

# Seguridad en trabajos con tuneladoras (I)

*Safety works in tunnel boring machines (tbm) (I)*  
*Securité en travail avec tunnelier (I)*

## Redactores:

José M<sup>a</sup> Tamborero del Pino  
*Ingeniero Industrial*

CENTRO NACIONAL DE CONDICIONES  
DE TRABAJO

David Quílez Puig  
*Geólogo*

ACCIONA INGENIERÍA

*Esta NTP es la primera de dos dedicadas a la seguridad en trabajos con tuneladoras. Trata de la maquinaria, el proceso constructivo de la excavación de un túnel y describe los riesgos y factores de riesgo asociados. Se complementa con un glosario de términos utilizados.*

Vigencia	Actualizada	Observaciones
VÁLIDA		

## 1. INTRODUCCIÓN

La excavación de túneles para la construcción de vías de comunicación y suministro de servicios es una solución cada vez más empleada por su escaso impacto paisajístico, aprovechamiento del espacio en núcleos urbanos y acortamiento de los trazados. Además, y teniendo en cuenta la complejidad técnica de la ejecución de túneles y su longitud y profundidad, el uso de tuneladoras permite mejorar los rendimientos técnicos y la seguridad de los trabajadores que participan en la obra.

Bajo la denominación de tuneladora se agrupan distintos modelos de maquinaria que dan respuesta al gran abanico de situaciones o escenarios posibles, derivados de la variabilidad geológica del subsuelo. El estudio detallado de este subsuelo antes de iniciar la perforación es de vital importancia para la elección del tipo de tuneladora y de los métodos auxiliares a aplicar.

En esta NTP se indican de forma general la tecnología que incorpora estas máquinas así como los procedimientos a emplear para controlar la exposición a los riesgos laborales que supone la excavación de un túnel.

## 2. MAQUINARIA Y PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA EXCAVACIÓN DE UN TÚNEL

La ejecución de un túnel reviste gran complejidad técnica por el tipo de maquinaria utilizada y por el medio en que se realiza, a menudo con importantes incertidumbres geológicas, y con riesgo de dañar estructuras y servicios que se hallan en superficie. Aunque no siempre es posible utilizar tuneladoras, por el tipo de materiales a excavar, longitud del túnel o disponibilidad y coste de la maquinaria, en términos generales suponen una mejora de la seguridad frente a los sistemas convencionales de excavación de túneles.

La tuneladora consiste básicamente en un gran disco

frontal de perforación de sección igual a la de la excavación, sobre el que se montan los útiles de corte y excavación del terreno (discos, picas, cuchillas u otros). En el espacio entre estos se dejan unos huecos para que, al mismo tiempo que se hace girar el disco frontal sobre su eje a la vez que se le empuja contra el terreno, penetre hacia el interior de la tuneladora el suelo excavado en el frente.

El avance de la tuneladora se logra gracias al empuje que ejercen una serie de potentes cilindros hidráulicos contra la cabeza de la tuneladora que a su vez reaccionan contra los hastiales del túnel, mediante unas zapatas apoyadas.

El conjunto finaliza con el tren de apoyo, que está constituido por una serie de plataformas que se mueven arrastradas por la máquina simultáneamente a su avance. Aquí se incorporan los transformadores, cables, ventiladores, bombas de inyección de mortero, el sistema de evacuación de escombros, y el resto de instalaciones auxiliares para el funcionamiento de la máquina, así como los servicios y medios de protección de los trabajadores. El tren de apoyo puede alcanzar varios centenares de metros.

En la figura 1 se ilustra una tuneladora en fase de excavación

Las tuneladoras se clasifican en tres tipos básicos:

- Tuneladoras para excavar roca.
- Tuneladoras para excavar suelos.
- Tuneladoras mixtas (roca y suelos).

En el primer grupo se pueden encontrar las de topo abierto, las de simple escudo y las de doble escudo. En el segundo grupo se encuentran los hidroescudos y los escudos de presión de tierras (designados habitualmente, estos últimos, por las siglas de su nombre en inglés: EPB *Earth Pressure Balance*).

