importante para el diseño de la máquina fue el despliegue y la operación día a día de la máquina, para lo cual Topo y Robbins formaron una asociación.



▲ Figura 1. Sección Transversal del Túnel Rectangular.



▲ Figura 2. Sección Transversal del Túnel Circular.



▲ Figura 3. Máquina minera "Reef Mole".

2. Excavación mecánica en roca, circular y no circular

Las tuneladoras TBM circulares para roca, a sección completa (con frente de excavación completo), son herramientas bien desarrolladas, pero no se utilizan frecuentemente en la minería, a pesar de los muchos kilómetros de túneles mineros que se excavan cada año. Esto se debe a varias razones: la difícil movilización y desmovilización en minas profundas, la incapacidad de negociar curvas pronunciadas y pendientes empinadas que forman parte de los planes mineros, y el hecho de que las minas por lo general desean un túnel con piso plano, no un perfil circular. La industria de las tuneladoras (TBM) ha hecho grandes esfuerzos para superar estos obstáculos. Una TBM circular a sección completa sigue siendo la máquina más eficiente para la excavación mecánica de túneles en roca. Sin embargo, si un piso plano es imperativo, éste debe crearse mediante métodos secundarios si se utiliza una TBM circular para excavar el túnel.

Se pueden considerar varios métodos secundarios para crear accesos de piso plano. Entre estos, se incluye continuar con el corte de los flancos inferiores mediante barrenación y voladura, o mediante fragmentación de la roca. Se puede colocar un piso prefabricado, o se puede verter concreto *in situ* para crear el piso. Como alternativa, se puede utilizar roca triturada para rellenar el piso circular y crear el acceso. Este espacio en el piso en ocasiones puede utilizarse para las tuberías de drenaje o los canales de desagüe bajo la losa para crear el acceso. Este arreglo puede ayudar a contrarrestar el inconveniente de tener que construir el fondo plano. Sin embargo, la sección transversal resultante no es por lo general la más eficiente para el uso previsto.

Muchos tipos de máquinas de excavación en roca han sido propuestas para cortar una sección transversal no circular con fondo plano. En particular, las rozadoras han aumentado su capacidad en años recientes. Las "Mobile Miners" (Mineras móviles) de Robbins se utilizaron por primera vez en las décadas de 1980 y de 1990, y más recientemente se han puesto a prueba y se encuentran en fase de mayor desarrollo. También se han probado otras máquinas que utilizan la excavación parcial del frente con tecnología de corte mediante discos. Desafortunadamente, la mayoría de estas máquinas han sido abandonadas por las minas debido a la baja productividad o al elevado desgaste de los discos cortadores.

Si la intención principal es desarrollar un túnel de acceso, y no se necesita de un área transversal adicional para el flujo de ventilación u otros fines, entonces la sección transversal más eficiente es la rectangular. En las figuras a continuación se muestra una sección transversal rectangular comparada con un túnel circular que tiene el mismo ancho de piso (ver Figuras 1 y 2). El túnel circular tiene un 30% más de área excavada por metro lineal. Esto significa más rezaga que debe ser extraída y desechada. La industria minera sigue buscando una forma eficiente de excavar mecánicamente un perfil más o menos rectangular. Si bien, la industria de la construcción de túneles civiles ha aceptado mucho más los túneles circulares, una máquina rectangular eficaz también podría ser útil para muchas aplicaciones civiles.

3. Evolución del concepto de corte MDM

Además de los túneles de acceso, una sección transversal excavada mecánicamente es muy útil para explotar yacimientos de minerales que se encuentran en vetas con cubiertas y fondos paralelos. Este tipo de depósitos se denominan "filones" y son típicos en las minas de platino y otros minerales. La explotación de los filones en las minas de platino profundas es un trabajo muy difícil y peligroso. Se han hecho muchos esfuerzos para mecanizar la extracción en los filones como una alternativa al método de barrenación y voladura.

Un ejemplo de estos esfuerzos fue la máquina minera "Reef Mole" ("Topo de Filón"). Esta máquina fue concebida y desarrollada por John Gibson y Andy Anderson, quienes se desempeñaron como ingenieros para la empresa Robbins por muchos años y formaron una nueva empresa tras su jubilación. La máquina fue construida en Sudáfrica, donde se

puso en funcionamiento en una mina de platino. Esta máquina cortó un rectángulo de 1 x 5 m para excavar el mineral. Esta máquina minera se muestra en la Figura 3 a continuación.

