



Marca Sandvik MT-720  
Peso: 130 toneladas  
Potencia: 300 kW de cabeza de roza

# Excavación mecánica de ataque puntual en túneles con máquina rozadora

## Conceptos básicos

Laureano Cornejo, Ingeniero de Minas  
Director General de Geoconsult

### Resumen

La utilización de las máquinas rozadoras de ataque puntual en la excavación mecánica de suelos y rocas en túneles tienen un campo de utilización muy específico.

Es necesario conocer adecuadamente las características de los materiales que van a ser excavados y las condiciones de trabajo para decidirse por su utilización y tomar una decisión acertada sobre el tipo de máquina más adecuada. El desarrollo de este tipo de máquinas va hacia el incremento de la potencia de la cabeza de corte, 500 kW y 150 t de peso, para incrementar los rendimientos de excavación y aumentar el campo de utilización hacia rocas de mayores resistencias a compresión y de abrasividades no excesivamente elevadas.

Para tomar una decisión sobre su utilización y el tipo de máquina más adecuado, es necesario realizar ensayos específicos

que determinen los índices de abrasividad de la roca (CAI), el rendimiento medio de excavación ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) y el consumo medio de picas  $\text{Ud}/\text{m}^3$ , para evaluar correctamente el costo económico ( $\text{€}/\text{m}^3$ ) y el plazo de ejecución.

Puede no ser una decisión acertada utilizar rozadoras en frentes mixtos en los que se encuentran simultáneamente capas blandas de terreno con intercalaciones significativas de estratos rocosos muy duros ( $\sigma_c \geq 120 \text{ MPa}$ ) donde los desgastes o roturas de las picas sean muy elevados y los rendimientos de excavación muy bajos ( $13\text{-}15 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Se consideran valores adecuados de excavación, con una utilización económica adecuada, rendimientos de  $25\text{-}35 \text{ m}^3/\text{h}$  sobre perfil.

En túneles en terrenos blandos arcillosos y/o limosos plásticos, con presencia de agua, pueden producirse reducciones importantes del rendimiento de excavación por atoramiento de la cabeza y del sistema de carga del material como consecuencia de la formación de pegotes de arcilla.

En túneles en suelos permeables con agua con cantidades significativas de arena, se dificultará en gran medida la carga del material excavado pudiendo producirse también problemas de movilidad de la máquina por reblandecimiento del piso de trabajo.

En algunos túneles del metro de Bilbao, en areniscas duras y abrasivas ( $\sigma_c = 161 \text{ MPa}$ ,  $\text{CAI} = 2,9$ ) se ha utilizado la excavación con rozadora en situaciones límite para evitar la utilización de explosivos. Los rendimientos de excavación en estas circunstancias fueron  $\text{RE} = 4 \text{ m}^3/\text{h}$  y el desgaste de picas de  $3,4 \text{ picas}/\text{m}^3$ .

El desgaste excesivo de las herramientas de corte y la reducción importante del rendimiento de excavación subsecuente es el principal elemento limitador de la utilización de las máquinas rozadoras.

Para incrementar la resistencia al desgaste de estas máquinas, una alternativa sería introducir como útiles de corte, en sustitución de las picas de ataque actuales, minidiscos similares a los cortadores

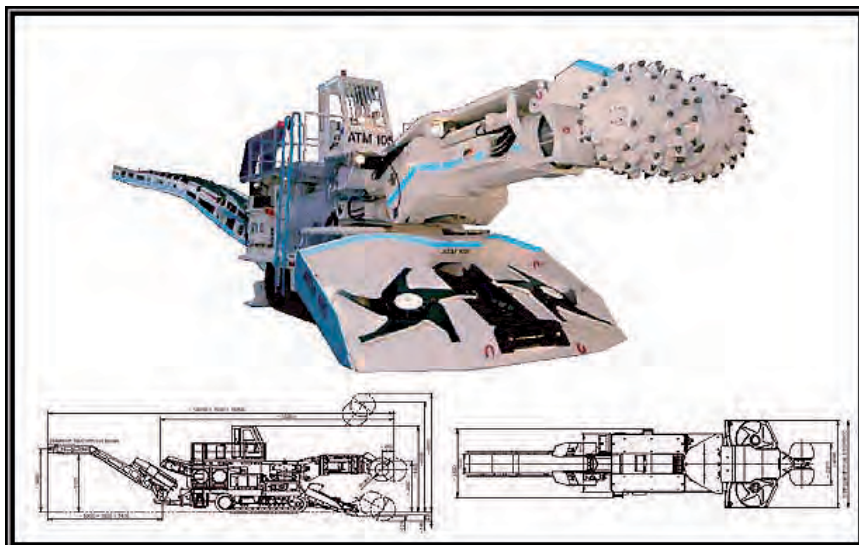


Figura 1. Rozadora Alpine, modelo ATM 105

utilizados en las tuneladoras para rocas duras.