Las tuneladoras mixtas participan de las características de los dos primeros tipos y resultan máquinas más versátiles pero de mayor coste económico.

Las tuneladoras abiertas (topo), sin escudos, presentan la misma problemática que los métodos por voladu-

ras o excavación con maquinaria convencional, es decir, la colocación del sostenimiento una vez se ha retirado el escombro, dejando esta parte del túnel desprotegida. Son utilizadas para terrenos rocosos de frente estable. En la figura 2 se muestra el esquema de una máquina de este tipo.

La ventaja de usar máquinas de escudo (simple o doble) es que ejecutan el sostenimiento del túnel con la colocación de las dovelas, quedando protegida la zona de la cabeza de la tuneladora con el escudo. En la figura 3 se puede ver un esquema de funcionamiento de la cabeza de una tuneladora de escudo con presión de tierras.

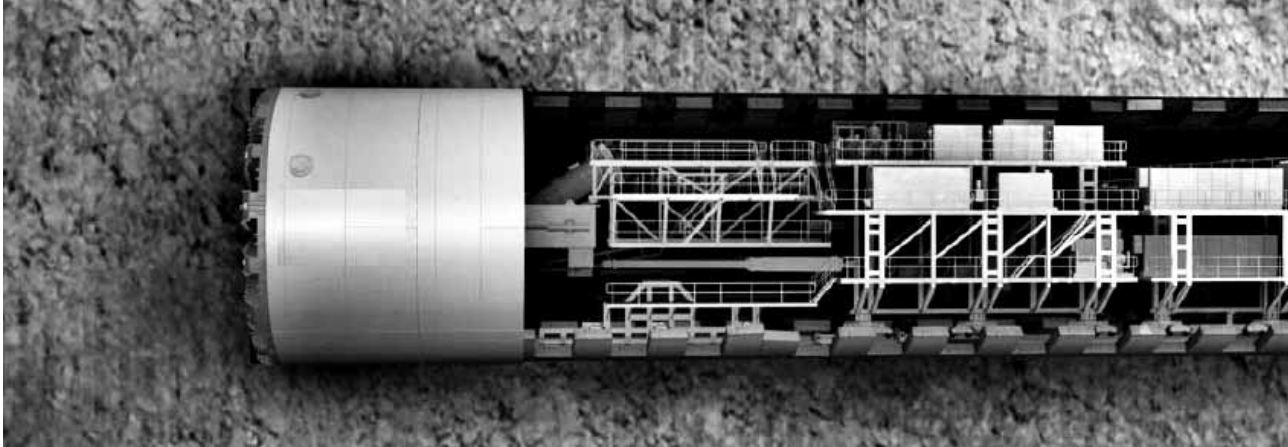


Figura 1. Sección de terreno donde se observa una tuneladora excavando. Se puede ver el disco de corte y la cabeza con el escudo que impide que el terreno ceda antes de colocar el sostenimiento. A continuación se observa el tren de apoyo que es arrastrado por la cabeza durante el avance, protegido, éste, por el sostenimiento del túnel en caso necesario.