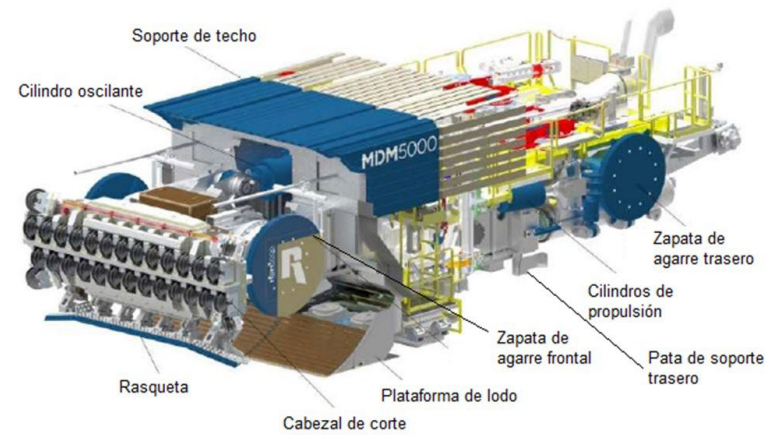
La acción de corte fue realizada mediante un cabezal de corte oscilante, en lugar de un cabezal de corte giratorio, como es el caso de las tuneladoras TBM circulares. El cabezal oscilaba horizontalmente gracias a cilindros hidráulicos, para crear el corte rectangular. Unas robustas zapatas de agarre fijaron la máquina dentro del filón excavado para resistir a las notables fuerzas de corte. La geometría de la máquina se dispuso de tal modo que los cortadores barrieran el frente semicircular con una penetración casi constante para proporcionar la acción de corte más efectiva. Se utilizó un sistema de aspiración para remover el material excavado.

La máquina "Reef Mole" cortó eficazmente la roca muy dura del filón de platino. Sin embargo, la máquina fue considerada como "experimental" por la minera. Por consiguiente, no tuvo acceso prioritario a recursos como energía, agua, ventilación, transporte, personal, etc. -todos ellos bienes preciados en una mina de explotación profunda. Aunque prometedora, la "Reef Mole" nunca fue utilizada plenamente por la mina.

3.1. El diseño MDM

A medida que se discutió más ampliamente la necesidad de túneles de desarrollo excavados mecánicamente en Fresnillo, surgió un concepto de máquina que utilizaba un cabezal de corte oscilante, similar a la "Reef Mole". El objetivo fue producir una sección transversal rectangular de 5 m de ancho y 4.5 de alto. En este caso, el cabezal de corte oscilaba verticalmente en torno a un eje horizontal. Un cilindro robusto de agarre frontal estaba situado en este eje de rotación, lo que proporcionaba buena estabilización y una reacción directa de las fuerzas de corte. La zapata de agarre frontal se anclaba en las paredes laterales verticales del corte. La máquina fue designada como "MDM5000", las siglas hacen alusión a su nombre en inglés, "Mine Development Machine" (Máquina de Desarrollo Minero). En la Figura 4 se muestra un dibujo de la máquina, y en la Figura 5 un primer plano de la acción de corte en el frente de roca.

El hecho de que el cabezal de corte oscilara en torno al eje horizontal permitió que el cabezal empujara el material cortado hacia atrás, hasta una plataforma que recolecta el material, muy parecida al delantal de rezaga en una rozadora. El delantal cubrió los 5 m de ancho. Unas "ruedas gemelas recolectoras", situadas a cada lado del delantal empujaban el material hacia la tolva situada en su centro. Un transportador de cadena trasladaba la rezaga de esta tolva y lo llevaba a la parte trasera de la MDM. Las bandas transportadoras suelen ser las preferidas para los equipos de tipo TBM,



▲ Figura 4. La "Mine Development Machine" (Máquina de Desarrollo Minero o MDM) 5000.



▲ Figura 5. Primer plano del corte del frente de roca en el túnel MDM.



▲ Figura 6. Vista frontal de la MDM mostrando el delantal de recolección.

sin embargo, el transportador está situado en la parte baja de la MDM, cerca del piso del túnel. Se pensó que una banda transportadora estaría constantemente pasando por debajo de la inevitable acumulación de rezaga y que sufriría demasiado desgaste. Además, la MDM estaba pensada para ser utilizada en pendientes más pronunciadas. En pendientes de este tipo, el ángulo de inclinación neto del transportador en la MDM sería demasiado pronunciado para permitir un transporte eficaz mediante una banda transportadora (ver Figura 6).

