

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 8. Excavación con máquinas integrales



Rubén Pérez Álvarez

Departamento de Transportes y Tecnología
de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

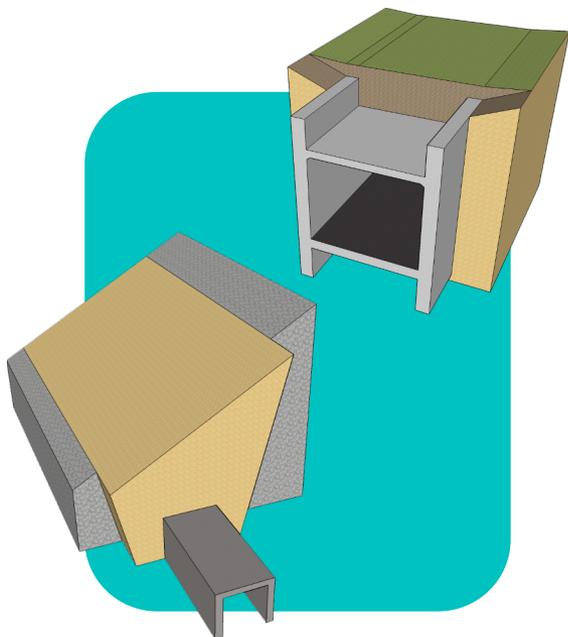
[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

TEMA 8: EXCAVACIÓN CON MÁQUINAS INTEGRALES

8.1. Introducción.

8.2. Topos: Campo de aplicación, composición y sistemas de excavación.

8.3. Escudos: Campo de aplicación, composición y sistemas de excavación.



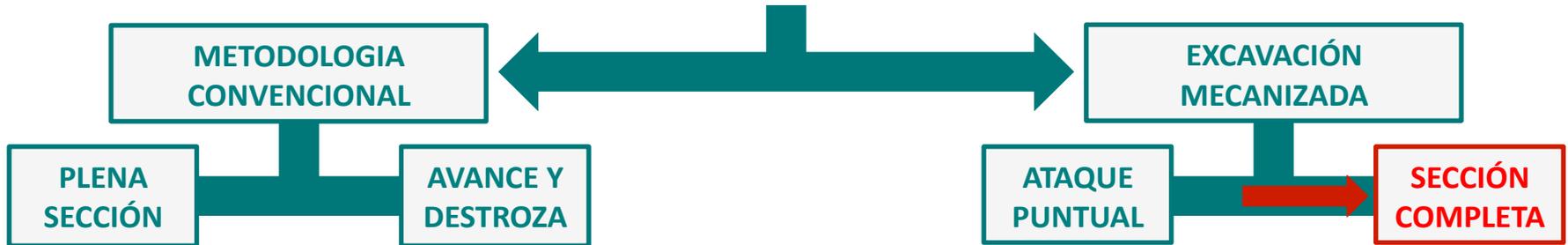
«Sandvik MT 720 Roadheader» (© Sandvik Mining and Construction), Kelly Michals.

<https://www.flickr.com/photos/rocholt/>

<https://flic.kr/p/5nei2u>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Principales tipologías de avance en túneles y obra subterránea



<https://www.flickr.com/photos/mikelo>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0>.



<https://www.flickr.com/photos/barrenera>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.



<https://www.flickr.com/photos/pacgov>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>.



«Tunnel boring machines». Brisbane City Council.
<https://www.flickr.com/photos/brisbanecitycouncil>.
<https://flic.kr/p/fttmSd>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

El término «**máquinas integrales**» o las siglas «**TBM**» (Tunnel Boring Machine), aluden a un conjunto de equipos capaces de excavar un túnel a plena sección, permitiendo además colocar un sostenimiento provisional o de carácter definitivo. Se dividen en dos grupos fundamentales, que si bien presentan similitudes en aspectos básicos, pueden identificarse notables diferencias en función del tipo de materiales a cuya excavación se destinen, requiriendo un buen conocimiento de éstos para su selección.

TIPOLOGÍAS

- Los **topos** se conciben para el trabajo con **rocas medias o duras**, que **no presenten necesidades particulares de sostenimientos o desagüe**, presentan protecciones limitadas, y el avance se verifica por la aplicación contra el frente del par de giro de la cabeza y el empuje longitudinal, valiéndose de grippers apoyados directamente sobre el terreno, competente, o en casos particulares sobre cerchas.
- Los **escudos**, empleados principalmente en **rocas blandas o suelos**, frecuentemente **inestables y saturados**.

Introducción

Algunos aspectos diferenciadores

Los **topos** se componen de una **cabeza giratoria dotada de discos cortadores**, accionada mediante motores eléctricos, y basa su avance en el empleo de unos gatos que reaccionarán sobre las zapatas de los grippers, que han de anclarse sobre las propias paredes del túnel (de ahí su idoneidad limitada al trabajo con terrenos de notable competencia).

Los elementos de corte en el caso de los **escudos**, máquinas que reciben su nombre de la coraza a cuyo amparo se realizan los trabajos, son principalmente **picas**, y el empuje se desarrolla en base a **cilindros perimetrales** que se apoyarán sobre las dovelas de sostenimiento ya colocadas, supliéndose de esta manera la ausencia de competencia por parte del terreno.

Fuente: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.



«Tunnel boring machines». Brisbane City Council.
<https://www.flickr.com/photos/brisbanecitycouncil>.
<https://flic.kr/p/fttmSd>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Diámetros más comunes

<https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/gripper-tbm.html>

Considerando la aplicación de los **topos en roca dura** comienza normalmente en secciones de **2 metros de diámetro**, con una **punta** de aplicación entre **los 3 y los 4 metros** de diámetro, descendiendo lentamente hasta diámetros de **7**, e iniciando un descenso brusco hasta un mínimo en diámetros entre **11 y 12 m**. A partir de **7 m** el desalojo del escombro constituye un problema logístico, y a partir de **9**, la limitación asociada a la velocidad máxima asumible por los cortadores de gálibo, de **2,5 m/s**, determinará la velocidad de penetración.

Fuente: Andreani Cano, L.F. (1988): «Conceptos Básicos y nuevos avances técnicos de las tuneladoras (TBM) para roca dura». Ingeotúneles, Vol. 2. Madrid, Entorno Gráfico, S.L.

Si bien los topos proporcionan rendimientos elevados en condiciones óptimas, ofrecen una **escasa flexibilidad** y se caracterizan por la **dificultad para acceder a realizar labores en el frente**. La máquina deberá dimensionarse para satisfacer los requisitos asociados a aquellos tramos de condiciones pésimas a lo largo del trazado que, conforme ha demostrado la experiencia, pueden implicar el consumo del 50% del plazo de ejecución.

Limitaciones

Encuentran limitaciones de aplicación o problemas desde el punto de vista geológico /geotécnico en **materiales blandos, muy fallados o muy abrasivos.**

Dadas sus características, estos equipos únicamente proporcionan secciones circulares, **radios de curvatura mínimos entre 300 y 500 m**, pendientes máximas limitadas por lo general entre un **3,5 y un 4%**, y dada la inversión y tiempos de transporte y montaje deben aplicarse en túneles de longitudes notables. Con respecto a lo señalado sobre la pendiente, **existen equipos especiales capaces de excavar planos inclinados de hasta 45°.**

Fuente: Andreani Cano, L.F. (1988): «Conceptos Básicos y nuevos avances técnicos de las tuneladoras (TBM) para roca dura». Ingeotúneles, Vol. 2. Madrid, Entorno Gráfico, S.L.



Fuente: Metropolitan Transportation Authority of the State of New York.
<https://www.flickr.com/photos/mtaphotos>.
<https://flic.kr/p/apwOiQ>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

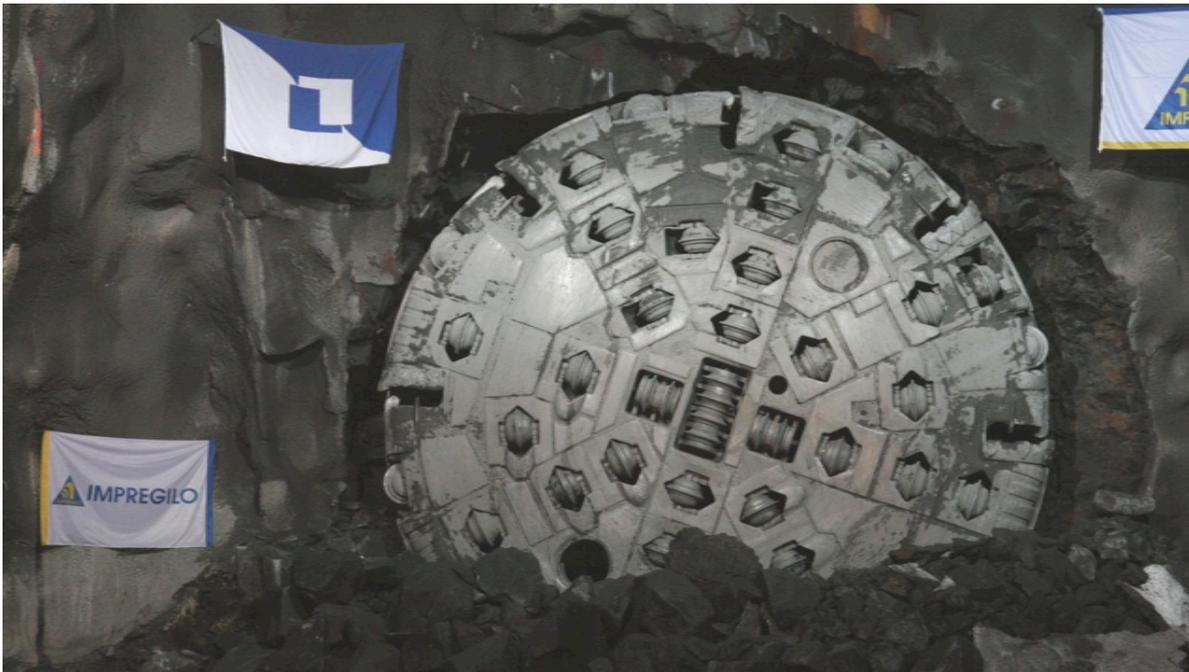
Topos

Elementos de los topos

CABEZA

<https://www.youtube.com/watch?v=IYzNbp48DBo>

La cabeza es la parte móvil encargada de la excavación de la roca, presentando discos de metal duro que girarán libremente sobre el eje. Los discos primitivos presentaban la forma de perfil en V, pero pronto se impuso una sección constante, con anchura de entre 10 y 35 mm, que aún a día de hoy se aplica.