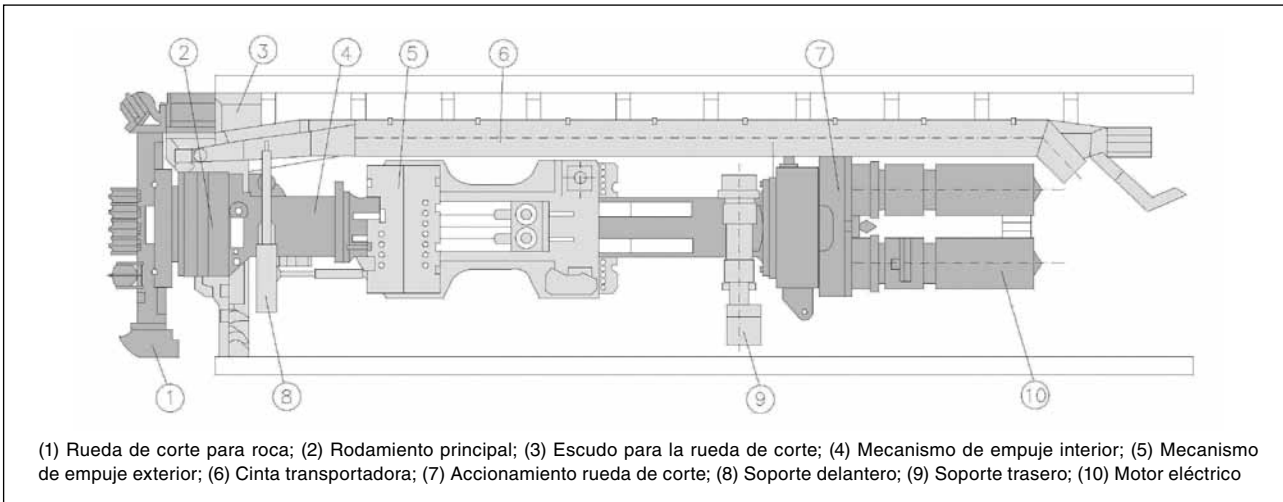


Figura 2. Esquema de una tuneladora abierta (topo)

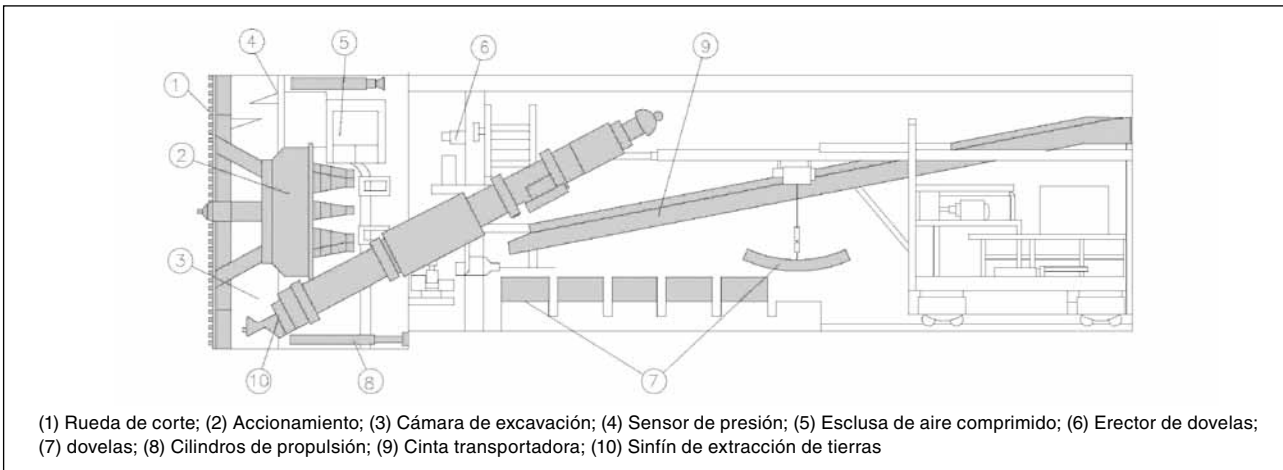


Figura 3. Esquema de la cabeza de la tuneladora de escudo con presión de tierras con el sistema de evacuación de tierras

Cada una de las diferentes tuneladoras tiene sus ventajas e inconvenientes, y sólo una buena caracterización geológica, geotécnica e hidrogeológica de los terrenos a excavar teniendo presente los servicios y edificios existentes en superficie, servirá para decidir el tipo de tuneladora a usar y las medidas correctoras del terreno a implementar, para el buen funcionamiento de la máquina escogida.