La MDM es significativamente pesada en la parte frontal debido a la configuración de la máquina y al cabezal de corte en voladizo. Esto provocó que la MDM se inclinara hacia adelante sobre la zapata frontal en el delantal de rezaga. Se requirió de una estructura trasera con una longitud considerable para contrarrestar los pesos en voladizo y las fuerzas de corte. La parte trasera de la MDM cuenta con una estructura de "Viga Principal" que replica la viga principal de una tuneladora TBM típica para roca dura. También cuenta con una zapata de agarre trasero y cilindros de empuje para hacer avanzar la máquina mediante el deslizamiento sobre el punto de apoyo frontal. La zapata de agarre trasero y los cilindros de propulsión proporcionan un efecto de guía, similar al de una tuneladora TBM para roca dura.

4. ¿Máquina minera o TBM rectangular?

La industria minera quiere equipos de excavación que sean potentes y altamente productivos, pero a la vez ligeros y fáciles de mover. La MDM se desarrolló teniendo estos objetivos en mente en la mayor medida posible. Con base en la foto que aparece más abajo (ver Figura 7), podría parecer que estos objetivos se cumplieron a la perfección. Se puede ver un robusto cabezal de corte para roca sobre un transportador de orugas con gran movilidad. Sin embargo, éste es sólo un módulo de la MDM. La MDM fue transportada por la rampa como tres módulos principales. Como se puede ver en la Figura 4, que muestra la MDM en su totalidad, se necesitan elementos estructurales y mecánicos significativos para proporcionar las elevadas fuerzas de corte que permiten una excavación eficiente de la roca dura, una configuración típica de las tuneladoras TBM para roca dura.

La MDM tiene un tamaño y un peso significativos, ambos necesarios para proporcionar una excavación efectiva en roca dura. No se trata de una máquina minera ligera y de gran movilidad, como una rozadora o una máquina de minería continua. Por lo tanto, la MDM se parece más a una "tuneladora TBM rectangular" que a una máquina minera móvil. Si bien se hicieron esfuerzos para que la MDM fuera relativamente fácil de transportar y de montar, sigue siendo una máquina grande con tiempos de instalación y traslado considerables. Por lo



▲ Figura 7. Cabezal de corte MDM sobre un transportador de orugas.



▲ Figura 8. Túnel excavado con una tuneladora MDM en el que se puede ver la malla metálica de alta resistencia en el techo del túnel.



▲ Figura 9. Perforadoras hidráulicas de percusión para la fijación de pernos en el techo.

tanto, sólo es práctica para túneles largos. A la industria minera le gustaría poder contar con una máquina de excavación que pudiera cortar un centenar de metros, o incluso unas pocas docenas de metros, y luego ser transportada rápidamente a un nuevo sitio; cortar otro poco allí, y nuevamente ser transportada a otro lugar. La MDM no se ajusta a esa aplicación, pero es efectiva para excavar túneles rectangulares más largos con alta productividad, como los túneles de acceso a minas y túneles de ventilación, así como túneles de acarreo de minerales para yacimientos de minerales profundos.

Al igual que otras tuneladoras TBM, la MDM arrastra un sistema de respaldo. Dicho sistema de la tuneladora MDM está compuesto por siete pórticos, más tres pórticos de almacenamiento de suministros. Los pórticos de respaldo proporcionan espacio para montar el equipo de energía y control, el depurador de polvo y el sistema de ventilación, la eliminación de lodo, el material, el suministro y otros sistemas. Se trata de una máquina de tunelaje real, que produce un túnel de acceso terminado y bien soportado, con las tuberías instaladas para toda vida útil de la mina.

En caso de necesitarse una máquina más ligera y con mayor movilidad, estos sistemas tendrían que reducirse en gran medida, y quizás dejarse en el piso del túnel y conectarse a la máquina de excavación con cables umbilicales. Una máquina con dichas características tendría mucha menos potencia y productividad.