**PALABRAS CLAVE:** Potencia de la cabeza de corte, potencia de la cabeza de peso, rendimientos de excavación, índices de abrasividad de la roca (CAI), consumo medio de picas, Metro de Bilbao, areniscas duras y abrasivas, minidiscos.

## 1. Breve historia

El primer desarrollo de este tipo de máquinas se produce en los años 1950 en las minas de carbón de Hungría y Gran Bretaña. La primera patente es húngara (Dr. Z. Ajtay, 1949).

Durante 50 años los diseños iniciales se han ido modificando, extendiendo su campo de utilización a la excavación de túneles en suelos y rocas blandas, mejorándose los diseños mediante el desarrollo tecnológico de partes esenciales de la máquina, como los sistemas de accionamiento de la cabeza de corte y de los materiales utilizados en la fabricación de los útiles de corte (picas)

La evolución de los diseños se ha centrado principalmente en un incremento continuado del peso, del tamaño y de la potencia de la cabeza de corte de las máquinas.

Se han mejorado también los diseños: del brazo, de los sistemas de extracción de escombros, de la cabeza de corte, de la disposición de las picas en ésta y de los sistemas hidráulicos y eléctricos de accionamiento.

El peso de las máquinas ha pasado de 17 t a más de 120 t, consiguiéndose máquinas más robustas y de funcionamiento más

estable, capaces de aplicar mayores fuerzas de empuje, necesarias para excavar rocas más duras, reduciendo las vibraciones durante su funcionamiento y, por tanto, los costes de mantenimiento.

En cuanto a la potencia de la cabeza de corte, ésta ha pasado de los 37 kW de las primeras máquinas, hasta cerca de los 500 kW de las máquinas actuales capaces por su envergadura de realizar excavaciones de hasta 100 m<sup>2</sup> desde una posición estacionaria.

En cuanto a la definición de este tipo de máquina, la terminología inglesa es difusa y las denomina con los términos: *road-header*, *road header*, *boom-type tunnelling machine*, *boom-type road header*, *road*

*header machine*. En italiano se denomina *fresa puntuali*, en francés *fraise-chargeuse*, *machines à attaque partielle o ponctuelle*. El término español de más frecuente uso para definir este tipo de máquinas es el de máquina rozadora; también puede definirse como máquina fresadora.

El término máquina rozadora, aplicado a la excavación de túneles, puede definirse como una máquina que realiza la excavación de un suelo o roca efectuando rozas sucesivas, es decir rozando el terreno.

## 2. Definición de rozadora

Es una máquina de ataque puntual que realiza la excavación mecánica de suelos y rocas mediante excavaciones parciales de la superficie del frente de avance.

Consta de un chasis sobre orugas para la traslación y soporte de la máquina, un brazo mecánico articulado, frecuentemente telescópico, en el extremo del cual lleva una cabeza de corte giratoria y provista de herramientas de corte que indentan la roca produciendo su desintegración por el efecto combinado del empuje de la máquina y el par de rotación del cabezal de corte.

La extracción del material excavado se realiza simultáneamente con la excavación, mediante una mesa de recogida y carga a una cinta blindada, solidaria con la máquina, que lo transfiere a los vehículos de extracción al exterior del túnel.