Además de la tuneladora, la maquinaria necesaria para la ejecución, sostenimiento y acabado del túnel, es, básicamente:

- Jumbo/bulonadora: usada para perforar taladros y colocar bulones de sostenimiento.
- Gunitadora y robot de gunitado: usada para proyectar hormigón.
- Camiones: para el transporte de materiales y extracción del material excavado.
- Locomotoras, vagonetas e instalaciones ferroviarias: usadas para el transporte de personal, suministro de materiales pesados y evacuación de material excavado.
- Cintas transportadoras de material excavado.
- Grúas de gran tonelaje para el montaje de las tuneladoras.
- Maquinaria común a cualquier otro tipo de obra de construcción.

### Proceso constructivo

Como se puede comprender, la ejecución de un túnel, por la cantidad y variedad de equipos de trabajo y personal especializado que interviene, requiere un gran conocimiento del medio donde se trabaja y una gran organización durante su ejecución. El proceso constructivo en la ejecución de un túnel, en términos generales, consta de las siguientes fases:

- 1) Ejecución del emboquille.
- 2) Inicio del túnel.
- 3) Excavación del frente, en el caso de tuneladoras, a sección completa.
- 4) Retirada del escombro (camión, vagonetas o cintas transportadoras).
- 5) Colocación del sostenimiento (dovelas, cerchas, gunita, etc.).
- 6) Relleno de la sobreexcavación.
- 7) Colocación del revestimiento (que en algún caso puede no existir y en el caso del sostenimiento con dovelas ya constituye el revestimiento).

Dejar el túnel desprovisto de sostenimiento más tiempo de lo debido expone a riesgos de sepultamiento por derrumbes y caídas de bloques, además de poner en peligro la estabilidad de las edificaciones e infraestructuras superficiales.

### 3. RIESGOS Y FACTORES DE RIESGO EN LA EJECUCIÓN DE TÚNELES CON TUNELADORA

En general, la ejecución de túneles presenta una serie de riesgos que se deben a diversos factores, entre los cuales destaca la naturaleza del subsuelo. Es de vital importancia conocer muy bien las propiedades geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas del terreno, para poder diseñar el método de excavación y el de sostenimiento más adecuado.

Ya se ha dicho que las tuneladoras frente a otras técnicas de excavación ofrecen mayores cotas de seguridad,

no obstante no eliminan todos los riesgos. A continuación se muestra un listado, no exhaustivo, de los riesgos más significativos que se pueden dar en la ejecución de un túnel con tuneladora.

#### Riesgos en la ejecución del emboquille y pozo de ataque

La zona de emboquille por tener, en general, menor recubrimiento de terreno y por lo tanto estar expuesta a mayor meteorización y alteración, la hace especialmente vulnerable y sensible a los desprendimientos y colapsos. Así pues los riesgos que se pueden dar en esta fase de la obra son:

- Sepultamiento por desprendimientos del frente y deslizamiento de laderas.
- Golpes por caída de bloques de rocas.
- Vuelco de maquinaria por circular por terreno irregular.
- Proyecciones en la perforación y excavación de macizos rocosos.
- Caídas a distinto nivel en el frente del talud de emboquille o en el pozo de ataque.

La ejecución de esta parte de la obra es idéntica para cualquier otro tipo de túnel, ya que en esta fase la tuneladora no interviene, debiéndose excavar con métodos convencionales: excavadoras, rozadoras o explosivos,

#### Riesgos en el montaje y desmontaje de la tuneladora

Los riesgos durante el montaje de la tuneladora, tal como se muestra en la figura 4, son los asociados al manejo de grandes cargas lo que puede provocar hundimientos o vuelcos de la maquinaria de elevación de carga debido a fallos en el terreno de apoyo, cimentaciones inadecuadas en las grúas torre o puentes grúa, elevación de cargas que superen la capacidad de la máquina, planificación errónea de la distribución de cargas y de las maniobras a realizar, mala elección de eslingas, cuerdas guía, etc., o falta de comprobación de sistemas y medios auxiliares a emplear. Finalmente, el ensamblado y montaje de las piezas que se realiza básicamente por soldadura y atornillado o bulonado de las diferentes piezas puede comportar los riesgos asociados a esta actividad. Así se pueden dar:

- Caídas a distinto nivel en el acceso al pozo de ataque y desde la maquinaria.
- Vuelco de maquinaria pesada (grúas de gran tonelaje, puente grúa, etc.).

