

Diseño y Ejecución de Obras Subterráneas

Tema 7. Excavación mecánica de túneles



Rubén Pérez Álvarez

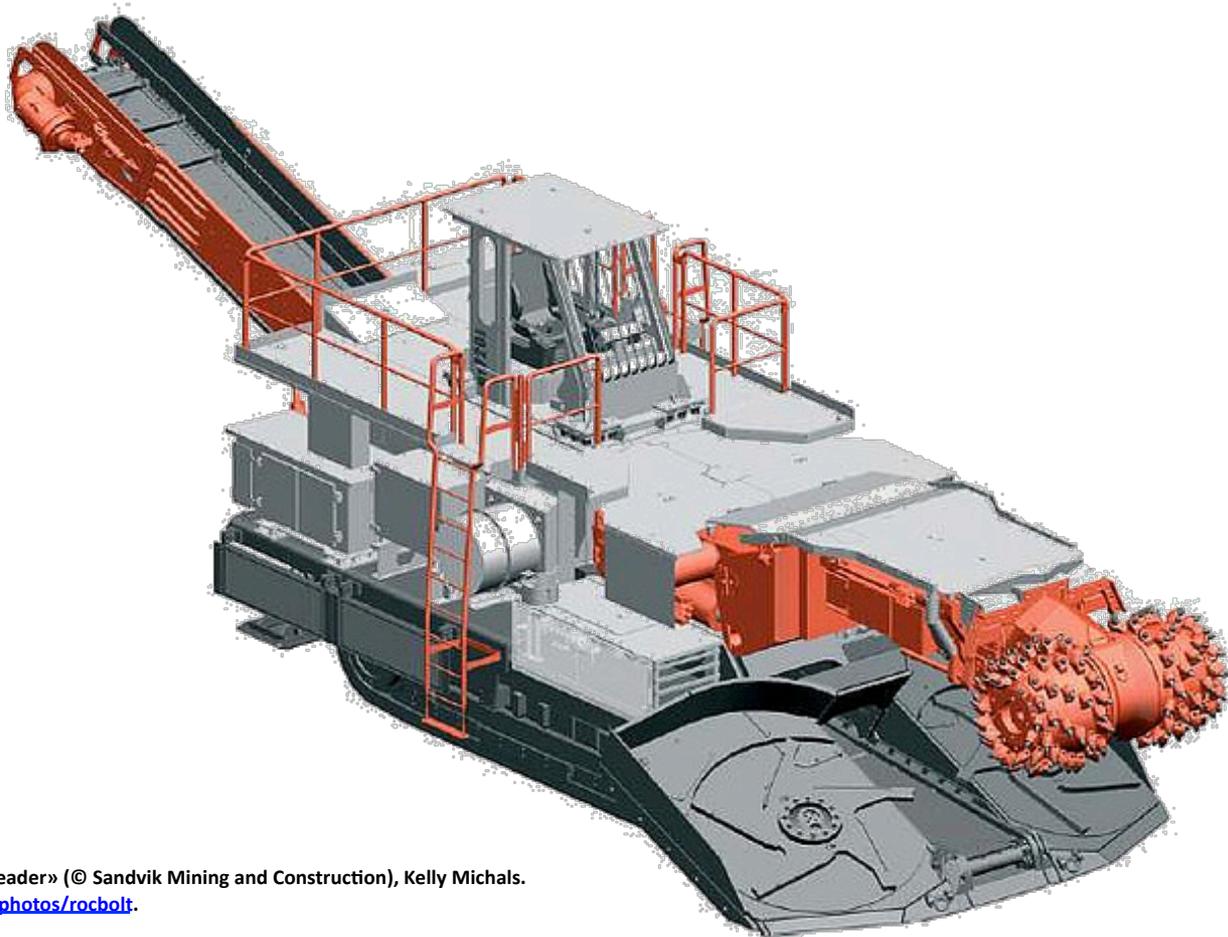
Departamento de Transportes y Tecnología
de Proyectos y Procesos

Este tema se publica bajo Licencia:

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

TEMA 7: EXCAVACIÓN MECÁNICA DE TÚNELES

- 7.1. Introducción.
- 7.2. Rozadoras.
- 7.3. Excavadoras hidráulicas.



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

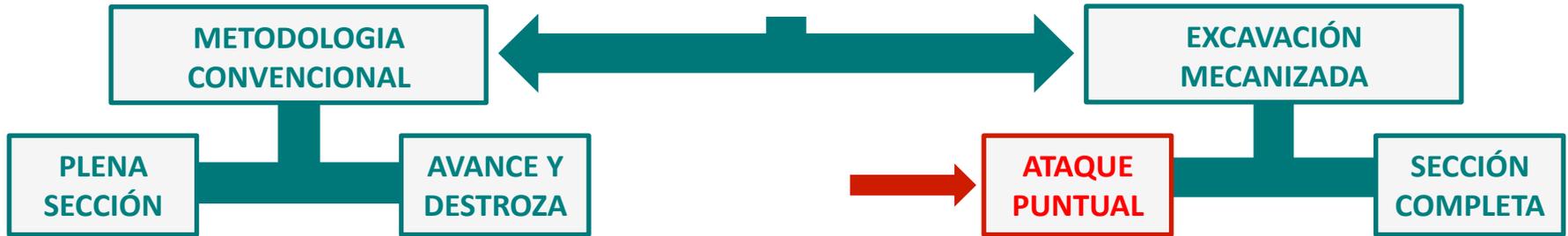
<https://www.flickr.com/photos/rocbolt/>

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

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

Introducción

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/>.

Evolución histórica de los equipos

Las **rozadoras** reciben otras designaciones, tales como **minadores** o **máquinas de ataque puntual**. Las primeras aplicaciones se registraron en **minería de carbón (VER FIGURA)** en la década de los 40, para la preparación de labores y la explotación de las mismas. La evolución tecnológica ha ido incrementando el peso de los equipos, ampliando las posibilidades de uso de los mismos.

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

OBJETO DE SU APARICIÓN

- ❖ Elevar las producciones y rendimientos de corte instantáneos.
- ❖ Arrancar roca dura con márgenes económicos adecuados.
- ❖ Ofrecer versatilidad en las secciones.
- ❖ Posibilitar el avance en galerías y túneles con malas características del techo, o existencia de grandes presiones.

CAMPO DE APLICACIÓN

- ❖ Rocas medias-duras, si existen restricciones ambientales en el uso de explosivos.
- ❖ Rocas medias-blandas en longitudes inferior a 2 km (no interesante avance con equipos a sección completa).
- ❖ **Túneles con secciones variables.**
- ❖ **Longitudes cortas a medias.**
- ❖ **Túneles con avance a sección dividida.**
- ❖ **Túneles que requieran comienzo rápido de excavación.**



Minador continuo. «Soft Rock Bolter Miner for U/G coal mining, Delmas Colliery, Mpumpalanga, South Africa, 2007-08-05». By Na derdingseven (Own work). CC BY-SA 3.0: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>]. Vía Wikimedia Commons: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Bolter_Miner_Delmas_07.jpg.

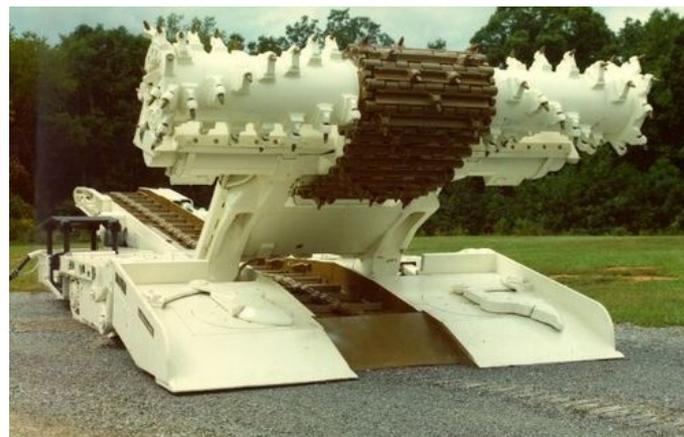
Evolución histórica de los equipos

MINADOR DE TAMBOR: el órgano de corte es un cilindro hz que gira alrededor de un eje paralelo al frente, con una hélice portadora de picas. Arranca en descenso, aplicado en rocas blandas (carbón, potasa, hierro...).