«TBM Breakthrough». Málfríður Guðmundsdóttir.
<https://www.flickr.com/photos/fridamin>.
<https://flic.kr/p/4EzzSP>.
<https://www.flickr.com/photos/fridamin>.

Topos

Diámetros más comunes

CABEZA

DISCOS DE CORTE

El diámetro de dichos discos de corte se incrementará proporcionalmente en función de la dureza de la roca con la que deba trabajarse, siendo frecuentes los de **17"**, esultando los de **21"** adecuados para el trabajo con **rocas muy duras (unos 250 MPa)**.

La disposición de dichos elementos suele ser en **espiral**, de tal manera que el giro de la cabeza genera círculos concéntricos cuya variación relativa de radios será prácticamente constante, salvo en la zona central de la sección excavada, que corresponde con la zona de la cabeza con mayor concentración de discos, favoreciendo la rotura de la roca a modo de cuele. Esta de rotura de la zona central a la exterior se ve favorecida por una cierta conicidad de la cabeza.



«Blade close-up». Benjamin Kabak.

<https://www.flickr.com/photos/benyankee>.

<https://flic.kr/p/8273Uh>.

<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

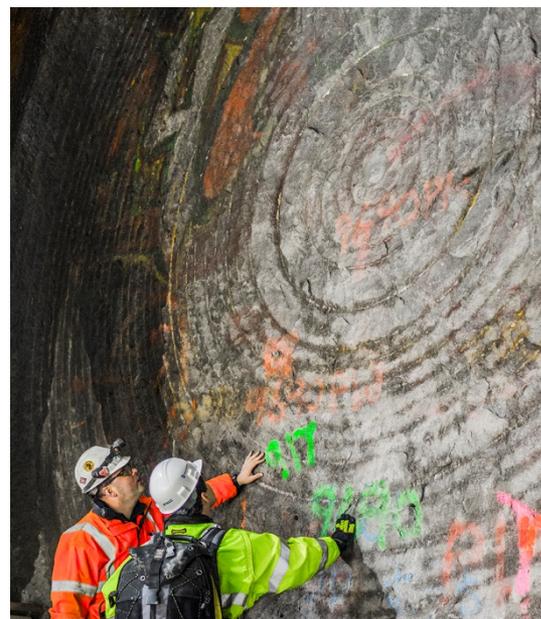
Topos

Diámetros más comunes

CABEZA

DISCOS DE CORTE

Esta acción de corte mecánico se puede dividir en dos fases. En la primera de ellas, el cortador ejerce presión sobre el terreno, en un proceso de **rotura frontal**. En las zonas restantes comprendidas entre los surcos concéntricos provocados por los cortadores la rotura se produce por **indentación**, generando escombros lajosos característicos de este tipo de maquinaria. Resulta por tanto importante adecuar la separación entre discos a las características de la roca en cuestión, además de otros aspectos como el diámetro de los cortadores, ya mencionado, o el empuje aplicado. Ciertas características pueden contribuir a mejorar la penetración, tales como el diaclasado o la propia facturación de los materiales.



«East Side Access: March 3, 2014». Metropolitan Transportation Authority of the State of New York.
<https://www.flickr.com/photos/mtaphotos>.
<https://flic.kr/p/mbV7HP>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

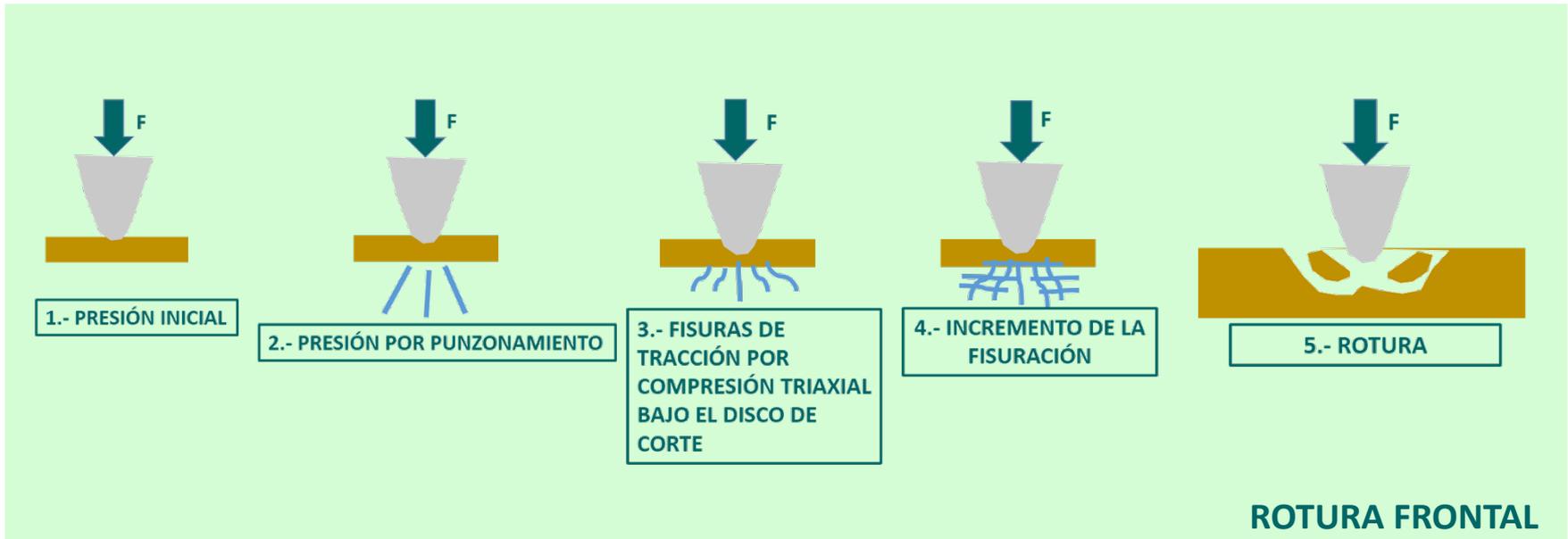
DIÁMETROS DE CORTADORES	15,5"	17"	18"	19"
Carga máxima por cortador	250 kN	270 kN	280 kN	300 kN

Topos

Diámetros más comunes

CABEZA

DISCOS DE CORTE



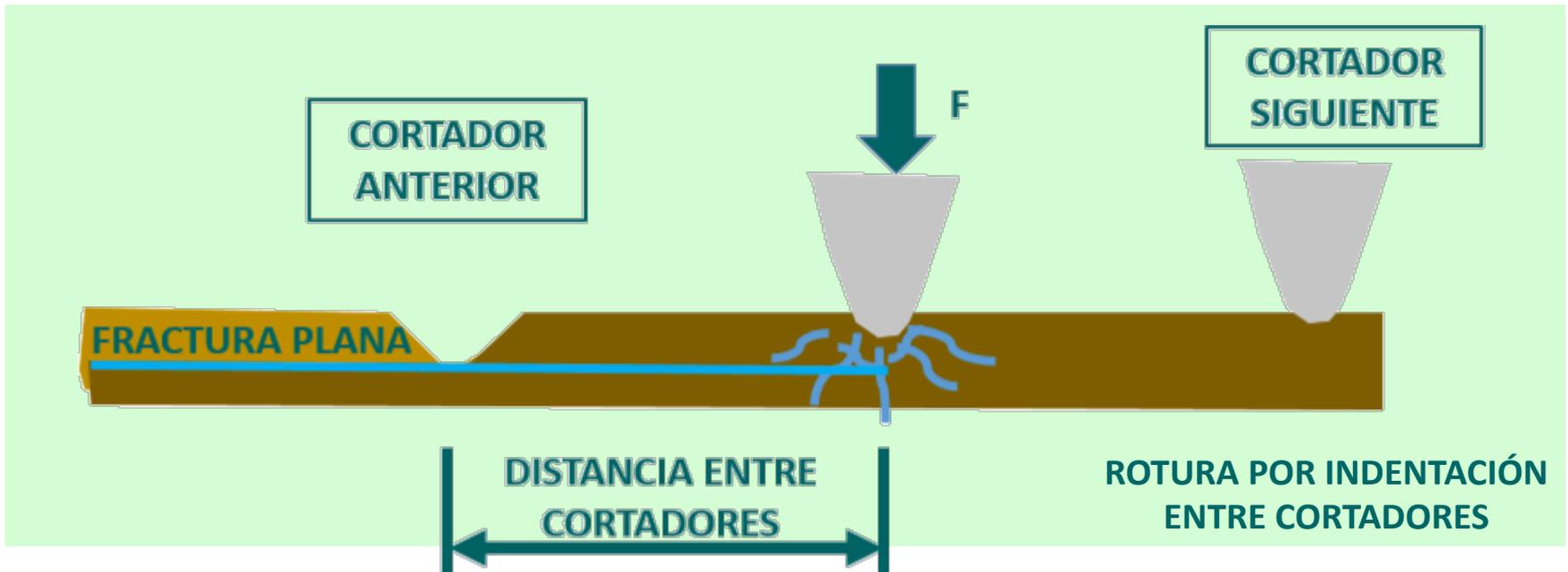
Fuente: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

Topos

Diámetros más comunes

CABEZA

DISCOS DE CORTE



Fuente: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

CABEZA

Los escombros producidos suelen ser evacuados mediante **cangilones periféricos**, que los recogen y conduce hasta una **cinta transportadora** dispuesta para su desalojo. La cabeza es accionada generalmente mediante un accionamiento eléctrico, presentando dos velocidades de giro. El control de la velocidad de giro y el par muestra una gran importancia para el trabajo con rocas de calidad diversa:

- ❖ Para **rocas duras** suele ser adecuado el trabajo con un **par no demasiado elevado, pero sí una alta velocidad** que optimice el empleo de la potencia de la máquina.
- ❖ En aquellos terrenos más **blandos** en los que la penetración de la máquina sea elevada, con objeto de no sobrecargarla deberá recurrirse a **una velocidad menor**.
- ❖ Si se presentan **bloques**, puede recurrirse a una **reducción de la velocidad** que minimice las posibilidades de derrumbe tanto en el frente como en la clave.