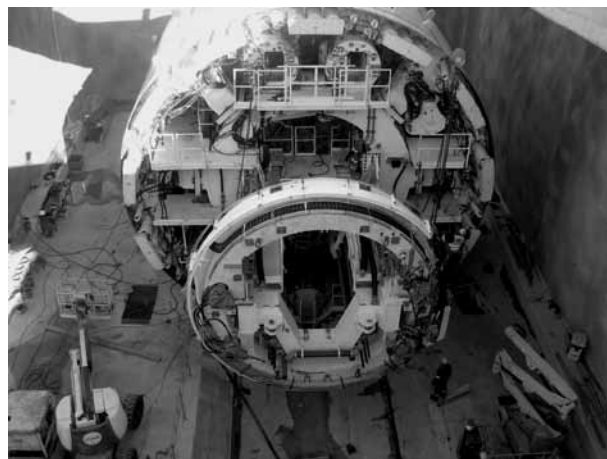


Figura 4. Montaje de una tuneladora

- Desprendimiento de cargas por mal estrobadado.
- Golpes y atrapamientos por mal guiado de la carga suspendida.
- Radiaciones y quemaduras por soldadura.

### Riesgos en la excavación del túnel

La excavación del túnel constituye la actividad principal y de más larga duración. En esta actividad diferenciaremos los riesgos debidos a la propia geología del terreno, y que por desconocimiento de su naturaleza pueden ocasionar accidentes de consecuencias muy graves, los riesgos debidos a la maquinaria e instalaciones de la obra en el túnel, y finalmente los riesgos provocados por las peculiares condiciones del ambiente de trabajo. Se debe tener especial cuidado en los primeros metros de excavación del túnel, ya que la tuneladora necesita contar con un apoyo suficiente para poder ejercer presión contra el frente, pudiendo haber apoyo deficiente de las zapatas por fallo del terreno, lo que puede provocar su hundimiento. También el menor recubrimiento, puede dar lugar a colapsos y desprendimientos.

Así pues, los riesgos que se pueden dar en esta fase, debidos a la geología del terreno, son:

- Ahogamientos por avenidas súbitas de agua (taponazos). El agua embalsada en los acuíferos cársticos, cuarcitas fracturadas o fallas arenizadas, puede irrumper bruscamente en la excavación, provocando lo que se denomina taponazo y la inundación del túnel. Por otro lado el agua genera una mayor inestabilidad geotécnica en el terreno de manera que la probabilidad de fallo en el sostenimiento es superior que en los terrenos secos.
- Sepultamiento por desprendimientos y desmoronamientos del frente, la clave y hastiales del túnel por falta o débil sostenimiento, debido a empeoramiento o falta de estudio de la calidad del terreno o del macizo rocoso.
- Golpes por proyecciones y caída de bloques rocosos desde la clave del túnel.
- Asfixia por falta de oxígeno.
- Explosiones e incendios por presencia de metano.
- Carcinomas por inhalación de radón por exposición prolongada durante la vida laboral en túneles excavados en terrenos graníticos.

Los riesgos que pueden ocurrir por trabajos con maquinaria y en las instalaciones del túnel en esta fase son:

- Caídas a distinto nivel desde máquinas e instalaciones, en su acceso y permanencia.
- Desplome de materiales suspendidos.
- Lesiones musculoesqueléticas por posturas forzadas y manipulación de cargas (sobreesfuerzos).
- Atrapamiento por vuelco de maquinaria.
- Atrapamiento por partes móviles de la maquinaria, en especial cintas de transporte.
- Riesgo eléctrico por deficiente estado y protección de la instalación eléctrica.
- Incendios por sobrecalentamiento de los motores de la maquinaria (locomotoras, camiones, etc.), por presencia de gases inflamables naturales, por operaciones de soldadura, y por una instalación eléctrica deficiente.
- Explosiones e incendios de motores y botellas de gases de soldadura.
- Exposición a vibraciones.
- Exposición a gases de combustión: Intoxicación aguda por monóxido de carbono.
- Atropellos por el desplazamiento de trenes, maquinaria y vehículos en general.