<https://www.youtube.com/watch?v=aaveB9I1ZPM>.



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



MINADOR DE CADENAS: el órgano de corte es cuerpo portador de una serie de cadenas sobre las que se colocan los porta-picas. Se excava en sentido ascendente. Su evolución concluyó hace décadas, por haberse superado sus prestaciones por otros equipos.



Rozadoras

Evolución histórica de los equipos

GENERACIONES

1ª GENERACIÓN

Si bien tradicionalmente se considera que el país de origen de los minadores es **Rusia**, país que dio lugar a los denominados minadores continuos, los primeros equipos dotados de cabeza de corte se emplearon en **Estados Unidos**. La introducción de este tipo de equipos en Europa occidental en la década de 1960, con modelos similares a los rusos, con pesos a partir de **9 toneladas** y posibilidad de excavar rocas de **hasta 40 MPa** de resistencia a compresión simple. **Los equipos iniciales se caracterizaban por posibilitar únicamente un movimiento vertical del brazo**, posibilitando el arranque de mineral estratificado, generando galerías rectangulares, de techo plano. La inserción posterior de movimiento tanto horizontal como vertical del brazo ofreció la posibilidad de generar galerías de sección curva.

2ª GENERACIÓN

Surgida en la década de 1970, con máquinas de entre **22 y 36 toneladas**, planteadas para la generación de galerías en explotaciones de carbón, que bajo condiciones de contenido bajo en Sílice podían trabajar en rocas de hasta **85 MPa**.

3ª GENERACIÓN

La tercera generación, surgida en 1976 con dos tendencias fundamentales: mientras que en Alemania y Austria se buscó incrementar el tamaño, con modelos de hasta **64 toneladas de peso**, en Inglaterra y USA se buscó optimizar la tecnología existente. En ambos casos se consiguió incrementar las posibilidades de trabajo hasta rocas con resistencia a compresión simple de **124 MPa**.

Ventajas de los minadores frente a las máquinas integrales



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

VS



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

- ☛ Ofrecen flexibilidad en cuanto a las secciones que permiten trazar, modificaciones de trazado, planteamiento de excavaciones secundarias perpendiculares a la principal, etc. Estas posibilidades van ligadas a una mayor simplicidad de las maniobras.
- ☛ Sus menores dimensiones facilitan el trabajo en espacios más reducidos que las máquinas de ataque puntual, sin requerir zonas amplias para su montaje/desmontaje.*
- ☛ El acceso al frente para labores de mantenimiento resulta más simple.
- ☛ La ventilación del frente es más simple.

*Son equipos modulares:
https://www.youtube.com/watch?v=3_vrNjm4fa8.

Ventajas de los minadores frente a avance convencional (perforación y voladura)



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

VS



<https://www.flickr.com/photos/mikelo.>
[https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/.](https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/)

- 🛠️ **Admiten un mayor grado de mecanización.**
- 🛠️ **Proporcionan perfilados exactos de la sección de excavación.**
- 🛠️ **Menor afección a los macizos remanentes.**
- 🛠️ **Ausencia de vibraciones.**
- 🛠️ **Menores requisitos de sostenimiento.**

Selección de los minadores y clasificación en función de su rango de trabajo

FACTORES A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DE MINADORES

Geometría de la excavación: limita las dimensiones máximas de las rozadoras. En excavaciones de una sola fase, la máxima altura de corte deberá ser sea igual o mayor que la altura de la sección a excavar.

En excavaciones por fases o a sección partida, las dimensiones vienen determinadas por sección mínima que se excave.

Características de las rocas: el peso y la potencia de una rozadora deben estar correlacionados con la resistencia a compresión de la roca a excavar.

Tamaño y peso adecuados (de la máquina) para vencer las fuerzas de reacción generadas durante el proceso de excavación. El tamaño suele estar limitado al espacio disponible.

Correcta correlación entre el peso del equipo y la potencia de la cabeza cortadora para mantener la estabilidad, dado que la resistencia de la roca demanda una determinada fuerza de corte y, por tanto, una determinada potencia de la cabeza de rozado.

$$P(kW) = 0,87 \cdot RC^{1,18} (MPa)$$

Al aumentar la resistencia de la roca, el rendimiento de corte cae y aumenta el consumo de picas.

$$P(kW) = 2 - 4 \cdot Peso(t)$$

Selección de los minadores y clasificación en función de su rango de trabajo

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

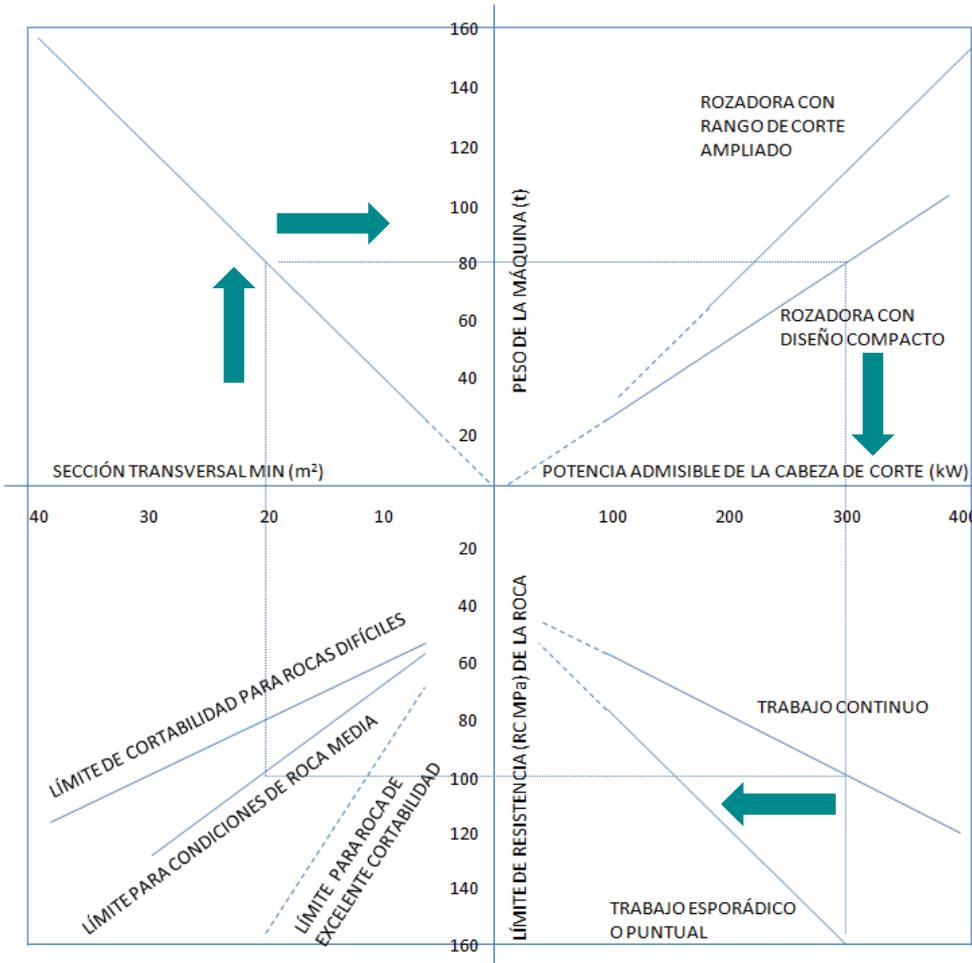
Fuente: Karlheinz Gehring. Tamrock-V.A. Bergtechnik GmbH. En Ingeotúnel, Vol. 2. López Jimeno, C. (Ed.). Madrid: Entorno Gráfico S.L. 1998.