Una forma particular de topo es la asociada a los **equipos dúplex**, constituida por una tuneladora inicial que construye la galería piloto, y una segunda, ensanchadora, que amplía ésta hasta el diámetro final. La ensanchadora requiere un fuerte empuje contra el frente anular que debe excavar, por lo que se le dota de un cuerpo delantero de diámetro análogo al de la galería piloto, de tal modo que en lugar de empujar la cabeza de ensanche, se tirará de ella.

Elementos de los topos

ZAPATAS

Dada la función de las zapatas, de anclar la máquina al terreno permitiendo el avance de la cabeza, en su diseño deberá considerarse una superficie que resulte mayor a menor sea la resistencia del terreno. Por lo general su anchura no suele sobrepasar los 70 cm, con objeto de permitir su apoyo entre cerchas, o incluso presentar un canal central que permita el acomodo de una cercha intermedia, si se prevé el trabajo con terrenos excesivamente blandos.

CILINDROS DE EMPUJE

Suelen variar en número entre 2 y 4, con entre **1,5 y 2,00 metros en recorrido** (determinando el avance de cada ciclo), y ofrecen el empuje requerido contra el frente. Una vez concluido su recorrido, los grippers que fijan la máquina al terreno deben soltarse, y la retracción de estos cilindros de empuje deberá conseguir el avance de los elementos fijos de la máquina.



«Hydraulic jacks holding a TBM in place».
Licensed under CC BY-SA 3.0. Vía Wikipedia.
<http://en.wikipedia.org/wiki/>.

Topos

Elementos de los topos

BACK-UP

Constituido por los **elementos posteriores que arrastra la máquina en su avance**, tales como **transformadores, carretes, captadores de polvo, ventilación, polipastos para la colocación de soleras de dovela, o sistemas de evacuación de escombros**. A lo largo de la totalidad de la longitud del túnel suele disponerse una **solera** que permite colocar una **vía** que favorezca la circulación durante la ejecución de trenes a velocidades de hasta **30 km/h**, simplificando además el drenaje o la colocación de revestimientos definitivos de hormigón, ya que no se requeriría colocar encofrado de solera.

En cuanto a las alternativas de evacuación de escombros, existen varias alternativas, como **trenes de tolvas** (baterías de tolvas que igualan en número a los vagones de los trenes, alimentadas por la cinta transportadora primaria, actúan como acopios y elementos de regulación para la carga), **cintas puentes** (en su interior pueden alojar el tren completo y lo carga conforme éste pase por debajo, siendo posible mediante un cambio californiano la espera de un segundo tren), **el sistema Rowa** (conjunto de dos vías paralelas, para barrenos cargados y vacíos, con tracción mediante cadenas de arrastre en lugar de locomotora y cambio hidráulico) o **cintas convencionales**, que eliminan los requisitos de disponer vías, siendo una alternativa frecuente por reducir tiempos muertos.

Topos

Elementos de los topos

BACK-UP



«Yucca Mountain TBM at South Portal».
Licensed under CC BY-SA 3.0.
Vía Wikimedia Commons.
<http://commons.wikimedia.org/wiki/>

GUIADO

Para el guiado suele emplearse un rayo láser que establece la dirección de un eje paralelo al del túnel, que puede observarse de forma constante en una pantalla cuadrículada, si bien es conveniente garantizar mediante topografía convencional eje y rasante.

Elementos de los topos

INSTALACIÓN DE ELEMENTOS DE SOSTENIMIENTO

La parte superior del equipo debe estar debidamente protegida de las posibles caídas de piedras, por lo que las TBMs suelen presentar una lámina de acero en esa zona que la protege. Con el fin de proteger al personal implicado en las labores de sostenimiento, dicha protección se aplicó igualmente a la zona central, procurando flexibilizar el elemento mediante cortes longitudinales que permitan el trabajo de las **bulonadoras**, pero que además contribuyan a reducir el posible rozamiento del conjunto. Como alternativas para el sostenimiento se puede considerar la aplicación de **bulones, gunitadoras o cerchas**.

El tratamiento de gunitado únicamente resulta recomendable en la zona próxima al back-up, dada la restricción espacial, por lo que se requieren las otras alternativas como tatamientos previos. La aplicación de **cerchas** se combina con el **bulonado provisional** y el **hormigón proyectado** aplicado posteriormente, por lo que se requiere la inclusión en los diseños de equipos de colocación de anillos metálicos o cercas de entibación, considerándose ya en los primeros modelos de TBMs introducidos en el mercado, estando en la actualidad plenamente mecanizado.

CLASE	Q	RMR	COMPORTAMIENTO DE MACIZO ROCOSO	SOSTENIMIENTO			
				TIPO	CANTIDAD POR METRO LINEAL	LUGAR DE INSTALACIÓN	INFLUENCIA SOBRE EL AVANCE
F1	10 - 100	65 - 80	Estable a largo plazo	Sostenimiento local, bulones de l = 2 m	Hasta 0,5	Plataforma de trabajo	Ninguna
F2	4 a 10	59 - 65	Caídas de rocas	Sostenimiento local		Plataforma de trabajo	Ninguna
				Bulones, l = 2 m	Hasta 1 m		
				Mallazo	Hasta 1 m ²		
			Hormigón proyectado, 5 cm	Hasta 0,1 m ³			
F3	1 a 4	50 - 59	Frecuentes desprendimientos en el área de la máquina	Sostenimiento local		Plataforma de trabajo	Pequeños retrasos
				Bulones, l = 2 m	De 1 a 3		
				Mallazo	De 1 a 1,5 m ²		
			Hormigón proyectado, 5 cm	De 0,1 a 0,5 m ³			
F4	0,1 a 1	35 - 50	Frecuentes desprendimientos en el área de la máquina	Bulones, l = 2,5 m	De 5 a 7	Plataforma de trabajo, detrás de la cabeza de corte	Retrasos después de cada carrera
				Mallazo	De 9 a 18 m ²		
				Hormigón proyectado 8 cm	De 0,5 a 1,0 m ³		
			Cerchas	De 40 a 80 kg			
F5	0,03 a 0,1	27 a 35	Frecuentes desprendimientos en la cabeza de corte después de cada carrera de avance	Bulones, l = 2,5 m	De 7 a 10	Inmediatamente tras la cabeza de corte después de cada carrera parcial, sostenimiento adicional desde la plataforma de trabajo	Fuertes retrasos tras cada ración de carrera
				Mallazo	De 18 a 27 m ²		
				Hormigón proyectado 10 cm	De 1,8 a 3,0 m ³		
			Cerchas	De 80 a 160 Kg			
F6	0,01 a 0,03	20 a 27	Gran sobreexcavación en el área de la cabeza de corte después de cada carrera parcial	Bulones, l = 3 m	De 7 a 10	Inmediatamente detrás de la cabeza de corte, detrás de cada carrera parcial, sostenimiento adicional desde la plataforma de trabajo	Fuertes retrasos después de cada fracción de carrera
				Mallazo	De 18 a 27 m ²		
				Hormigón proyectado 15 cm	De 1,8 a 3,9 m ³		
			Cerchas	De 160 a 300 Kg			
F7	0,001 a 0,01	5 a 20	Sin capacidad de autosostenimiento	Medidas especiales adoptadas según las condiciones	Micropilotes, proyección, jet grouting, inyección de espumas, hormigón encofrado		Retrasos de meses

Consideraciones

VELOCIDAD DE LA CABEZA DE CORTE

Comúnmente se acepta que la velocidad de la cabeza de corte resulta inversamente proporcional al diámetro de perforación:

$$n = \frac{X(r.p.m.)}{D}$$

Siendo n las revoluciones por minuto de la cabeza de corte, X un factor de velocidad comprendido entre 40 y 50, y D el diámetro de la cabeza expresado en metros.

RELACIÓN PENETRACIÓN- EMPUJE DE CORTADORES

$$p = \left(\frac{F_1}{F} \right)^b$$

Siendo p la excavación neta en mm/vuelta, F1 el empuje crítico para un profundidad de un milímetro, F el empuje en KN, y b un exponente influido por el empuje crítico y la geología, que variará entre 1,7 y 2,5.

ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN

http://www.geocontrol.es/publicaciones/seleccion_tuneladoras_ingeopres.pdf

Parámetros a considerar en la selección de topos

La tabla adjunta recoge los principales factores a tener en cuenta en la selección de topos para el trabajo en roca, además de las condiciones limitantes o los principales aspectos sobre los que ejercen influencia.