Finalmente, se pueden dar los siguientes riesgos relacionados con el ambiente de trabajo en el interior del túnel durante su ejecución:

- Caídas al mismo nivel por tropiezo con las instalaciones ferroviarias, cables, mangueras tendidas en el suelo.
- Caídas al mismo nivel por resbalar sobre suelo mojado o embarrado debido a la filtración de agua del subsuelo.
- Choques con objetos inmóviles por iluminación deficiente.
- Afecciones pulmonares por ambiente polvoriento (humos de motores, polvo de cemento, repicado de roca, corte de piezas de hormigón, etc.).
- Hipoacusia por ambiente muy ruidoso.
- Accidentes disbáricos y enfermedades decompresivas durante el cambio de las herramientas de corte y reparaciones de las tuneladoras que sostienen el frente de excavación con presión (túneles en suelos): Ambiente hiperbárico.

### Riesgos en el sostenimiento y revestimiento del túnel

Para mantener estable la sección del túnel, este se debe sostener para impedir desprendimientos y colapsos. Si se excava el túnel en macizos de muy buena calidad puede que el sostenimiento no sea necesario, aunque son pocos estos casos. El sostenimiento puede ser ligero para macizos de buena calidad, a base de bulones, mallas de acero y gunitado, o bien más pesados, complementando lo anterior con perfiles metálicos que se ajustan a la sección del túnel y lo sostienen (cerchas). Gracias al empleo de las tuneladoras, el sostenimiento se puede realizar mediante piezas de hormigón armado, que se encajan entre sí formando un anillo continuo. Estas piezas se van colocando durante el avance de la tuneladora mediante los erectores de dovelas, haciendo aumentar mucho el nivel de seguridad. Si el túnel se sostiene con dovelas no hará falta un revestimiento o acabado posterior, para el resto de casos, y dependiendo del uso que vaya a tener el túnel, hará falta que se revista antes de que el túnel pueda entrar en servicio.

Durante las operaciones de sostenimiento con dovelas pueden existir los siguientes riesgos:

- Atrapamiento entre las dovelas y los erectores (en la figura 5 se observa un erector de dovelas sin la pieza).
- Desprendimiento de cargas transportadas por ser piezas pesadas y voluminosas.



Figura 5. Erector de dovelas de una tuneladora de presión de tierras

Para sostenimiento a base de bulones, mallas, cerchas y gunitado, así como para la fase de revestimiento, se pueden dar los riesgos siguientes:

- Sepultamiento por desprendimientos y colapsos de la bóveda o hastiales.
- Golpes por caída de bloques de rocas.
- Proyecciones en la perforación y el gunitado.
- Caídas a distinto nivel desde máquinas e instalaciones, en su acceso y permanencia.
- Desplome de materiales suspendidos.
- Lesiones musculoesqueléticas por posturas forzadas y manipulación de cargas (sobreesfuerzos).

- Atrapamiento por vuelco de maquinaria.
- Riesgo eléctrico por deficiencias en la instalación eléctrica.
- Explosiones e incendios de motores y botellas de gases de soldadura.
- Exposición a vibraciones.
- Asfixia y enfermedades por inhalación de gases de combustión.
- Atropellos por el desplazamiento de trenes, maquinaria y vehículos en general.

## GLOSARIO

**Accidente disbárico:** Lesión originada por la actividad humana en medios ambientales líquidos o gaseosos sometidos a presión ambiental diferente a la atmosférica. Riesgo profesional u ocupacional del buceo o la aviación.