Se ha mencionado la flexibilidad como una de las ventajas de los minadores, pudiendo evaluarse en base a varios parámetros o expresiones, como por ejemplo el índice de flexibilidad, F (relación entre las áreas máxima y mínima de excavación que puede proporcionar el dispositivo), y la eficiencia potencial (los valores habituales en este tipo de equipos están entre 2,36 y 6,22). Este último concepto relaciona el área excavada la que el con las áreas máxima y mínima (ofreciendo los mejores resultados valores de P entre 0,33 y 0,66).

$$F = \frac{\text{Área máxima excavación}}{\text{Área mínima excavación}}$$

$$P = \frac{\text{Área efectiva excavación} - \text{Área mínima excavación}}{\text{Área máxima excavación}}$$

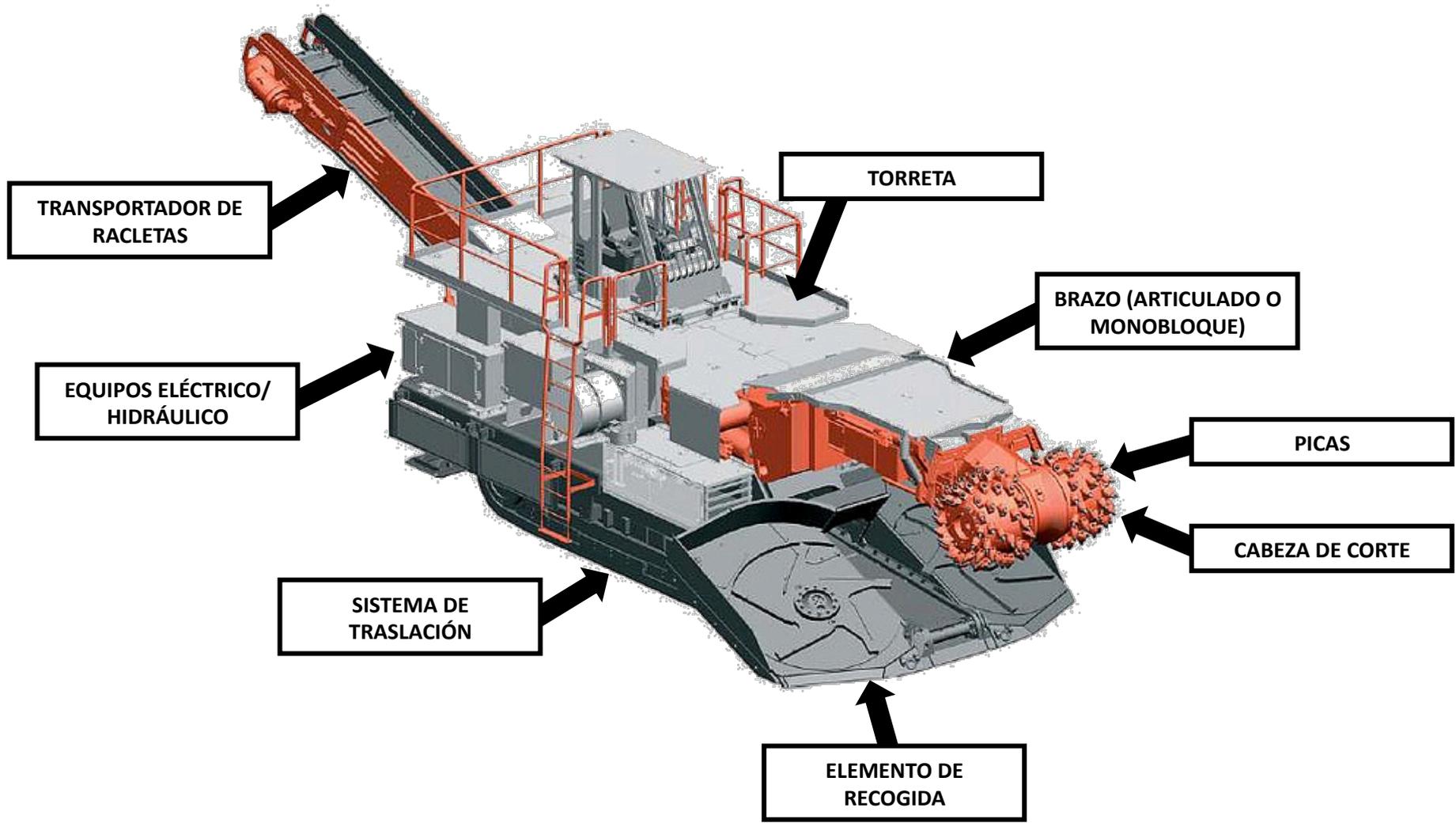
Selección de los minadores y clasificación en función de su rango de trabajo



Relación entre la sección mínima, el peso, la potencia de la cabeza de corte y la resistencia máxima de la roca, conforme al estado tecnológico.

El valor de 160 MPa puede considerarse como un límite en el valor de resistencia a compresión asumible para las rozadoras estándar.

Principales partes a considerar



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

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

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

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

Rozadoras

Principales partes a considerar

FUNCIONES



1. Excavación mediante corte de la roca.



2. Recogida del escombro producido.



3. Transferencia del equipo a equipo secundario de transporte.

«Barrick Meikle Rodeo Mine Production Roadheader», Kelly Michals.

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

<https://flic.kr/p/fA16oe>

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

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

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

Principales partes a considerar

BRAZO

- Unido a la torreta a través de su **base**, posibilitándose los movimientos horizontal (**conseguido por lo general mediante dos cilindros opuestos**) y vertical del mismo (**mediante cilindros de elevación**).
- Dotado de un **motor de corte**, por lo general asíncrono trifásico, acoplado al reductor mediante acoplamientos elásticos o hidráulicos.
- Transmisión mediante engranajes planetarios con piñones de dientes rectos o cónicos.
- Lleva **acoplada la cabeza**, que supone el soporte de las picas, elementos reales de corte.



CILINDRO DE
ELEVACIÓN

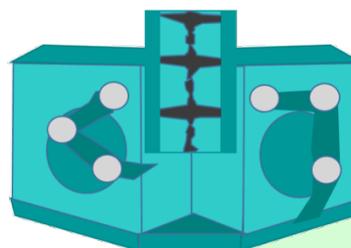
CILINDRO PARA
EL GIRO

Rozadoras

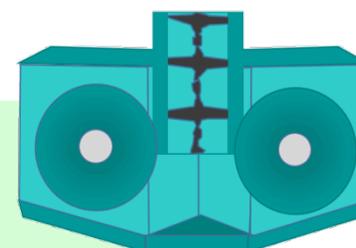
Principales partes a considerar

SISTEMA DE RECOGIDA

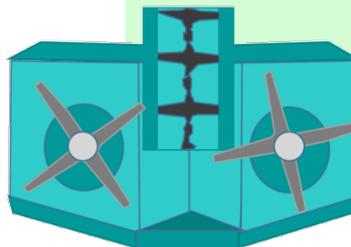
- Brazos recolectores:** el material arrancado una plataforma y es dirigido con brazos al transportador de racletas. Indicado para escombros que contienen muchos bloques gruesos.
- Ruedas recolectoras:** dispositivo de ruedas giratorias con brazos radiales. Al girar en sentido opuesto dirigen el material al transportador.
- Discos giratorios :** Dispositivo con dos discos que al girar en sentido opuesto envían el material desgarrado al transportador.
- Cargador de racletas:** se trata de un dispositivo con uno o dos carruseles continuos de racletas. Para materiales de baja abrasividad y pocos bloques.
- Brazo cortador-cargador:** la propia cabeza cortadora carga el escombro, mediante un transportador de racletas dispuesto a lo largo del brazo de la máquina.



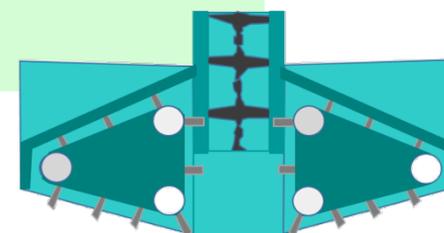
BRAZOS RECOLECTORES



DISCOS GIRATORIOS



RUEDAS RECOLECTORAS



CARGADOR DE RACLETAS

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

Principales partes a considerar

SISTEMA DE RECOGIDA

BRAZOS RECOLECTORES



«Sistema de recogida mediante brazos recolectores».
Por Leon II (Trabajo propio).
CC BY-SA 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>).