PROPIEDAD	LIMITACIÓN	ASPECTO SOBRE EL QUE LA PROPIEDAD INFLUYE
Resistencia a compresión simple	< 300 Mpa (1)	Empuje de la máquina
		Diseño de los grippers
		Penetración neta
		Tamaño de los cortadores
Resistencia a la tracción	RT/RC < 0,142	Fracturación secundaria
		Averías
		Penetración neta
Fracturación y meteorización	RQD > 25	Empuje de la máquina
		Coefficiente de utilización
		Penetración neta
$K = \sigma_H / \sigma_V$ (2)	$F_5 > 1$ (3)	Coefficiente de utilización
Abrasividad. Contenido en SiO ₂	F(Schimazek) <= 2,7 Kp/cm	Desgaste de cortadores
		Coefficiente de utilización
Presencia de agua	Q <= 30 l/s	Coefficiente de utilización
Densidad	–	Penetración neta
Dureza Shore	–	Penetración neta
Módulo de Elasticidad	–	Penetración neta

1) En probeta cúbica

2) Ligada a la tensión tangencial en clave, conforme a la fórmula de Kirsch

3) Factor de seguridad en clave

Parámetros a considerar en la selección de topos

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

Debe tenerse en cuenta que la representatividad de la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa tiene un valor relativo, ya que rocas con una elevada resistencia a compresión simple pero con gran fracturación resultarán fácilmente excavables, y viceversa. La resistencia a compresión simple **influirá sobre el empuje de la máquina**: para que se produzca la fracturación en lascas, deberá superarse un determinado valor de empuje, **pudiendo proponerse como condición que el empuje del cortador (en libras), sea aproximadamente el doble de la resistencia a compresión de la roca (psi)**. En la actualidad, salvo rocas de muy marcada masividad, son sea una condición limitante.

La resistencia a compresión influye igualmente en **el diseño de los grippers**: su superficie ha de fijarse considerando que la tensión que vaya a transmitirse a la roca no supere su resistencia, ya que podrían provocar plastificaciones/roturas de hastiales.

Se entiende como penetración neta, la velocidad con la que la máquina penetra en el macizo, expresándose en m/revolución o m/h, si bien dadas las características particulares de cada equipo, podría hacerse referencia a la penetración/revolución / empuje/disco.

La resistencia a compresión influye igualmente en el diámetro de los cortadores, su número y disposición.

Parámetros a considerar en la selección de topos

RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE

La resistencia a compresión influye igualmente en el diseño de los grippers: su superficie ha de fijarse considerando que la tensión que vaya a transmitirse a la roca no supere su resistencia, ya que podrían provocar plastificaciones/roturas de hastiales:

$$\frac{P}{A} = \frac{\sigma_{CM}}{F}$$

- **P** = empuje máximo del topo (t).
- **A** = área de apoyo de los grippers m².
- **F** = coeficiente de seguridad, mayor o igual a 1,3.
- **σ_{CM}** = resistencia a compresión simple del macizo rocoso en t/m³.

Parámetros a considerar en la selección de topos

RESISTENCIA A TRACCIÓN

Con respecto a la resistencia a tracción, habitualmente se liga a la **tenacidad, R_t/R_c** , que ha de ser **inferior a 0,142** (la resistencia de la roca a tracción suele situarse en 1/10 de la resistencia de compresión). Parece consensuado que **incide en la fracturación secundaria** (rotura en lajas), en las **averías** (en rocas tenaces la cabeza vibra, lo que contribuye a averiar los rodamientos) y en la penetración neta, por su relación con la presión secundaria.

FRACTURACIÓN Y METEORIZACIÓN

La **fracturación y la meteorización** pueden referirse mediante el **RMR o la Q, influyendo en los requisitos de sostenimiento**. Como ya se ha señalado, un empuje excesivo de la máquina provocaría roturas de los hastiales. **El coeficiente de utilización también se ve influido por la fracturación y meteorización**, entendiéndose como tal el ratio entre horas reales de trabajo y horas efectivas de trabajo. Suele variar entre **0,50 para condiciones óptimas y 0,20 para excavaciones muy malas**. Valores inferiores no puntuales conllevarían una excavación no económica, pudiendo establecerse el límite del RMR en 25 para porcentajes importantes de la longitud total de un túnel (30 - 40%).

Parámetros a considerar en la selección de topos

FACTOR DE SEGURIDAD

Considerando el factor de seguridad en clave, **cociente entre la resistencia a compresión simple del macizo rocoso y la tensión tangencial máxima en clave**, a mayor sea éste, mayor resultará el coeficiente de utilización del equipo, pudiendo llegar a ser inaceptable para valores del factor de seguridad inferiores a 1.

ABRASIVIDAD

El contenido en cuarzo equivalente condiciona la abrasividad, y con ello el desgaste de los discos, debiendo cumplirse que el coeficiente **F de Schimazek sea menor o igual a 2,7 Kp/cm**. **Contenidos en SiO₂ superiores al 80% podrían hacer la excavación antieconómica**. Influirá igualmente en el coeficiente de utilización, dado el tiempo requerido para el cambio de discos.

Parámetros a considerar en la selección de topos

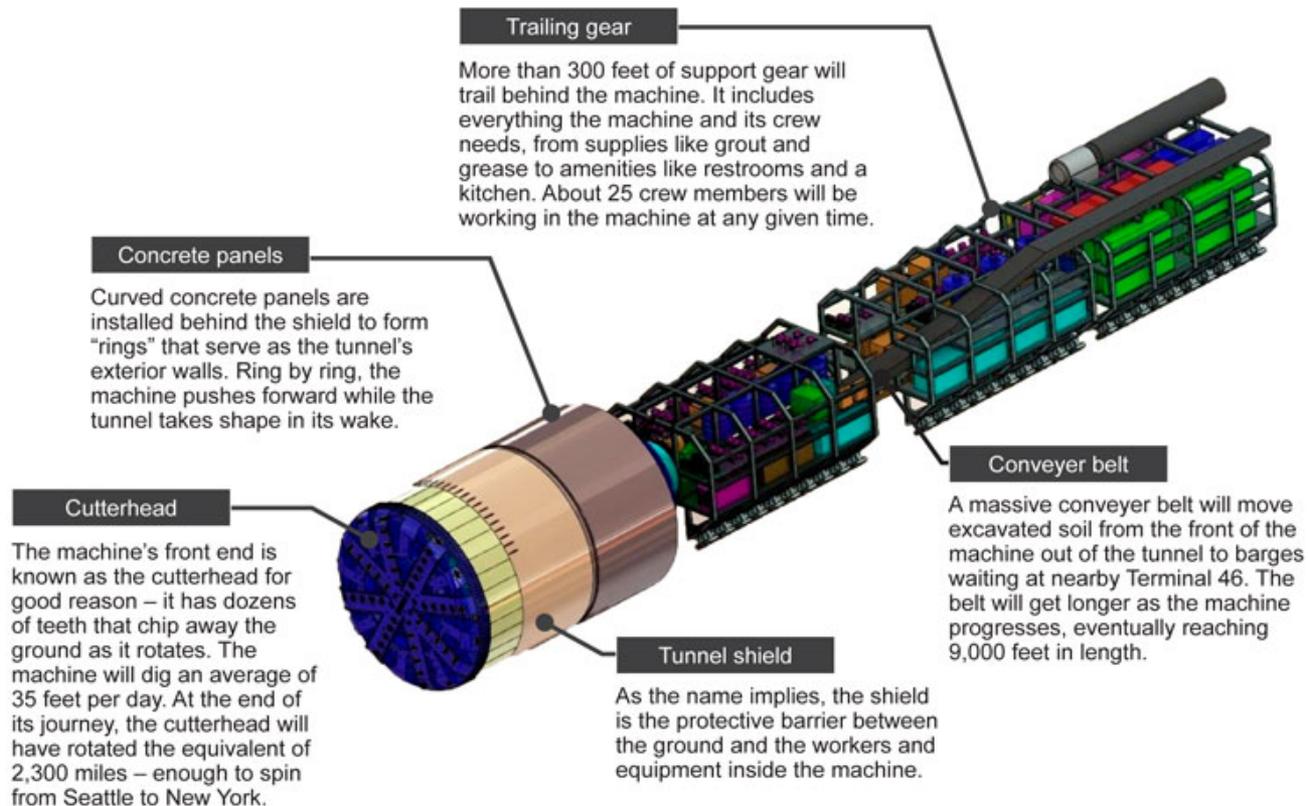
PRESENCIA DE AGUA

El agua resulta un enemigo fundamental para el funcionamiento de los topos, ya que aparte de la pérdida de calidad que ocasiona en el macizo, puede afectar los elementos eléctricos o hacer necesario el achique en caso de inundación. El valor que suele aportarse como límite es de **30 l/s**, pero ha de considerarse en qué tramo corresponde y dónde se mide dicho caudal. En cualquier caso, podrá considerarse como limitante aquel caudal que reduzca sustancialmente el coeficiente de utilización hasta hacerlo inadecuado, siendo necesario en ocasiones practicar nichos laterales auxiliares, a partir de los cuales ejecutar sondeos de drenaje.

Estefanía Puebla, S. (2002): «Caracterización Geomecánica en los proyectos de excavación de túneles con máquinas integrales». Ingeotúneles, Vol. 5. Madrid: Proyectos UD. ETSIMM.

Los escudos

Los escudos son empleados principalmente **en rocas blandas o suelos, frecuentemente inestables y saturados**. Los escudos generalmente presentan la cabeza, el cuerpo de mando y controles, los cilindros de empuje, el erector de dovelas y el back-up.