**Alteración:** Cualquier cambio en la composición mineralógica de una roca debido a procesos físicos o químicos.

**Ambiente hiperbárico:** Medio con una alta presión atmosférica, como la que hay bajo el agua.

**Auscultación:** Término utilizado para designar las técnicas empleadas en ingeniería y geotecnia para medir los movimientos en las estructuras enterradas debidos a cambios de las condiciones del terreno.

**Berma:** Rellano en un talud o muro para interrumpir su continuidad y aumentar su seguridad contra deslizamientos o desprendimientos, pueden tener una cuneta para canalizar las aguas de escorrentía y evitar la erosión o degradación del talud inferior.

**Bóveda:** Zona superior del interior del túnel. Obra de fábrica curvada, que sirve para cubrir el espacio comprendido entre dos muros.

**Bulón:** Elemento de sostenimiento consistente en una barra metálica que se instala, anclada, en taladros en las paredes de una excavación.

**Carstificación:** Alteración de las rocas carbonatadas debido a la disolución por las aguas meteóricas cargadas de gas carbónico, formando cuevas y simas.

**Cercha:** Armazón que sostiene un arco.

**Clave:** Dovela central de un arco, o una bóveda. Suele ser de mayores dimensiones que las demás dovelas. La clave, al igual que las dovelas, se sustenta debido a la forma de éstas piezas, pues sus caras laterales, cortadas en ángulo, transmiten lateralmente parte de las tensiones, equilibrándolo, y evitando que se desplomen bajo una carga vertical. La tensión horizontal de la dovela inferior se transmite al muro o a otro arco, y la vertical se transmite al muro. La última pieza que se coloca en la construcción de un arco es la clave.

**Cobertera:** Espesor de terreno que queda entre la parte superior del túnel y la superficie.

**Colapso:** Caída instantánea de una estructura o parte de un macizo por fallo en el terreno de sustentación.

**Coluvial:** Acumulaciones laterales de sedimentos en un valle cuyo recorrido y transporte es reducido.

**Derrumbe:** Caída súbita de bloques rocosos.

**Deslizamiento:** Tipo de corrimiento o movimiento de masa de tierra, provocado por la inestabilidad de un talud. Se produce cuando una gran masa de terreno se convierte en zona inestable y desliza con respecto a una zona estable, a través de una superficie o franja de terreno de pequeño espesor.

**Dovela:** Cada una de las piezas que conforman un anillo de sostenimiento de la sección de un túnel construidas con hormigón armado o pretensado. La tensión horizontal de la dovela inferior se transmite al muro o a otro arco, y la vertical se transmite al muro. La última pieza que se coloca en la construcción de un arco es la clave.

**Estallido de roca:** Fenómeno que se da cuando un macizo rocoso con características rígidas (duro y compacto) es sometido a altas presiones, que al no poder deformarse lo suficiente, comienza paulatinamente a almacenar energía de deformación. Este continuo almacenamiento de energía llega a un punto crítico donde se produce una liberación violenta de energía, originando el estallido de rocas.

**Emboquille:** Boca o entrada del túnel. Intersección entre talud y túnel.

**Falla:** Superficie o superficies con espaciado apretado de una fractura en una roca, a lo largo de la cuál ha habido desplazamiento, que puede variar desde unos pocos milímetros a muchos kilómetros. Un plano de falla es una superficie de falla que normalmente es más o menos plana.

**Fluencia:** Deformación lenta experimentada por un cuerpo sometido a una carga durante un cierto tiempo. A profundidades importantes, cuando se perfora un túnel, rocas con importante contenido en arcillas (pizarras, arcillitas...) o materia orgánica (grafito, carbón) pueden llegar a fluir cerrando la sección de la excavación.

**Fracturación:** Conjunto de roturas de un macizo rocoso formando planos con o sin desplazamiento entre sí.

**Freático/a:** Se dice de la parte del subsuelo saturada de agua, y de esta misma agua.

**Gripper:** Término inglés usado para denominar la zapata de apoyo.

**Gunita:** Hormigón proyectado a chorro sobre una superficie con una manga que transporta el material y lo empuja mediante una bomba de aire comprimido.