RUEDAS RECOLECTORAS

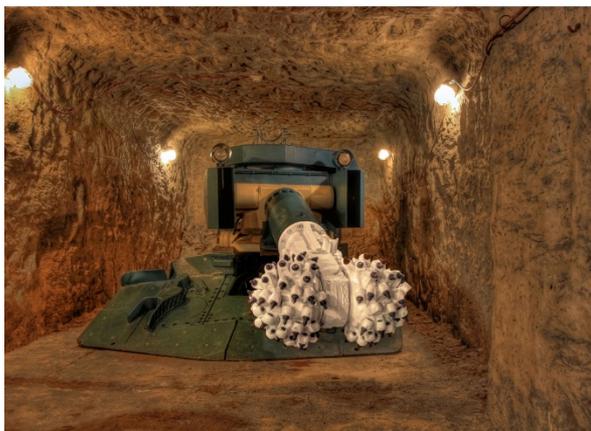


Barrick Meikle Rodeo Mine Production Roadheader-Kelly Michals.
<https://flic.kr/p/fAYdss>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>.

<https://www.youtube.com/watch?v=RfcOG9hZEII>.

Rozadoras

Principales partes a considerar



Bochum - Deutsches Bergbau-Museum - Eisenerzbergwerk
Teilschnittmaschine AM 50- Daniel Mennerich.
<https://www.flickr.com/photos/danielmennerich>.
<https://flic.kr/p/r5emu3>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.



«Close up of Roadheader» - 511 Contra Costa.
<https://www.flickr.com/photos/511cc/>.
<https://flic.kr/p/iqVF8t>.
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/>.

- ☛ Mayor estabilidad a igualdad de peso y potencia (dirección de corte orientada al frente, las fuerzas resultantes se orientan al cuerpo principal de la máquina).
- ☛ Menos sensibles a los cambios de dureza/macizo (alta resistencia o ductilidad).
- ☛ Mayor rendimiento en rocas sedimentarias.

<https://www.youtube.com/watch?v=QvttkyF5im0>

- ☛ Generalmente, menor consumo de picas.
- ☛ Disposición de picas más simple.
- ☛ Si el punto de giro está centrado en el eje de la galería/túnel, puede conseguirse una minimización de la sobreexcavación.

<https://www.youtube.com/watch?v=V-hgbH5cddE>

<https://www.youtube.com/watch?v=bZyWidG2ql0>

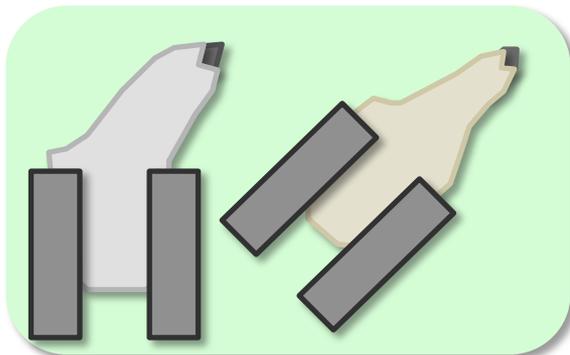
Rozadoras

Principales partes a considerar

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



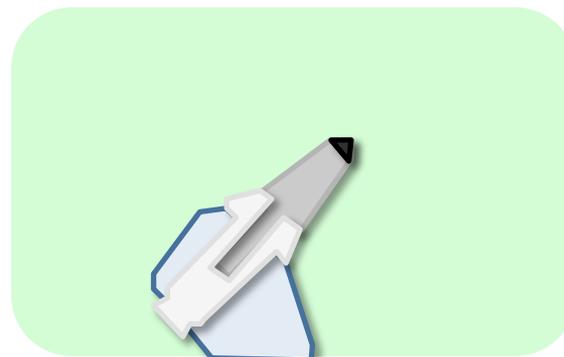
- ☛ Para el arranque de rocas blandas exclusivamente.
- ☛ El filo de corte consiste en una pastilla de widia o carburo de tungsteno.



- ☛ Forma cónicas, para soportar la fricción de la roca, también se denominan picas lapicero/autoafilantes, o picas de ataque puntual.
- ☛ En uso desde 1972, en la actualidad son LAS MÁS EMPLEADAS.
- ☛ Presentan inserto de carburo de tungsteno.
- ☛ Debido a la rotación de la pica sobre su propio eje (debida al vástago o cilindro, que permite su rotación libre y a la disposición de las picas con respecto a la dirección teórica de corte) se alarga la vida de la misma. Las fuerzas asimétricas entre el cono de la pica y la roca provocan su giro, manteniendo además la forma cónica durante la vida útil.
- ☛ Existe una mayor constancia en la interacción roca-pica.

PARTES FUNDAMENTALES

- ☛ **Vástago/Mango de acero:** de forma variable en función del tipo de pica. Se introduce en el bloque portapicas.
- ☛ **Punta:** elemento de metal duro que estará en contacto con la roca.



Colocación de las picas

ÁNGULO DE ATAQUE (A)

Formado por el eje de la pica y el plano que pasa por el vértice de la misma y el eje de la cabeza de corte, medido en el vértice de la pica. Se recomienda un valor de 25° . Es el ángulo más importante para la rotación de la pica cónica, la penetración en la roca y la economía del corte.

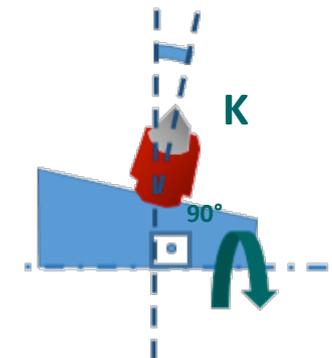
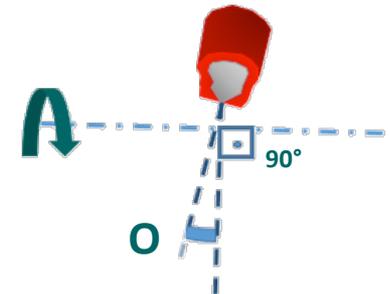
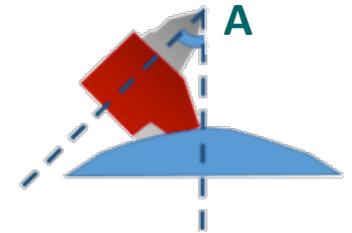
ÁNGULO OBLICUIDAD O SESGO (O)

Formado por un plano que pasa por el eje de la pica, normal a la placa base del portapicacas, y un plano normal al eje de rotación de la cabeza, medido en el vértice de la pica. Debe tener un valor entre 5° y 10° . En combinación con el ángulo de ataque, aumenta la tendencia giratoria de la placa cónica.

ÁNGULO DE BASCULAMIENTO (K)

Formado por un plano que pasa por el eje de la pica, normal a la placa base del portapicacas, y un plano normal al eje de y la dirección de rotación de éste, medido en la línea central de la placa base del portapicacas. Dependerá de la cabeza de corte y la combinación portapicacas/pica.

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



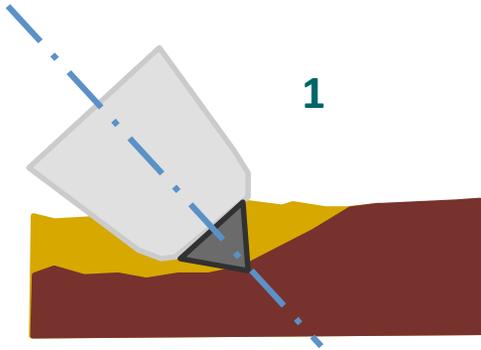
Fases constituyentes del proceso de corte



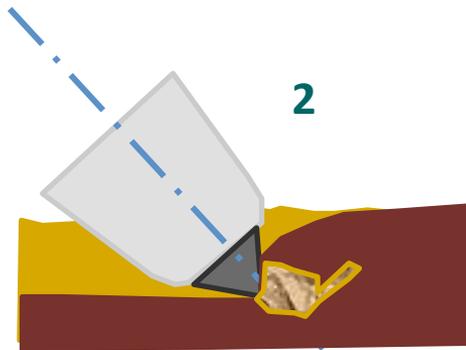
Fuente: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.