5. Sistemas de soporte del techo MDM

Un apoyo inmediato y efectivo para el techo era un requisito estricto en Fresnillo. Al igual que otras tuneladoras TBM, la MDM está equipada con un escudo de techo de accionamiento hidráulico, que proporciona protección en la zona de la zapata de agarre frontal, donde no había espacio disponible para las actividades de sostenimiento del techo. Se instaló tanto una malla metálica especial de alta resistencia ("Mesha") para soporte del terreno, como pernos de roca justo hacia atrás del escudo del techo. La malla fue traída al frente de la tuneladora MDM en rollos. Cada rollo era lo suficientemente largo para brindar cobertura a lo largo del ancho del techo, y a cada lado hasta la línea media del túnel (*springline*). Los paneles de malla tienen un ancho de 1.40 m para proporcionar un traslape en cada fila de pernos del techo. El espaciado entre los pernos del techo es de 1.24 m. Se eligió esta distancia porque era adecuada para un apoyo efectivo en las condiciones previstas. Además, la separación entre los pernos del techo era correspondiente con la separación entre las cadenas de suspensión de la cinta transportadora, que era utilizada para la remoción del material (ver Figura 8).

Los perneadores y posicionadores del techo delantero eran perforadoras hidráulicas de percusión. Estas perforadoras instalaban los pernos a lo ancho del techo.

Además, había perforadoras traseras, que instalaban pernos laterales en las paredes. Estas perforadoras también podían girarse hacia delante y articularse para perforar un barrenado de reconocimiento en el frente, o una serie de agujeros en el frente para el drenaje o para la inyección de lechada de preexcavación (ver Figura 9).

6. Remoción de la rezaga con la tuneladora

Se utilizó un sistema transportador para túnel extensible Robbins para retirar la rezaga producida por la tuneladora



▲ Figura 10. Transportador de túnel montado en la clave.



▲ Figura 11. Bastidor principal de la tuneladora MDM sobre orugas de transporte dentro del área de la cámara de montaje.

MDM. El sistema transportador se eligió por diversas razones. El transportador tiene una gran capacidad y no introduce ningún tipo de contaminación por los gases de escape. Además, no había espacio suficiente para que camiones mineros de gran capacidad pudieran pasar por este túnel. Otra consideración fue que el transportador del túnel fuera capaz de retirar de manera segura la rezaga en pendientes bastante elevadas. Se tiene planeado que los futuros túneles MDM tengan una pendiente de hasta el 7% para desarrollar los niveles más profundos de la mina.

El transportador del túnel se montó en el centro de la clave (ver Figura 10). Esto dejó más espacio para el paso de vehículos y para la instalación de tuberías y otros servicios dentro del túnel. Además, esta posición central permitió que la banda transportadora del túnel pudiera dirigirse directo hasta la descarga del transportador de cadena MDM. No fueron necesarios ni un transportador de transferencia separado, ni un punto de transferencia adicional.

La estructura de la banda transportadora del túnel fue añadida de manera continua a medida que la tuneladora MDM avanzaba hacia adelante, dentro de la protección de la Ventana de Instalación. Por lo tanto, el personal no estaba expuesto a las bandas en movimiento. Como ya se mencionó con anterioridad, el transportador del túnel estaba suspendido

mediante cadenas sujetas a los pernos del techo. No se necesitaron pernos adicionales en el techo para suspender al transportador.

El contenedor (cassette) de almacenamiento soltaba gradualmente la banda transportadora a medida que la tuneladora MDM avanzaba, por lo que el transportador del túnel continuamente se extendía. El contenedor era bastante largo, por lo que había que preparar un espacio adecuado bajo tierra. La banda del túnel transportaba la rezaga fuera del túnel, por encima del contenedor, y posteriormente hacia la unidad de potencia principal. La banda descargaba la rezaga en la unidad de potencia principal hacia un sistema de transporte transversal, el cual a su vez descargaba la rezaga de manera selectiva hacia cualquiera de los dos silos de 450 m³ creados mediante actividad minera por elevación. Los silos descargaban en una zona de carga, donde se cargaban trenes eléctricos para su transporte al pozo de rezaga.

7. Transporte y movilización subterránea de la tuneladora MDM

La tuneladora MDM necesitaba ser transportada desde la superficie hasta el nivel -695 m de la mina Fresnillo a través del túnel de la rampa principal existente. Se trataba de un viaje de 8 km hacia abajo por la rampa. Esta rampa tenía una sección transversal limitada, un fondo ondulado, pendientes pronunciadas y muchas curvas con radios cerrados. La MDM se montó lo más completamente posible en la superficie y se transportó hacia abajo por la rampa en tres módulos principales: el cabezal de corte, el marco principal frontal y la sección de agarre trasera. La compañía de maquinaria minera "Fletcher Mining Machinery", en colaboración con los ingenieros de Robbins, desarrollaron un transportador de orugas especial. El transportador disponía de una articulación multi-eje para que los módulos pudieran "agacharse y zigzaguear" para sortear los obstáculos en la rampa de la mina, de forma muy parecida a la de una persona haciendo espeleología en el pasillo de una caverna.