Figura 2. Rozadora

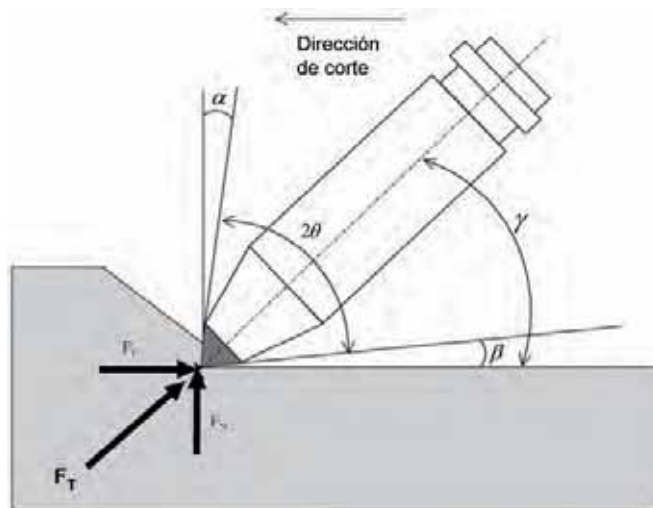


Figura 3. Geometría de una pica cónica. Fuerzas que intervienen

## 3. Mecanismo de excavación

La máquina rozadora transmite al terreno una fuerza de empuje a través del brazo y un par de rotación por el giro de la cabeza de corte. El efecto combinado de estas acciones produce una excavación por corte del terreno o de la roca. Para que esta excavación se produzca es necesario que, previamente, se produzca la indentación o penetración de las picas en contacto con el terreno. Esta indentación es producida por la fuerza de empuje  $F_N$ , componente perpendicular al frente de la fuerza total  $F_T$  ejercida por el brazo de la rozadora. La componente de la fuerza  $F_T$  en la dirección de corte es la fuerza de corte  $F_C$ . La geometría de una pica cónica y las fuerzas que intervienen en el proceso de excavación se indican en la figura 3.

- La pica penetra y origina una zona de roca pulverizada.
- Se incrementa la tensión en la roca.
- Se alcanza la tensión crítica. Se producen lascas de roca y se reducen las tensiones.

La fuerza  $F_N$ , necesaria para que se produzca la indentación, sigue una ley parabólica representada por la expresión

$$F_N = A \cdot p^b \quad (1),$$

en la que  $p$  se expresa en pulgadas (in), y  $A$  y  $b$  son coeficientes que dependen del tipo, peso y potencia de la máquina. La fuerza  $F_N$  aplicada depende de la separación entre picas; una mayor separación de picas origina una mayor fuerza  $F_N$  disponible en cada pica y una menor cantidad de éstas.

La eficacia del proceso de excavación depende del grado de interacción entre las picas contiguas; debe existir, por tanto, una separación óptima entre picas para que se produzca un óptimo rendimiento de la excavación.

Esta separación debe ser

$$S = \frac{w}{z} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{20}{K^2} \right)^2 \right] \quad \text{Evans 1972 (2).}$$

$w$  = Anchura de la pica

$K = \frac{w}{d}$

$d$  = Profundidad de corte

Los valores más habituales de la separación entre picas varían entre 25 mm y 60 mm.

Para determinar la fuerza de corte  $F_C$ , pueden emplearse diferentes expresiones:

$$F_C = \frac{16\pi R_t^2 d^2}{\cos^2 \theta R_C} \quad \text{Evans 1984 (3),}$$

considerando que la rotura de la roca se efectúa por tracción.

$R_t$  = Resistencia a tracción de la roca

$\theta$  = Semiángulo de la pica cónica

$R_C$  = Resistencia a compresión de la roca

$$F_C = \frac{4\pi R_t d^2 \sin^2(\theta + \psi)}{\cos(\theta + \psi)}$$

Goktan (4); para un ataque de las picas teóricamente asimétrico.

$\psi$  = ángulo de rozamiento entre la pica y la roca ( $\approx 10^\circ$ ).

En la práctica, el ataque de las picas sobre la roca es asimétrico. La Universidad de Estambul, dentro del proyecto NATO-TU

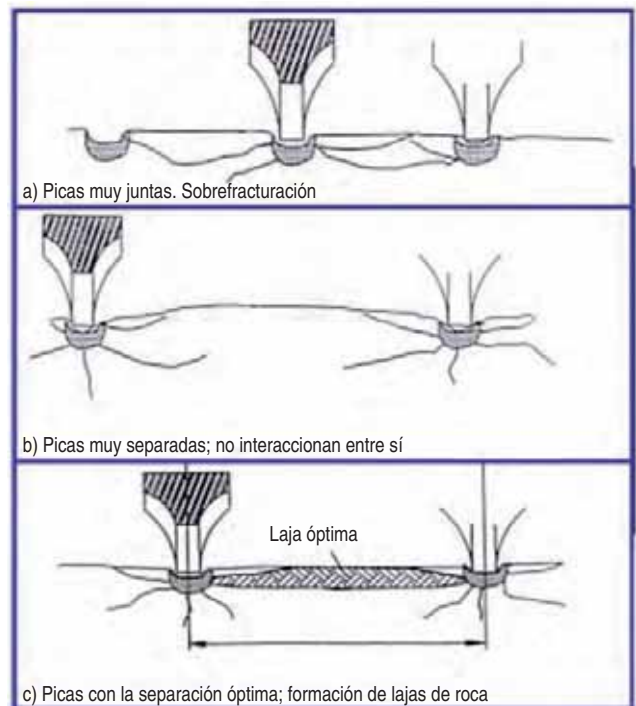


Figura 4. Mecanismo de rotura; formación de lascas

Excavation Project, ha desarrollado una formulación semi-empírica, a partir de la formulación teórica propuesta por Goktan, utilizando un equipo de corte sobre probetas a escala natural; resultado de este trabajo de investigación ha sido la expresión

$$F_C = \frac{12\pi R_t d^2 \sin^2 [1/2(90^\circ - \alpha) + \psi]}{[1/2(90^\circ - \alpha) + \psi]} \quad (kN)$$

Goktan (5); para un ataque asimétrico.