Fases constituyentes del proceso de corte

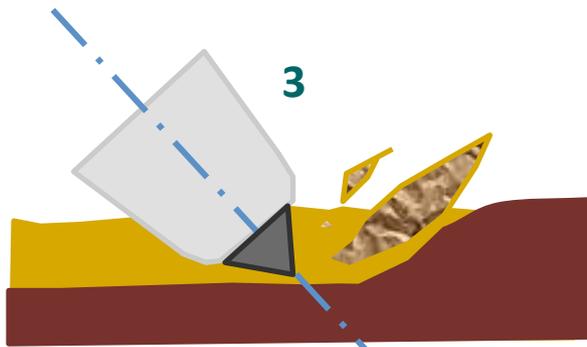
Fuente: López Jimeno, C. (1998): «Manual de Túneles y Obra Subterránea». Móstoles: Entorno Grafico, S.L.



1. CREACIÓN DE ZONA DE CONTACTO ENTRE LA PICA Y LA ROCA.



2. APARICIÓN DE ZONA DE TRITURACIÓN FRENTE A LA PICA. INICIACIÓN DE DE GRIETA.



3. DESPRENDIMIENTO DE FRAGMENTOS DE ROCA.

CONSECUENCIAS DE INCREMENTAR EL ESPACIADO ENTRE PICAS

EN TEORÍA

Reducción de la hendidura de la pica por unidad de volumen de roca arrancada (aumento del rendimiento de corte, disminución de los finos, reducción del consumo específico de picas).

LIMITACIONES EN LA PRÁCTICA

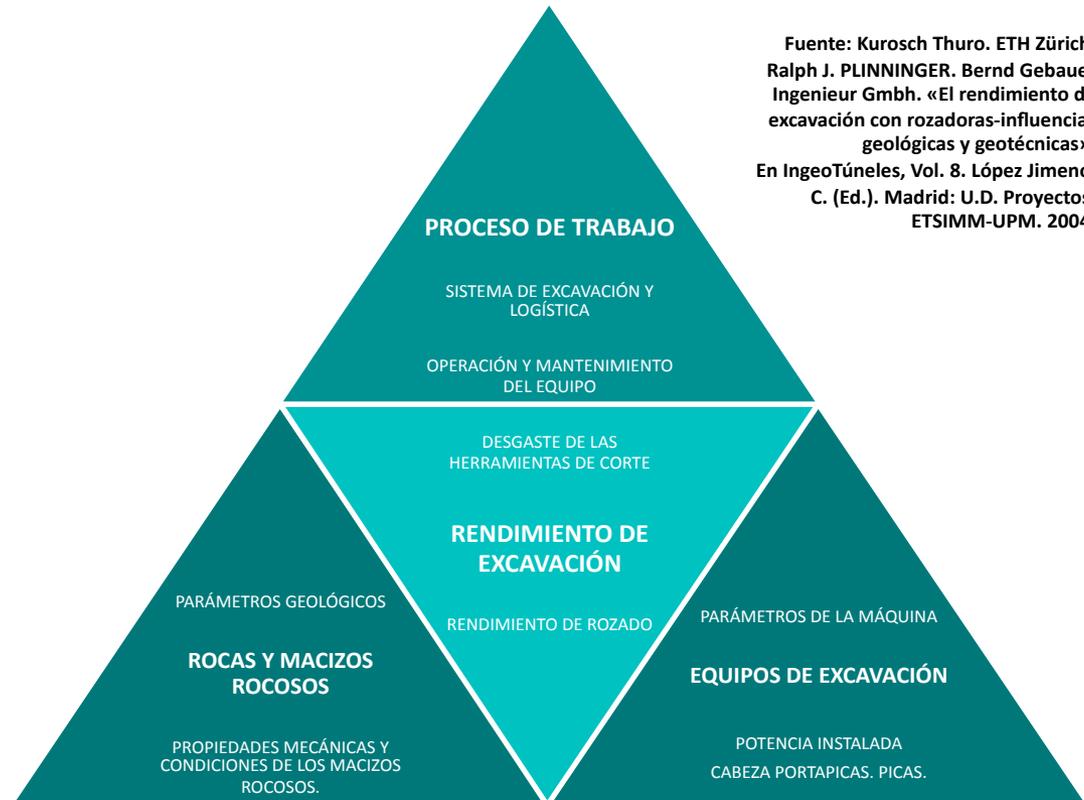
Mayor concentración de carga en cada pica (rotura de las mismas). Generación de pares distintos entre picas (cargas críticas en la cabeza de corte y vibraciones).

Rendimiento de las rozadoras

En la determinación del rendimiento han de tenerse en cuenta la influencia de múltiples aspectos, tales como el rendimiento de corte instantáneo y el desgaste de las herramientas de una rozadora. Está influenciado por los parámetros de la máquina seleccionada (potencia instalada, tipo de cabeza de corte y herramientas). Además de estos parámetros técnicos, las características geológicas del macizo rocoso pueden alterar el rendimiento, así como el procedimiento de trabajo. Con diaclasas próximas, la cabeza de rozado es capaz de escarificar piezas prefisuradas por pequeñas grietas. El proceso consume menos energía y el rendimiento de corte es mayor.

PROBLEMAS QUE PUEDEN COMPROMETER EL RENDIMIENTO

ETAPA	PROCESO
Rozado	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo rendimiento de rozado. - Alto consumo de picas (alto desgaste). - Escasa penetración de la cabeza de rozado. - Manchado de la cabeza de rozado.
Desescombro	<ul style="list-style-type: none"> - Comportamiento como un suelo blando con agua. (barro saturado de agua). - Bloques arrancados demasiado grandes para su transporte/cinta transportadora.
Problemas de sostenimiento	



Fuente: Kurosch Thuro. ETH Zürich. Ralph J. PLINNINGER. Bernd Gebauer Ingenieur GmbH. «El rendimiento de excavación con rozadoras-influencias geológicas y geotécnicas». En IngeoTúneles, Vol. 8. López Jimeno, C. (Ed.). Madrid: U.D. Proyectos. ETSIMM-UPM. 2004.

Rendimiento de las rozadoras

Fuente: Gehring, K.H. Tamrock Voest-Alpine Bergtechnik GmbH. «Excavación de túneles con rozadoras, campos y modos de aplicación». En Ingeotúnel, Vol. 3. López Jimeno, C. (Ed.). Madrid: U.D. Proyectos. ETSIMM. UPM. 2000.

Es conveniente considerar también los límites de uso de los minadores desde un punto de vista económico:

En lo referente al consumo de picas, el valor límite es de **0.3 picas/ m³_{banco}**.

En la práctica, para la excavación de túneles, el límite económico del rendimiento neto de corte toma valores de **15 - 20 m³_{banco}/h** en secciones pequeñas (por debajo de 25m²) y **35 - 40 m³_{banco}/h** en secciones por encima de 50 m².