Una caverna de montaje y de lanzamiento fue instalada en el primer emplazamiento del túnel MDM en el nivel -695 m. La caverna era lo suficientemente larga como para albergar a la MDM completa y al sistema de respaldo, así como al contenedor del transportador continuo. Esta caverna requirió una excavación significativa para prepararla, pero permitió que la MDM y el transportador fueran utilizados inmediatamente, desde el primer corte de la tuneladora MDM (ver Figura 11).

La sección transversal de la caverna de ensamblaje y lanzamiento sólo era ligeramente más amplia que las dimensiones de 5 x 4.5 m del corte de la tuneladora MDM. No fue necesario realizar una excavación extremadamente grande. Se preparó un nicho local en la corona para un montacargas manual. A medida que las

secciones de la tuneladora MDM fueron desplazadas por debajo de este nicho sobre las orugas, el montacargas fue utilizado para elevar el escudo del techo, las perforadoras y otras piezas accesorias.

8. Estatus y desempeño de la tuneladora MDM

La tuneladora MDM fue puesta en marcha a gran profundidad, como se ha descrito con anterioridad. Con fecha a julio de 2021, ha excavado unos 1.7 km en el primer túnel. La máquina está perforando un plano de túnel más o menos circular, que terminará en la cámara de lanzamiento original. Una vez llegando allí, se relanzará desde la misma cámara, pero conducirá al -7% para desarrollar una vía de acceso a los niveles más nuevos y profundos de la mina.

No cabe duda de que la MDM ha tenido algunas "dificultades iniciales". Pareciera que éstas han sido superadas, y la máquina producirá túneles de acceso rectangulares finalizados a un ritmo promedio de 150 metros por mes. Esto supera a la excavación de calzadas mediante el método de barrenación y voladura por un margen muy favorable, con mayor seguridad, consistencia y un producto de calzada rectangular finalizado.

En Fresnillo, la tuneladora MDM está excavando en andesitas y esquistos con intrusiones de cuarzo. Estas intrusiones han obstaculizado intentos anteriores por excavar estos túneles con rozadoras pesadas.

9. Conclusiones

La MDM está excavando con éxito túneles de desarrollo de perfil rectangular en Fresnillo. Este éxito se debe en gran medida a la comprometida actitud de colaboración entre Fresnillo, Robbins y Topo Machinery. La mayoría de las minas han considerado estos nuevos equipos como "experimentos", y no han dedicado los recursos necesarios como energía, agua, mano de obra, sistemas de acarreo de material, ventilación, etc. Fresnillo le ha otorgado los recursos necesarios, y todas las partes están decididas a hacer que la tuneladora MDM haga el trabajo para el que fue concebida.

La MDM está cortando con éxito el perfil con el piso plano y rectangular deseado. La tasa de producción es muy favorable en comparación con la excavación mediante el método de barrenación y voladura. La tuneladora MDM ha atravesado de manera exitosa por zonas de terreno malo y abundantes entradas de agua. Se han utilizado métodos de minería tradicionales para aumentar la capacidad de soporte terrestre de la MDM en áreas donde la calidad del terreno es particularmente mala, de tal modo que la MDM pudiera seguir adelante.

El éxito temprano también ha dado lugar a algunas observaciones generales: debido a la acción de corte cíclica y oscilante, la máquina tiene una menor productividad en comparación con una tuneladora TBM tradicional y rotativa, que corta un perfil circular. Si bien el uso de esta tuneladora sigue representando numerosas ventajas, entre las que destaca una calzada plana, las comparaciones deben evaluarse cuidadosamente para cualquier excavación minera significativa que esté considerando utilizar este método.

La MDM no es la "máquina de excavación para roca ligera y de gran movilidad" que la industria tanto desea. Una máquina con tal ligereza podría ser posible, y seguramente se desarrollará debido a las demandas de la industria minera. Sin embargo, una máquina de este tipo tendrá seguramente como inconveniente una menor productividad.