«The anatomy of a tunnel boring machine - a look inside the machine that will dig the SR 99 tunnel in Seattle». Washington State Dept. of Transportation.

<https://www.flickr.com/photos/wsdot/>

<https://flic.kr/p/doTTN1>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>

Los escudos

LIMITACIONES Y RENDIMIENTOS

Su aplicación se restringe a geometrías de sección circular, longitudes mínimas y pendientes adecuadas para el transporte sobre vía, **con radios de curvatura de como mínimo 200 m**.

Los rendimientos al igual que sucede en el caso de los topes suelen ser elevados, si bien están condicionados por las características del tipo de dovela a aplicar y de la propia tipología del escudo. El **coeficiente de utilización de estos equipos contempla tanto el avance como la colocación del sostenimiento, por lo que suele alcanzar el 75%**.

Elementos de los escudos

Los escudos generalmente presentan la cabeza, el cuerpo de mando y controles, los cilindros de empuje, el erector de dovelas y el back-up.

CABEZA Y CUERPO DE MANDOS

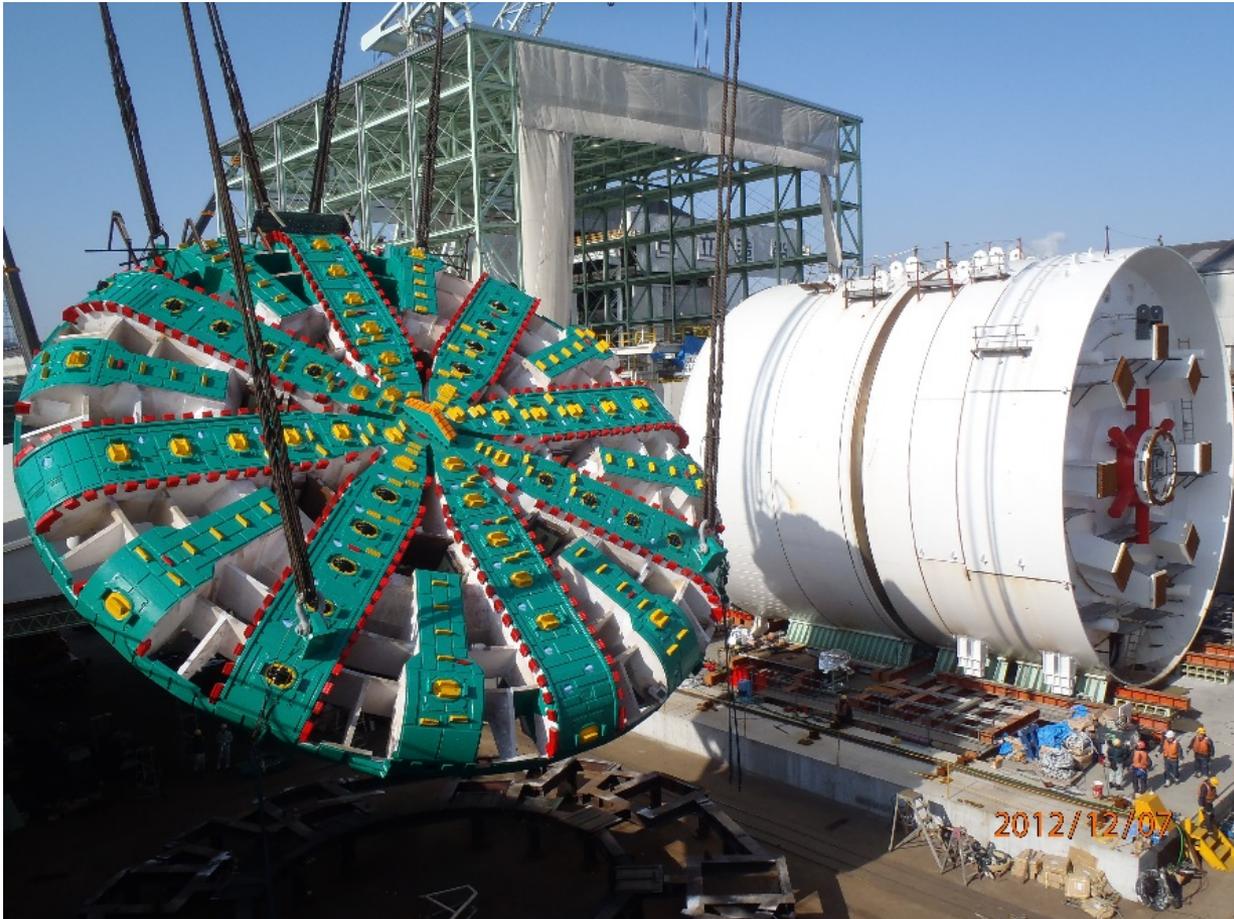
Incluida en el **primero de los cuerpos de la coraza**, incorpora un elemento excavador cuya naturaleza podrá diferir en función del tipo de escudo (manual, como en los modelos más antiguos, una rozadora, o una cabeza giratoria, siendo esta última opción la más habitual en la actualidad).

La cabeza giratoria se acciona mediante motores hidráulicos, que posibilitan una variación constante de la velocidad de giro **entre 0 y 10 rpm**, siendo además éste reversible. La cabeza suele presentar **picas**, y en ocasiones puede igualmente **contar con discos**. En terrenos de características muy variables suelen incluirse tanto discos como picas, si bien los primeros suelen ir adelantados con respecto a las segundas entre 2 y 3 cm, ya que son los encargados en trabajar en terreno duro, actuando las picas en terrenos blandos. Suele presentar una serie de aberturas regulables, por las que el escombros pasa a una cámara de la que será extraído mediante una cinta primaria u otros medios que serán comentados posteriormente. Por ejemplo en el caso de los escudos cerrados, que suelen trabajar con presión en el frente, ésta se sustituye **por un tornillo sin fin o un sistema hidráulico**.

El cuerpo de mandos por su parte se aloja en el **segundo cuerpo de la coraza**, junto con los motores.

Los escudos

CABEZA Y CUERPO DE MANDOS



«Up, up, and away». Washington State Department of Transports.

<https://flic.kr/p/dA5qXC>.

<https://www.flickr.com/photos/wsdot>.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

Elementos de los escudos

CILINDROS DE EMPUJE Y ERECTOR DE DOVELAS

El tercer cuerpo de la coraza, que recibe el nombre de cola del escudo presenta los cilindros de empuje y el erector de dovelas. Los cilindros de empuje se localizan en la periferia, presentando zapatas articuladas que facilitan el apoyo sobre las dovelas dispuestas para el sostenimiento. **Marcan con su recorrido el ciclo de avance**, por lo general entre **1,20 y 1,50 metros**. Finalizado el ciclo, los cilindros se retraen para permitir la colocación del nuevo anillo de revestimiento, quedando el conjunto protegido hasta la aplicación definitiva de éste por la coraza del tercer tramo. Las **dovelas** se transportan hasta el punto de colocación en mesas especiales, siendo colocadas mediante el erector, que las ubicará en el punto correspondiente hasta completar el anillo, sobre el que los cilindros ejercerán el empuje correspondiente para proceder al siguiente ciclo. Unos **sellos** dispuestos en la periferia de la coraza del escudo permiten que puedan **inyectarse mortero** con el fin de rellenar los **7 - 9 cm de espesor de trasdós** entre la dovela y el terreno, sin que dicho material entre a la máquina. El **tiempo de colocación de las dovelas puede oscilar entre 20 y 35 minutos**.



Colocación de dovela. Fuente: «Use of Underground Space. 5 - Basics of various kinds of Tunnels». Bachelor Civiele Techniek.

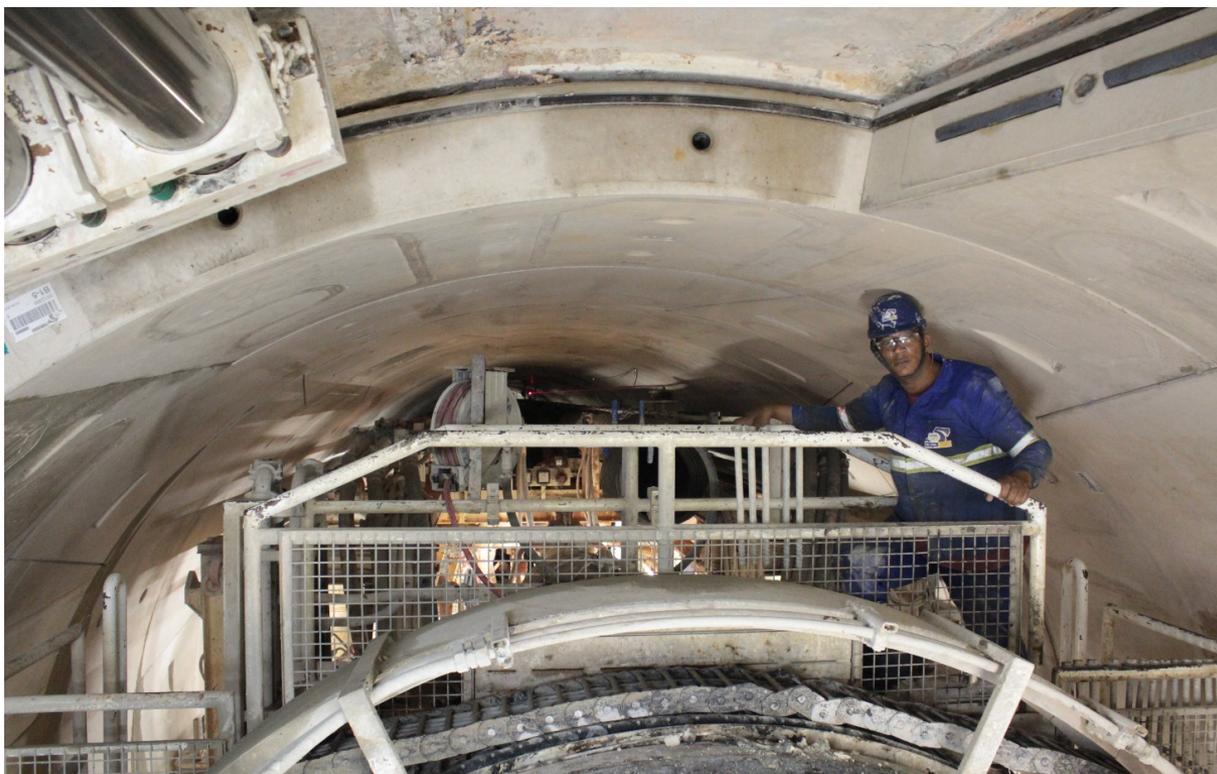
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

<http://ocw.tudelft.nl/courses/bachelor-civiele-techniek/use-of-underground-space/lectures/5-basics-of-various-kind-of-tunnels>.