Determinación del consumo de picas

1. DETERMINACIÓN DEL TRABAJO DE ARRANQUE O DE CORTE



2. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE PICAS

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)	TRABAJO NECESARIO PARA ARRANCAR (kWh/m ³)		
	CONTENIDO DE MATERIALES ABRASIVOS		
	< 10	10 - 30	> 30
10	0,2	0,8	1,7
20	0,4	1,6	3,1
30	0,7	2,7	4,5
40	1,5	3,7	6,0
50	2,3	4,8	7,5
60	3,4	6,0	9,2
70	4,5	7,5	11,0
80	6,0	9,3	12,8
90	7,5	11,0	16,0
100	9,5	12,8	
110	11,5	16,0	
120	13,8		
130	16,5		



TRABAJO NECESARIO PARA ARRANCAR (kWh/m ³)	CONSUMO DE PICAS		
	CONTENIDO DE MATERIALES ABRASIVOS		
	< 10	10 - 30	> 30
1	0,01	0,02	0,03
2	0,02	0,03	0,05
3	0,03	0,05	0,08
4	0,04	0,07	0,10
5	0,05	0,09	0,13
6	0,06	0,11	0,17
7	0,08	0,13	0,20
8	0,09	0,14	0,23
9	0,11	0,17	0,26
10	0,12	0,19	0,28
11	0,13	0,21	0,32
12	0,14	0,24	0,36
13	0,15	0,26	0,39
14	0,17	0,28	0,43
15	0,19	0,31	0,47
16	0,21	0,33	0,51

El método considera la proporcionalidad entre las resistencias a tracción y compresión (1/10), y picas con diámetro de 22 mm. Para diámetro 17,5 mm, debe multiplicarse por 1,3 los resultados obtenidos.

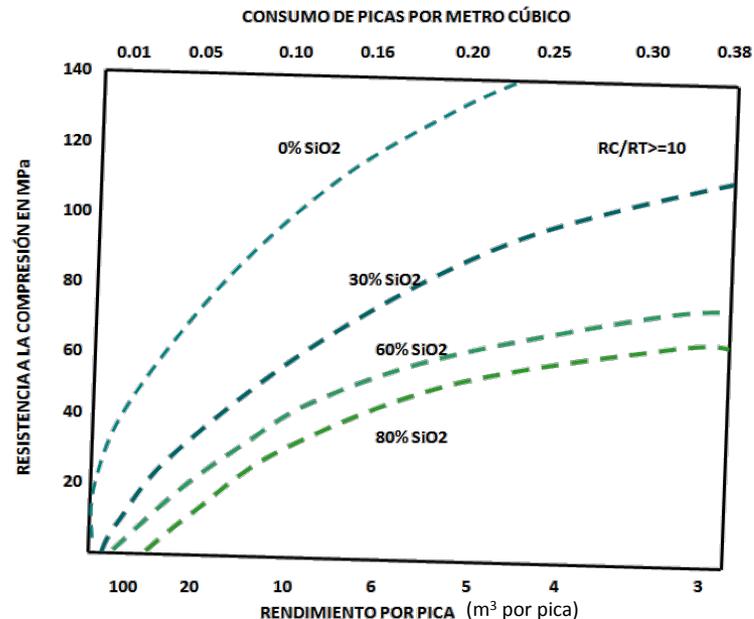
Determinación del consumo de picas (otros métodos)

COEFICIENTE DE SCHIMAZEK (F) (Schimazek y Knazt, 1976)

Permite determinar la **rozabilidad** de una determinada roca a través de la siguiente expresión:

$$F = Q^* \cdot d_{50} \cdot RT$$

- ☛ **F** = coeficiente de abrasividad en N/mm.
- ☛ **Q*** = contenido equivalente en cuarzo de minerales abrasivos (%).
- ☛ **d₅₀** = diámetro promedio del grano de cuarzo.
- ☛ **RT** = resistencia a tracción en N/mm².



ÁBACO AC-EICKHOFF GmbH (Simplificado)

$$Q^* = 1,00 \cdot (\% \text{Cuarzo}) + 0,33 \cdot (\% \text{Feldespatos}) + 0,40 \cdot (\% \text{Filosilicatos}) + 0,03 \cdot (\% \text{Carbonatos})$$

F (kp/cm)	Rozabilidad
0,8 - 1,0	Muy mala
0,6 - 0,8	mala
0,5 - 0,6	Regular
0,4 - 0,5	Moderada
0,3 - 0,4	Buena
0,2 - 0,3	Muy buena

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

Determinación de la producción horaria. Rendimiento de corte instantáneo

DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HORARIA

$$P(m_b^3 / día) = ICR \cdot C_e \cdot n \cdot C_t \cdot C_d$$

- P** = producción de excavación al día, medidos sobre perfil o banco.
- ICR** = rendimiento de corte instantáneo (m³/h).
- N** = horas trabajadas.
- C_e** = coeficiente de eficiencia.
- n** = número de horas trabajadas en una jornada.
- C_t** = coeficiente de consideración de tiempos muertos (no debería ser inferior al 85%: lo que equivale a un 15% de tiempos muertos como máximo, dependiente de la organización de los trabajos).
- C_d** = coeficiente de tiempo disponible para el trabajo.



GRADO	CONDICIONES DE TRABAJO	Coef. Eficiencia C _e
1	Buenas condiciones en la solera. Se produce poco polvo.	1
2	Solera en malas condiciones. Poco polvo.	0,86
3	Mucho polvo, interrupciones ocasionales del trabajo.	0,69
4	Solera en malas condiciones. Mucho polvo.	0,52

C _d (%)	CONDICIONES DE TRABAJO
10	Condiciones pésimas. Pendientes fuertes. Presencia de agua.
20	Terrenos malos, avance por fases con el mismo minador, con importante sostenimiento.
50	Trabajo en una fase, con sostenimiento ligero.
85	En condiciones óptimas, sin impedimentos (situación ideal).

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7e/Teilschnittmaschine_Alpine_Miner_AM50.JPG.

By High Contrast (Own work). CC BY 3.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/deed.en>). Vía Wikimedia Commons.

Determinación de la producción horaria. Rendimiento de corte instantáneo

MÉTODO DE BILGIN *et al.*

1. Cálculo del índice de cortabilidad:

$$RMCI = RC \cdot \frac{RQD^{2/3}}{100}$$

2. Rendimiento de Corte Instantáneo:

$$ICR = 0,28 \cdot P \cdot (0,974)^{RMCI}$$

 **P** = potencia del Minador.

 **RQD** = Rock Quality Designation (% de fragmentos extraídos de un testigo sondeo de longitud superior a 10 cm).

MÉTODO DE FOWELL y MCFEAT-SMITH

1. Energía específica de corte:

$$SE = -4,38 + 0,14 \cdot (CI)^2 + 3,3 \cdot (RC)^{1/3} + 0,000018 \cdot (SH)^3 + 0,0057 \cdot (CC)^3$$

 **CI** = dureza a la indentación cónica.

 **RC** = resistencia a compresión simple.

 **SH** = dureza Shore*.

 **CC** = coeficiente de cementación, basado en descripción petrográfica (Mc Feath-Smith, 1977).

* **DUREZA SHORE**: procedimiento dinámico de medición de dureza. Determina la altura de rebote de un cabezal bulón al caer desde una altura de 250 mm. 170 mm correspondería a 100 uds. Shore.

$$SE = -4,38 + 0,14 \cdot (0,0377 \cdot RC + 0,254)^2 + 3,3 \cdot (RC)^{1/3} + 0,000018 \cdot (0,441 \cdot RC - 8,73)^3 + 0,0057 \cdot (CC)^3$$

Dada Relación lineal entre la dureza Shore y la indentación cónica (Atkinson *et al.* 1986), la expresión queda así.

2. Rendimiento de corte instantáneo:

Determinación de la producción horaria. Rendimiento de corte instantáneo

MÉTODO DE FOWELL y MCFEAT-SMITH

2. Rendimiento de corte instantáneo:

$$ICR = \frac{P(kW)}{SE}$$

Si se corrige éste valor con el CTF (Cutting Time Factor), podremos tener una determinación aproximada de la producción horaria de corte (m³/h) ya que (SE se calcula en base al tiempo real de corte).

CONDICIÓN DE EXCAVACIÓN	CTF
Excavación normal	0,65 - 0,85
Recortes finales	0,3 - 0,5
Arranque global	0,45 - 0,65

$$OCR = ICR \cdot CFT$$



«Minador moderno», Silvial Alba.
<https://www.flickr.com/photos/barrenera>.
<https://flic.kr/p/6rz7Kb>.
<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>.