**Hastial:** Cara lateral de una excavación.

**Inyección:** Aplicación de mortero, lechada de cemento, bentonita u otro fluido viscoso para sellar juntas, huecos, grietas y conseguir su inmovilización en la excavación del túnel.

**Meteorización:** Término que agrupa todos los procesos por los que la roca y el suelo se alteran bajo la influencia directa de la hidrosfera y de la atmósfera.

**Pase:** Longitud de túnel sin sostenimiento entre dos avances de la máquina tuneladora.

**Revestimiento:** Cubierta de la superficie interior de la sección de un túnel para el acabado final sin función estructural.

**Sepultamiento:** Enterramiento por caída súbita de parte del terreno de una excavación o desprendimiento de bloques rocosos.

**Sobreexcavación:** Vacío dejado entre el escudo de la máquina tuneladora o entre las dovelas de sostenimiento y el terreno, debido al sobre ancho que genera la excavación de la sección del túnel con el disco de la tuneladora.

**Sostenimiento:** Refuerzo que se práctica contra el terreno de la superficie del túnel para evitar su colapso o desmoronamiento.

**Subsidencia:** Hundimiento progresivo, durante un periodo bastante largo, de la superficie de un terreno siendo la componente vertical del desplazamiento claramente predominante sobre la horizontal.

**Zapata de apoyo:** Pieza colocada en las zonas laterales de la máquina tuneladora para soportar contra de la pared del túnel el empuje del disco de excavación frontal y ejercer la fuerza de reacción.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) ORTUÑO, L Y URIEL, P (1998)  
**Emboquille de túneles.**  
*Ingeotúneles, libro 1, capítulo 4. U.D. Proyectos, ETSI Minas- UPM- Madrid.*
- (2) PELÁEZ, M (2005)  
**Seguridad en túneles.**  
*Ingeotúneles, libro 10 capítulo 13. U.D. Proyectos, ETSI Minas- UPM- Madrid.*
- (3) MENDAÑA, F (2006)  
**Riesgos con tuneladoras. Seminario sobre análisis de Riesgos en Túneles. STMR.**  
*Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid.*
- (4) ITIG (2006)  
**A code of practice for risk management of tunnel works.**  
*International Tunnelling Insurance Group.*
- (5) JUSTA, R. (2009)  
**Curso de ejecución de túneles.**  
*Acciona. Madrid.*
- (6) MÁRMOL, L., GALLEGO, R., DELGADO, J. (2008)  
**Curs de formació en prevenció de riscos en treballs hiperbàrics en les obres de túnels mitjançant tuneladores.**  
*Edita Fundació Laboral de la Construcció de Catalunya en col·laboració con la Generalitat de Catalunya.*
- (7) **Formació per a la seguretat en cintes transportadores en explotacions mineres a Catalunya.**  
*Generalitat de Catalunya.*
- (8) **La Arquitectura en la Ampliación de la Red del Metro de Madrid 2003-2007. Análisis preventivo de las principales unidades de obra.**  
*Comunidad de Madrid-Mintra.*
- (9) ESCOBAR, E (2006)  
**La seguridad en tuneladoras.**  
*Revista Trébol, número 41. MAPFRE.*
- (10) SENER (2009)  
**Control de excavación de túneles con tuneladoras de presión de frente. Experiencias de SENER en el Metro de Lisboa, Oporto y Madrid.**  
*Revista Obras Urbanas.*

Fotografías: David Calvet Ruiz  
Dibujos: Gemma Balagué Viladrich

Empresa colaboradora: Acciona Ingeniería – Delegación de Barcelona.

Agradecimientos: ADIF: Dirección de Obra del túnel del tren de alta velocidad en Girona.

UTE IBERINSA-AEPO: Asistencia técnica a la Dirección de Obra del túnel del tren de alta velocidad en Girona.