Elementos de los escudos

CILINDROS DE EMPUJE Y ERECTOR DE DOVELAS

RETIRADA DE LOS CILINDROS PARA LA COLOCACIÓN DE LA DOVELAS



«Chegada do Tatuzão a Borba Gato». Metrô de São Paulo.

<https://flic.kr/p/pQTVkp>.

https://www.flickr.com/photos/metrop_oficial.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>.

Elementos de los escudos

BACK-UP

Conformado por un conjunto de plataformas que se deslizan sobre el revestimiento de hormigón y son arrastrados en el avance. Incorpora transformadores, cableado, ventilación, depósitos para el mortero y el sistema de evacuación de escombros, habitualmente una cinta puente que aloja el tren completo.

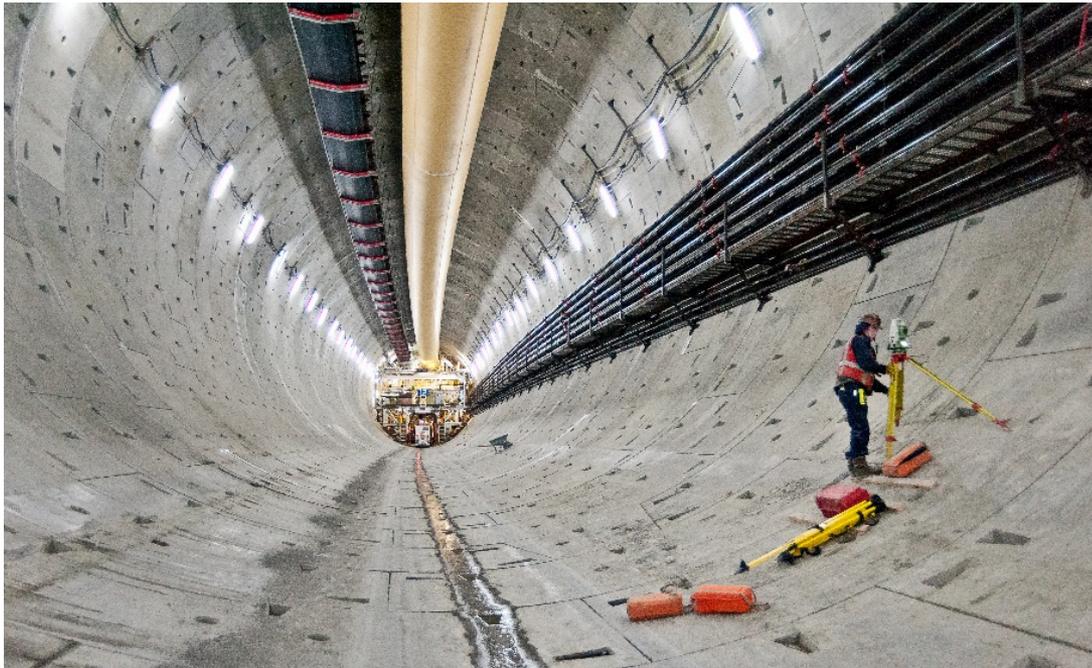


«Tatuzão no Poço Bandeirantes 2». Metrô de São Paulo.
https://www.flickr.com/photos/metrop_oficial.
<https://flic.kr/p/jbxJ7L>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.0/>.

Elementos de los escudos

GUIADO

Este tipo de equipos combinan la aplicación de un láser de guiado, junto con distanciómetro e inclinómetro, que permitan corregir posibles desviaciones con respecto a la traza de diseño del túnel, mediante la variación del flujo de aceite que accede a los cilindros de empuje. Las comprobaciones mediante topografía clásica son convenientes.



«Survey says, "This is one big tunnel"». Washington State Dept of Transportation. <https://www.flickr.com/photos/wsdot>. <https://flic.kr/p/ieXqcd>. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

Tipologías de escudos

ESCUDOS ABIERTOS

Son diversas, y su aplicación depende del frente de trabajo y su estabilidad. Para evaluar la estabilidad del frente en suelos se recurre a la **ley de Peck**, que considera la **presión geostática** del eje del túnel (P_g), la **presión que se ejerce contra éste** (P_a), y la cohesión (c). Valores superiores a cinco indican inestabilidad del frente. En caso de contar con frentes estables ($n < 5$), **se puede recurrir a escudos abiertos**, aplicándose los cerrados para **frentes inestables**.

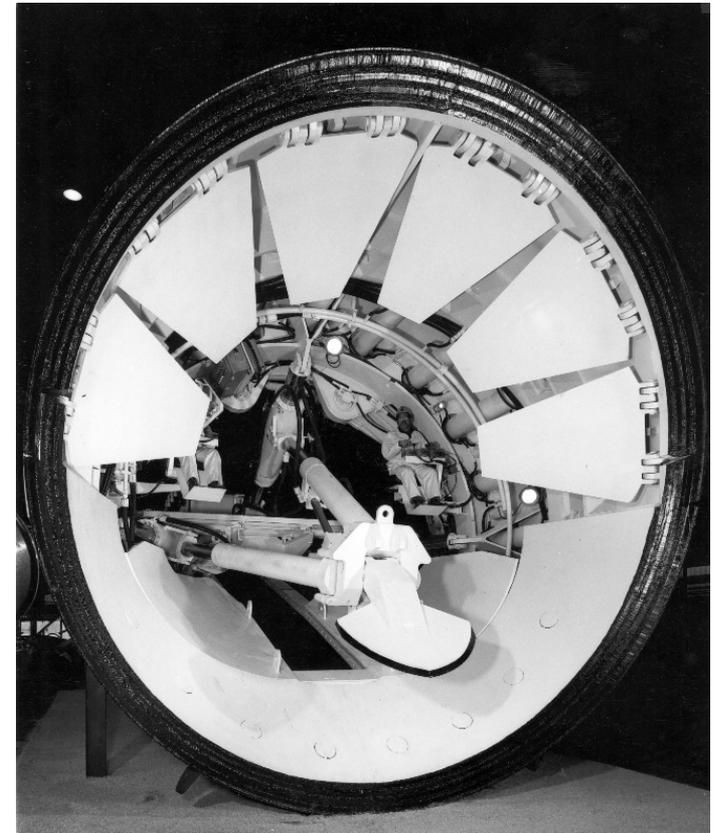
$$n = \frac{P_g - P_a}{c}$$

TIPOLOGÍA	ÚTIL DE EXCAVACIÓN	ESTABILIZACIÓN DEL FRENTE	EXTRACCIÓN DE ESCOMBROS	DOVELAS	SECCIÓN
CABEZA ABIERTA	Manual (martillo, etc.)	Exclusivamente de tipo «pasivo» (Máquina parada)	Cinta transportadora	Expandidas, ordinarias inyectadas o atornilladas inyectadas	Circular, herradura o rentangular
	Semimecanizado (cuchara, rozadora, martillo pesado...)				
	Mecanizado (rueda)				
CABEZA CERRADA	Mecanizados (rueda sin presión)	Cierre mecánico activo	–	Dovelas atornilladas e inyectadas	Circular
	Presurizados	Mediante aire comprimido	Tornillo		
		EPB			
		Hidroescudo	Transporte por tubería		

Tipologías de escudos

ESCUDOS ABIERTOS

Los **escudos abiertos** se aplicarán por tanto con frentes estables y afluencias reducidas de agua, por trabajarse con terrenos impermeables o sobre freático. El elemento excavador suele ser **manual, o presentar un brazo excavador o rozador**, siendo frecuente recurrir a paneles de rejillas o elementos que contribuyan a garantizar la estabilidad del frente en tanto se realice cada ciclo de avance. En este grupo suelen incluirse igualmente los escudos mecanizados de **cabeza giratoria** dotada de picos, rascadores o otros elementos de corte, como por ejemplo discos para roca. Son máquinas de relativa sencillez, que se adaptan bien a terrenos de condiciones variables si éstas no son excesivamente difíciles. A excepción de los escudos de rueda, podrá trabajarse con secciones ajenas a la circular. Son aptos para la excavación de suelos y rocas blandas (**hasta 5 MPa**) de resistencia a compresión, sin permitir contrarrestar la presión del frente.



«Tunnel-boring machine, 1987». King County, WA.

<https://www.flickr.com/photos/kingcounty/>

<https://flic.kr/p/dSorX7>

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>

Escudos

Tipologías de escudos

ESCUDOS CERRADOS

Los escudos cerrados se aplican al trabajo en terrenos inestables, no cohesivos o saturados de agua. La sección generada es exclusivamente circular, y se deberán aplicar dovelas de hormigón que sean atornilladas entre sí, garantizando la impermeabilidad.