Determinación de la producción horaria. Rendimiento de corte instantáneo

MÉTODO DE NEIL *et al.*

<http://emi.mines.edu/UserFiles/File/earthMechanics/roadheader/roadheader2.pdf>

1. Cálculo de “f”, trata de reflejar la profundidad que el operario elige intuitivamente basado en la facilidad percibida para el corte. Si es $f = 1$, puede alcanzar una profundidad de penetración igual a toda la longitud o radio de la cabeza de corte, si es $f < 1$, la profundidad es menor:

$$f = 1 - 0,06 \cdot (R - 7) - 0,5 \cdot \left[\frac{RQD - 25}{25} \right]^{B_1} - \left[\frac{RC - 5000}{5000} \right]^{B_2}$$

- ✿ R = relación entre la resistencia a compresión simple y a tracción de la roca.
- ✿ B_1, B_2 = constante de valor 0,4 y 2 respectivamente.
- ✿ RC = resistencia a compresión simple (lb/pulg²).

2. Rendimiento de corte instantáneo:

$$ICR = P_n \cdot RMP \cdot C \cdot (D - f)^2$$

- ✿ D = diámetro de la cabeza de corte.
- ✿ RPM = velocidad angular.
- ✿ P_n = penetración nominal ($P_n = 10f$).
- ✿ C = factor de conversión de unidades.



VIDEO: «The Strongest Roadheader in the World». Working Metro Bilbao.
<https://www.youtube.com/watch?v=QyE5kAothQ4>

Barrick Meikle Rodeo Mine Production Roadheader - Kerry Michals.

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

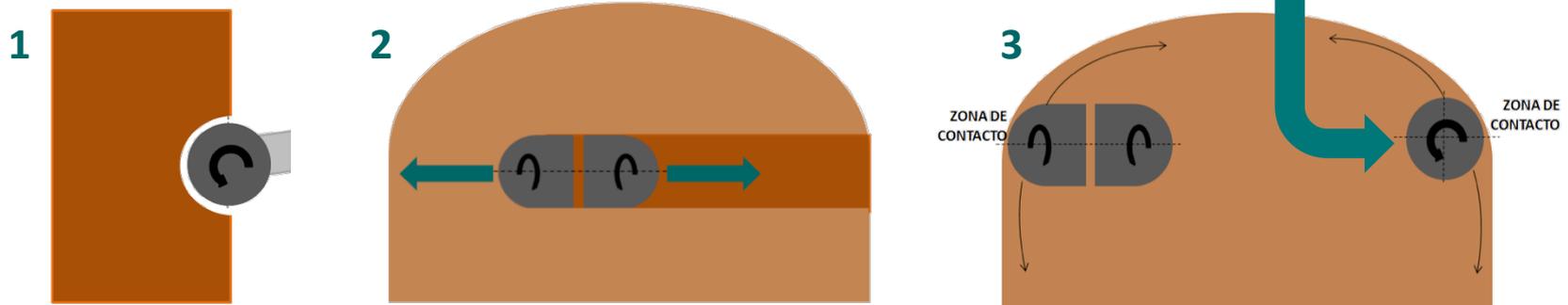
<https://flic.kr/p/fAYhTE> <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>

Rozadoras

Operativa

FASES DE TRABAJO CON EL MINADOR

1. Penetración de la cabeza.
2. Corte del frente.
3. Perfilado (en caso de requerirse).



La introducción de la cabeza de corte en el frente de excavación (movimiento hacia delante de la rozadora, mediante las orugas/brazos telescópicos o articulados).

El resto de la excavación del frente de avance se consigue moviendo el brazo rozador. El tipo de movimiento a describir dependerá de las condiciones del macizo, y el tipo de cabeza.

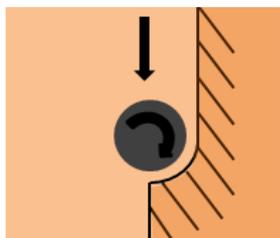
Si se requiere revestimiento (túneles, por ejemplo), suele perfilarse la sección para aproximar la geometría a la definitiva.

Operativa

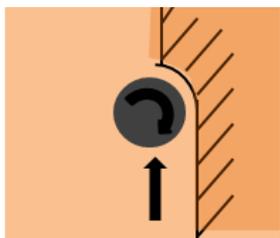
EXCAVACIÓN DEL FRENTE DE AVANCE

- 🔧 **Milling:** el movimiento natural es hacia delante, manteniendo el cabezal centrado. La fuerza se aplica sobre un menor número de picas que en la cabeza transversal: pequeñas oscilaciones circulares pueden resultar ventajosas.
- 🔧 **Ripping:** al cortar en frente de arranque, dejan roca entre las dos mitades de la cabeza. La máquina avanza por pasos, desplazando el brazo transversalmente.

* MATERIALES SECOS QUE CORTAN CON FACILIDAD. RESISTENCIA A COMPRESIÓN INFERIOR A 50 Mpa, O CON UNA IMPORTANTE FRAGMENTACIÓN, QUE PERMITE OBTENER TAMAÑOS DE FRAGMENTACIÓN INFERIORES A 200 mm.



CORTE TRANSVERSAL
DESCENDENTE



CORTE TRANSVERSAL
ASCENDENTE

EXCAVACIÓN EN TERRENOS BLANDOS (RC > 50 Mpa)

Las **rozadoras con cabeza longitudinal (axial)**, ejecutan un corte en la parte central de la sección de avance que luego ensanchan al resto de la sección. Los rendimientos instantáneos que se consiguen son inferiores a los que se consiguen con cabezas transversales.

Las **rozadoras con cabeza transversal** suelen cortar auxiliándose de movimientos verticales. Suele comenzarse cortando desde el piso hacia el techo, aunque en condiciones ideales pudiera considerarse la opción contraria, desde el techo hacia el piso.

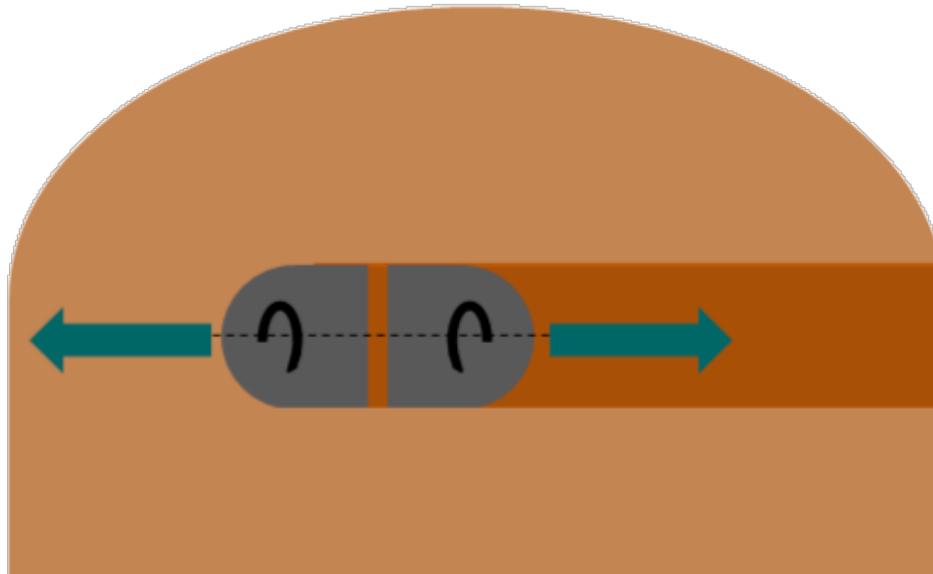
Rozadoras

Operativa

TRABAJO EN TERRENOS DUROS

Con **cabeza longitudinal**, en la práctica suele hacerse un socavado inicial, y seguidamente un corte poco rebajado transversalmente en el centro del frente que se va agrandando en lo sucesivo. La libertad de movimientos es mayor que en transversales, pudiéndose dar pasadas en cualquier posición.

Rozadoras transversales, en **rocas medias-duras** suelen realizar las operaciones de corte moviendo el brazo horizontalmente en todo lo ancho del frente, volviendo a tomar posición la cabeza para realizar el corte siguiente. El socavado inicial suele verificarse en el piso de la galería.