Existen varios tipos fundamentales: **mecanizados de rueda con cierre mecánico**, **presurizados mediante aire comprimido**, **hidroescudos**, y **escudos de presión de tierras**. Existen igualmente escudos específicos para el trabajo en roca, con discos cortadores dispuestos en la cabeza, y cilindros axiales.

ESCUDOS MECANIZADOS

Los escudos mecanizados presentan **compuertas de abertura controladas de forma hidráulica, que pueden cerrarse totalmente, sellando el túnel**. La **regulación de apertura** modifica la cantidad de material excavado que penetra en la cámara. A la **salida de la cámara** existen **nuevas puertas** que pueden regularse de forma automática, de tal manera que **únicamente se abran cuando en la cámara se supere una determinada presión**, de tal modo que **se controlará de forma precisa el flujo de material que se evacuará mediante una cinta transportadora ordinaria**. Si bien trabaja de forma similar a como se verá que lo hacen los escudos de presión de tierras, son patentes las limitaciones para el trabajo con presencia de agua.

Escudos

Tipologías de escudos

ESCUDOS CERRADOS

ESCUDOS PRESURIZADOS

Los escudos presurizados con aire comprimido en la actualidad se encuentran **prácticamente abandonados**. Solían aplicarse para **presurizar totalmente túneles constituidos bajo niveles freáticos de no gran importancia (entre 0,1 y 0,2 Mpa)**, de tal modo que **la presión existente entre la exclusiva de acceso y el frente del túnel superase levemente la carga asociada al conjunto agua-terreno**. Permitían el empleo de escudos simples en el frente o escudos de rueda abierta, ya que únicamente se requería que el terreno presentase baja permeabilidad al paso del aire, pero **cualquier pérdida de aire podía implicar un desastre de enormes dimensiones, motivo el cual se ha abandonado**. Otro factor a considerar eran los requisitos de descompresión para el personal y el número máximo de horas de trabajo, cuyos requisitos dificultarían su aplicación para garantizar los niveles de sobrepresión que determinados túneles actuales requieren. Es por todo ello que **en la actualidad se busca controlar la presión de la cámara**, permitiendo el trabajo en el resto del túnel con condiciones ordinarias de presión.

Tipologías de escudos

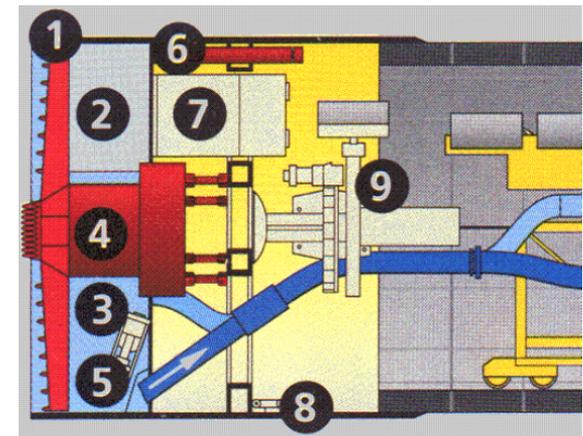
ESCUDOS CERRADOS

HIDROESCUDOS

Los **hidroescudos**, también conocidos como escudos de bentonita, **hydroshield** o **Slurry Shield**, emplena **lodos tixiotrópicos para garantizar la estabilidad del frente**, haciéndolos equipos adecuados para el trabajo en terrenos constituidos por **arenas, gravas, y otros materiales blandos que se encuentren sometidos a presión de agua**, ya que la **inyección** de los lodos **estabiliza** el terreno y **facilita el bombeo** del producto de excavación. Para granulometrías comprendidas entre los **0,1 y los 60 mm resultan particularmente adecuados**, a que permiten recuperar la bentonita (esta se ve dificultada con el incremento en las proporciones de arcillas y limos) y simplifican el transporte hidráulico. Se puede afirmar por tanto que el porcentaje de **finos**, considerando como tal el pasante del tamiz 200 (0,074 mm de luz de malla) **supera el 20%**, la solución es **inaceptable económicamente** por la dificultad de separarlas de la bentonita. La incorporación de una trituradora (**crunching mole**) en la cabeza puede contribuir a simplificar el desalajo de tamaños mayores.

Fuentes: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

Estefanía Puebla, S. (2002): «Caracterización Geomecánica en los proyectos de excavación de túneles con máquinas integrales». Ingeotúneles, Vol. 5. Madrid: Proyectos UD. ETSIMM.



Esquema del hidroescudo. Fuente: «Use of Underground Space. 5- Basics of various kinds of Tunnels». Bachelor Civiele Techniek.
<http://ocw.tudelft.nl/courses/bachelor-civiele-techniek/use-of-underground-space/lectures/5-basics-of-various-kind-of-tunnels>
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

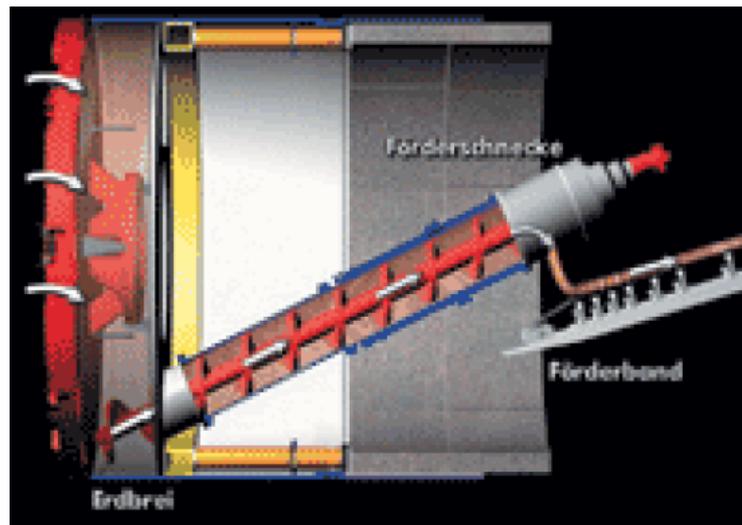
Tipologías de escudos

ESCUDOS CERRADOS

ESCUDOS DE PRESIÓN DE TIERRAS

Los escudos de presión de tierras (EPB, Earth Pressure Balanced) constituyen la **tecnología predominante y se aplican a la práctica totalidad de terrenos que puedan caracterizarse por su inestabilidad**, conjugando aspectos procedentes tanto de los hidroescudos (la idea de **sostener mediante el equilibrio de presión del terreno** más el agua con la presión de la cámara), como de los escudos de rueda presurizados mediante aire comprimido (**evacuación** del escombro en estado similar al **sólido por tornillo sin fin** en la salida de la cámara, y mediante cinta en la zona externa a ésta). Los EPBs pueden funcionar igualmente **en modo abierto**. Trabajando en modo abierto, el rendimiento podría ascender a 17 m/día, mientras que en el caso de trabajar en presión, se reduciría a los 10 m/día.

Fuentes: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.
Estefanía Puebla, S. (2002): «Caracterización Geomecánica en los proyectos de excavación de túneles con máquinas integrales». Ingeotúneles, Vol. 5. Madrid: Proyectos UD. ETSIMM.



Esquema del EPB. Fuente: «Use of Underground Space. 5 - Basics of various kinds of Tunnels». Bachelor Civiele Techniek.
<http://ocw.tudelft.nl/courses/bachelor-civiele-techniek/use-of-underground-space/lectures/5-basics-of-various-kind-of-tunnels>.
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>.

<https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/epb-shield.html>

http://www.fccco.es/construccion/wcm/idc/groups/public/documents/document/mdaw/mdey/~edisp/ucm_056816.pdf

Tipologías de escudos

ESCUDOS CERRADOS

ESCUDOS DE PRESIÓN DE TIERRAS

El escombros pasa a una cámara y se va comprimiendo conforme se llena, y el desalojo de la misma se produce de forma controlada para evitar modificaciones sustanciales en la presión preestablecida de la cámara (determinada en base al tipo de terreno y la carga de agua, pudiendo ajustarse conforme se vayan modificando éstas según los valores proporcionados por los detectores de presión dispuestos en cabeza, cámara y tornillo), a través de un tornillo sin fin. Si se trabaja en terrenos de baja plasticidad, se requiere disponer de una mezcla basada en la aplicación de polímeros que deberán interactuar con el material excavado y el agua, caracterizada tanto por su plasticidad como por su viscosidad que impermeabilice y permita transmitir de forma adecuada la presión a la totalidad de la sección del túnel, permitiendo además que el tornillo desaloje los escombros. Si se requiere modificación sustancial de las propiedades en el interior de la cámara, podrá plantearse la introducción de aditivos igualmente en ella.



«Perforación del túnel de Montcada i Reixac (Barcelona)».
Ministerio de Fomento.
<https://flic.kr/p/arcylo>.
<https://www.flickr.com/photos/fomentogob>.

Fuentes: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.
Estefanía Puebla, S. (2002): «Caracterización Geomecánica en los proyectos de excavación de túneles con máquinas integrales». Ingeotúneles, Vol. 5. Madrid: Proyectos UD. ETSIMM.