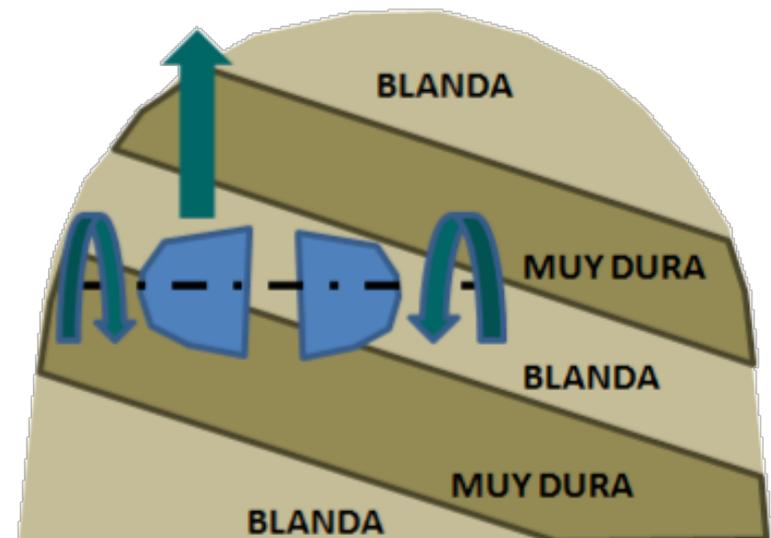
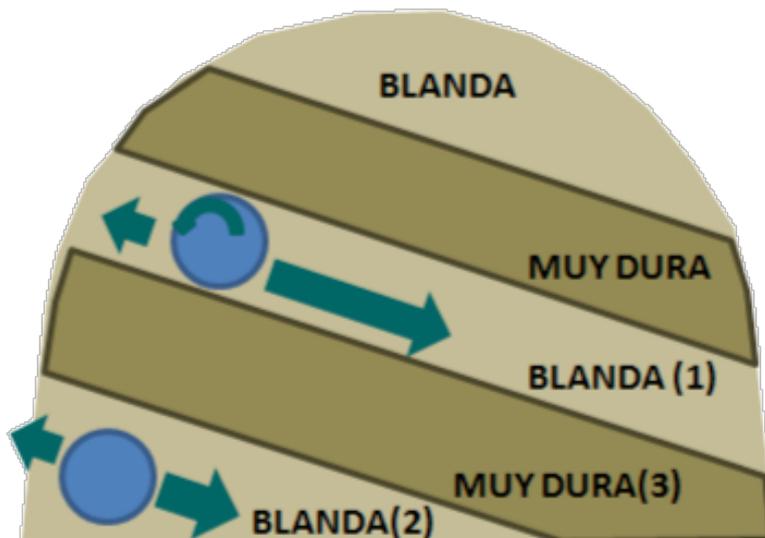


Operativa

TRABAJO EN TERRENOS MIXTOS

La **cabeza de corte longitudinal** resulta óptima (permite realizar cortes en todas direcciones (permite cortes horizontales, verticales e inclinados). Permite atacar primero las capas blandas, provocando una cierta debilitación de las capas duras intermedias, favoreciendo el posterior arranque.

Con **cabeza de corte transversal** la posibilidad de corte selectivo se reduce a estratos de una potencia igual o mayor que el cabezal. Pueden excavar verticalmente y en arco, pero los cortes inclinados se ven comprometidos por el núcleo central de la cabeza. Puede optarse por un corte en diagonal escalonado.



Variantes de avance trabajando con minadores

EXCAVACIÓN A PLENA SECCIÓN

Es el método más eficiente, dadas las secciones relativamente pequeñas que se generan y la estabilidad suficiente del terreno. En función del tamaño y alcance de la máquina, se pueden excavar secciones de entre 6 m² a 55 m² desde la misma posición.

El mejor procedimiento es la excavación longitudinal, es decir, de forma que la mayor parte de las operaciones pueden ser ejecutadas sin mover el minador del frente. Las labores de sostenimiento pueden realizarse desde el minador si éste cuenta con accesorios y plataformas de trabajo.

En secciones hasta 30 m² y longitudes superiores a 400 m la forma más eficaz de desescombro es a través de raíles. En secciones superiores, se admite el cruce de dos camiones de pequeño tamaño.

Fuente: Gehring, K.H. Tamrock Voest-Alpine Bergtechnik GmbH. «Excavación de túneles con rozadoras, campos y modos de aplicación». En Ingeotúnel, Vol. 3. López Jimeno, C. (Ed.). Madrid: U.D. Proyectos. ETSIMM. UPM. 2000.

Variantes de avance trabajando con minadores

EXCAVACIÓN POR CALOTA Y DESTROZA

Es el método más empleado tradicionalmente para grandes secciones. La calota va entre 50 y 100 m adelantada con respecto a la destroza.

En función de la anchura del túnel, la sección de avance se puede dividir en dos o más fases consecutivas. Generalmente el desfase es de 1 - 1,5 m.

La excavación de la destroza se puede realizar con el propio minador durante los periodos de medición de los sistemas de sostenimiento de la sección. En la sección de destroza debe realizarse una rampa en una de sus mitades, para facilitar el acceso a la sección de avance mientras que la otra puede ser excavada.

La gran ventaja del método es la óptima utilización de la rozadora en la excavación y su sencillez, lo cual facilita la secuencia de operaciones dentro del túnel. Con túneles de longitud inferior a 800 m es buena opción excavar el avance en la totalidad del túnel, para posteriormente excavar la destroza.

Fuente: Gehring, K.H. Tamrock Voest-Alpine Bergtechnik GmbH. «Excavación de túneles con rozadoras, campos y modos de aplicación». En Ingeotúnel, Vol. 3. López Jimeno, C. (Ed.). Madrid: U.D. Proyectos. ETSIMM. UPM. 2000.

Rozadoras

Variantes de avance trabajando con minadores

EXCAVACIÓN CON AVANCE LIGERAMENTE ADELANTADO

La excavación con la calota ligeramente avanzada requiere que los tiempos de parada sean suficientes y que las deformaciones de los laterales no provoquen asentamientos críticos.

Con terrenos poco competentes y con restricciones medioambientales donde se deben evitar subsidencias, el método está especialmente indicado.

En terrenos de rocas blandas cumple con el Nuevo Método Austriaco.

GRANDES SECCIONES

En grandes secciones se realiza la excavación de grandes huecos laterales iniciales y la estabilización intermedia de los huecos para la redistribución controlada tensiones y una mayor seguridad en la secuencia de excavación.

Empleo

Fuente: OSALAN, Gobierno Vasco. «Túneles. Guía para la PRL en la ejecución de túneles».

http://www.osalan.euskadi.eus/contenidos/libro/seguridad_201215/es_doc/adjuntos/guia_tuneles.pdf.pdf.

La de este tipo de trabajos de avance se realiza en ocasiones con retroexcavadoras provistas de **martillo hidráulico**, y en ciertos casos, permitiéndolo la dureza de la roca de la roca lo permite, se puede usar directamente la cuchara o cazo de la retroexcavadora. Puede plantearse la utilización del martillo igualmente en tareas de saneo o perfilado.



«Kingdom come», Gualtiero.

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

<https://flic.kr/p/9wBxV>.

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

VIDEO: empleo de martillo hidráulico en túnel:

<https://www.youtube.com/watch?v=FoQ1D1byIGM>



«Excavator jackhammer», Eydie Sakura. U.S. Air Force:

<http://www.spangdahlem.af.mil>.

Licensed under Public Domain Vía Wikimedia Commons.

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Excavator_jackhammer.jpg#/media/File:Excavator_jackhammer.jpg.



«Last shovel gang in the Cascade Tunnel», University of Washington

Libraries Digital Collections from Seattle, WA, USA

(Public domain). Vía Wikimedia Commons.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Last_shovel_gang_in_the_Cascade_Tunnel.jpg.