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

DOBLES ESCUDOS

Constituido **en base a un escudo telescópico** articulado de dos piezas, que proporciona un sostenimiento continuo del terreno durante el avance, de forma similar al escudo, pero que permite en el caso de que se presente terreno más competente la utilización de grippers laterales que permita simultanear las fases de excavación y colocación del sostenimiento, con lo que se incrementarán de forma notable los rendimientos. Por dicha constitución su longitud viene a ser el doble de cualquier a de los escudos anteriormente señalados a igual diámetro, al igual que sucede con su coste con respecto a un escudo convencional, mayor aún todavía con respecto a un topo. Permiten trabajar en terrenos de naturaleza diversa y que presenten características propias de los ámbitos de aplicación tanto de los topos, como de los escudos. Está conformado por cabeza de corte, escudo delantero, escudo trasero y sistema de empuje, siendo más largo que los equipos de tipo convencional. Ha de tenerse en cuenta que, dado su empleo en terrenos heterogéneos, por lo general terrenos montañosos con recubrimiento importante, la máquina ha de afrontar como principal riesgo el poder quedar atrapada.

Fuentes: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

<https://www.youtube.com/watch?v=jOmlh1B2ReE>

<https://www.herrenknecht.com/en/products/core-products/tunnelling/double-shield-tbm.html>

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

DOBLES ESCUDOS

El diseño de la cabeza de corte está condicionado por las características geológicas de los terrenos a excavar, pudiendo ser más abierta o cerrada en función de sus condiciones. Por lo general presentarán tanto **discos como picas**, permitiendo además si incluyen **cortadores de gálibo incrementar la sección de excavación en unos 10 cm**, útil en caso de requerirse atravesar terrenos expansivos. La cabeza presenta además cangilones para el transporte del material excavado hasta cintas de extracción. El accionamiento de la cabeza podrá ser electrohidráulico (velocidad variable y reversible), o eléctrico (con variación de velocidad por regulación de la frecuencia). La reversibilidad de giro permite liberar la cabeza en terrenos que sean homogéneos o presenten bolos, si bien la extracción de escombros se produce en una única dirección.

El escudo delantero soporta la cabeza de corte y contiene el rodamiento principal, la corona de accionamiento y los sellos, además de zapatas estabilizadoras destinadas a asegurar la máquina durante el ciclo de perforación, que incrementan la fuerza de anclaje durante el avance de los grippers principales.

El escudo trasero o de anclaje incorpora las zapatas de los grippers. Si extremo delantero se proyecta adelante en una carcasa sujeta al escudo delantero, actuando de forma telescópica y proporcionando un sostenimiento del terreno continuo. La parte posterior incorpora el erector de dovelas y los cilindros auxiliares para el empuje, que son similares a los de un escudo convencional.

Fuentes: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

Estefanía Puebla, S. (2002): «Caracterización Geomecánica en los proyectos de excavación de túneles con máquinas integrales». Ingeotúneles, Vol. 5. Madrid: Proyectos UD. ETSIMM.

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

DOBLES ESCUDOS

El sistema principal de empuje contempla un conjunto de cilindros ubicados alrededor de la zona telescópica, anclados entre la parte trasera del escudo delantero y la parte delantera del escudo de anclaje, proporcionando tanto el empuje durante la perforación, como el control de la dirección de la máquina.

En terrenos que permitan el empleo de los grippers laterales, la máquina avanza con el empuje de los cilindros principales. La máquina podrá prescindir incluso del revestimiento de dovelas, por la reacción de las zapatas sobre el terreno. Si se aplican las dovelas prefabricadas, podrá simultanearse las fases de excavación y colocación de las dovelas, ya que el cambio de anclaje se consigue mediante la retracción de los cilindros principales y la extensión de los auxiliares.

Si se trabaja en terrenos de baja consistencia, el avance se realiza mediante el empuje de los cilindros auxiliares, que avanzarán contra el revestimiento.

Fuentes: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

Estefanía Puebla, S. (2002): «Caracterización Geomecánica en los proyectos de excavación de túneles con máquinas integrales». Ingeotúneles, Vol. 5. Madrid: Proyectos UD. ETSIMM.

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

DOBLES ESCUDOS

El doble escudo se introdujo a mediados de los años 70, con el fin de mejorar los rendimientos proporcionados por las tuneladoras hasta la fecha. Durante un periodo de 15 años su diseño no experimentó ningún cambio, alcanzando buenos rendimientos en numerosos proyectos a nivel mundial, si bien se detectaron una serie de problemas, como el colapso del frente, que condicionaría la generación de cavernas sobre la tuneladora y el frente, los atrapamientos de la máquina, o los atascos por acúmulo de materiales en la junta telescópica. Dichos problemas se solucionaron mediante la inserción de los cortadores de gálibo, la inserción de ventanas de limpieza en el escudo telescópico, un menor diámetro del escudo trasero con respecto al delantero para mejorar la respuesta en terrenos fluyentes, o el incremento del empuje de los cilindros actuales para evitar que el escudo trasero pudiera verse atrapado. Surgió de esta manera la segunda generación de equipos, aplicados por primera vez en España en el año 96.

Fuente: Fernández González, E., Gütter, W. & Romualdi, P.: «El doble escudo de la nueva generación». En Ingeotúneles, Vol. 7. López Jimeno, C. (Ed). Madrid: Madrid: U.D. Proyectos - ETSIMM. 20067 pp. 167-184.

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

DOBLES ESCUDOS

Las mejoras actuales **incrementan la versatilidad de los equipos**, permitiendo modificar tanto el par (zonas de falla o rocas blandas), como el empuje (avance en rocas de mayor dureza) de diseños ya existentes, e incluyendo la posibilidad de permitir la realización de sondeos de exploración del frente o la aplicación de técnicas de tratamiento de mejora desde la propia tuneladora, para lograr superar zonas conflictivas. Considerando el modelo aplicado en los túneles de Abdalajis, **es posible realizar sondeos de investigación de entre 100 y 120 metros de longitud, con un ángulo de 8°, y cubrir zonas de tratamiento de sección comprendida entre 1,5 y 2 veces el diámetro**. Es posible ejecutar hasta 37 taladros para la ejecución de paraguas de protección, estando las guías para su ejecución en el escudo telescópico. Permiten igualmente alcanzar avances de 2,5 anillos por hora (3,75 m/h), con puntas de producción de 6.

Fuente: Fernández González, E., Gütter, W. & Romualdi, P.: «El doble escudo de la nueva generación». En Ingeotúneles, Vol. 7. López Jimeno, C. (Ed). Madrid: Madrid: U.D. Proyectos - ETSIMM. 20067 pp. 167-184.

Info Túnel Abdalajis:

http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/doc/tunelabdalajis.pdf.

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

ESCUDOS ESPECIALES

Existen igualmente los denominados «Escudos especiales», como por ejemplo los de cabezas múltiples en el frente (**Multicircularface**), con **dos o más cabezas cortadoras solapadas**, que recurren a sistemas de estabilización del frente y extracción de materiales propios de EPBs o hidroescudos. Surgieron en Japón, a partir de la necesidad de ajustar la sección excavada a la útil. En el caso de los **escudos dobles** las cabezas podrán estar incluidas en un mismo plano vertical o en dos distintos. En el primer caso los elementos de corte tendrán forma de estrella y su rotación no será independiente. En el segundo, presentarán rascadores, y podrán presentar cámaras de amasado comunes o independientes.

Los escudos triples por su parte presentan tres cabezas con corte circular independiente, siendo por lo general las cabezas laterales distintas en tamaño a la central, y la posición relativa podrá ser adelantada de los primeros con respecto al segundo, o viceversa. En aquellos en los que el escudo o cabeza central esté adelantado, los discos cortadores de las cabezas laterales podrán girar 360° , o bien 180° dextrógiros y 180° levógiros. Este tipo de escudos presentan ventajas como el menor uso de espacio con respecto a escudos convencionales, ahorro en costes con respecto al planteamiento de varios escudos en paralelo, se requerirá sólo una planta de lodos y el almacenamiento de dovelas resultará igualmente más simple en cuanto a requisitos de espacio, o la reducción del tiempo de ejecución de obra.

Escudos

Tipologías de escudos

VARIANTES PARTICULARES

ESCUDOS ESPECIALES

Existen igualmente escudos menos extendidos que los anteriormente señalados, para la ejecución de túneles con secciones distintas (**escudos «padre e hijo»**, incluso aplicables para la generación de túneles transversales), o para secciones distintas a la circular (escudos de sección elíptica, o método **DPLEX, Developing Parallel Link Excavating Shield**, que permite en su fundamento desarrollar secciones tipo rectangular, ovalada, etc.; o como por ejemplo el **MMB, Micro-Multi-Box**, que permite desarrollar varios túneles menores de sección rectangular, que posteriormente puedan unirse posteriormente). Otros por su parte permiten la **ejecución de pozos y túneles con un mismo equipo**: al alcanzar el escudo principal vertical la profundidad requerida, un **subescudo** comienza a excavar un túnel horizontal.

Fuente: Morrás Ruiz Falcó, L.: «Escudos especiales para la excavación mecánica de túneles en terrenos blandos». Ingeotúneles, Vol. 3.

DPLEX Method:

<http://www.shield-method.gr.jp/eng/dplex/index.html>

Tipologías de escudos

CONDICIONES PARA SU SELECCIÓN

TIPO DE EQUIPO	CONDICIONES DE EMPLEO
Escudo abierto	Trazado sobre el freático o con materiales impermeables
	Frente estable
	No existe limitación drástica de asientos
EPBs	Sin limitación por condicionantes geotécnicos
Hidroescudos	Trabajan siempre a presión, debiendo tener en cuenta que el porcentaje pasante por el tamiz 200 sea inferior al 20%.
Mixtos *	Combinación de las condiciones de uso de EPBs e hidroescudos

* Existen igualmente los denominados Escudos Mixtos, o mixshields, que presentan características de los dos Hidroescudos y los EPBs. Generalmente los escudos mixtos de gran tamaño, con diámetro superior a los 14 m de diámetro, suelen funcionar principalmente como hidroescudos, ya que funcionando como EPBs con dichos diámetros grandes el peso del material contenido en la cámara puede dificultar el giro.