El valor de la fuerza  $F_C$  en una rozadora potente y pesada puede llegar hasta los 300 kN.

También se encontró la relación

$$F_C / F'_C \approx 3$$

$\alpha$  = Ángulo de inclinación

$\beta$  = Ángulo libre

$\gamma$  = Ángulo de ataque

$F'_C$  = Fuerza media de corte

## 4. Sistemas de corte

Según la disposición en relación con el brazo y la forma de funcionamiento de la cabeza de corte, el ataque de la cabeza puede ser frontal (*ripping*) o lateral (*milling*).

### 4.1. Ataque frontal

Con la disposición de **Ataque frontal**, la cabeza de corte gira perpendicularmente al brazo soporte y las herramientas de corte

(picas) golpean la roca utilizando el peso de la máquina y la fuerza de corte  $F_c$  se aplica a la roca principalmente de un modo frontal. La cabeza de corte está situada perpendicularmente al brazo de la máquina y la cabeza gira alrededor de un eje paralelo al frente de la roza excavada. Las fuerzas de corte  $F_c$  son generadas por la rotación de la cabeza y por el empuje del brazo.

La disposición frontal o transversal permite obtener mejores rendimientos de excavación en rocas duras, según demuestran los ensayos realizados por Gherin.

## 4.2. Ataque lateral

Con la disposición de **Ataque lateral** la cabeza de corte gira coaxialmente con el eje del brazo y perpendicularmente al frente de la roza excavada.

Esta disposición del cabezal de corte es más adecuada para excavar rocas blandas y la de más frecuente uso en aplicaciones mineras.

## 5. Clasificación de las rozadoras

Hay varios criterios para clasificar las rozadoras.

- **Por su peso**, que está relacionado con su potencia de corte (Neil *et al* 1994).

Tabla 1. Clasificación de Neil 1994

| Tipo | Peso t  |
|------|---------|
| 0    | <20 t   |
| I    | 20-30 t |
| II   | 30-50 t |
| III  | 50-75 t |
| IV   | >75 t   |

- **Por su fecha de aparición en el mercado** y las características técnicas que aporta (Bölükbaşı 1986) (tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de las rozadoras según su desarrollo tecnológico

|               | Peso         | Potencia cabeza de corte | Tipo de roca                                                                                     | $\sigma_c$ MPa |
|---------------|--------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 1ª Generación | 9 t          | 30 kW                    | Rocas blandas                                                                                    | 40             |
| 2ª Generación | 22-37 t      | 30-100 kW                | Rocas competentes poco abrasivas                                                                 | 85             |
| 3ª Generación | 45-70 t      | $\geq 200$ kW            | Rocas duras poco abrasivas                                                                       | 100            |
| 4ª Generación | $\leq 120$ t | 300 kW                   | Rocas duras poco abrasivas                                                                       | 100            |
|               |              |                          | Rocas duras poco abrasivas con fracturación o estratificación favorable con valores bajos de RQD | 160            |

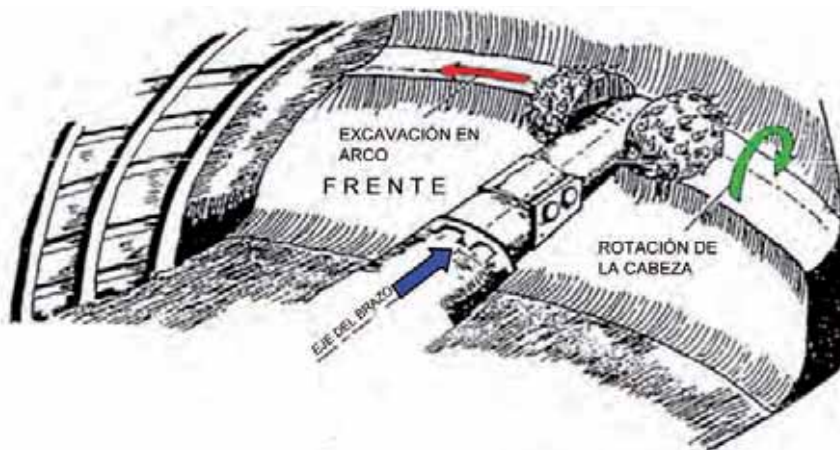


Figura 5. Rozado con cabezal de corte frontal

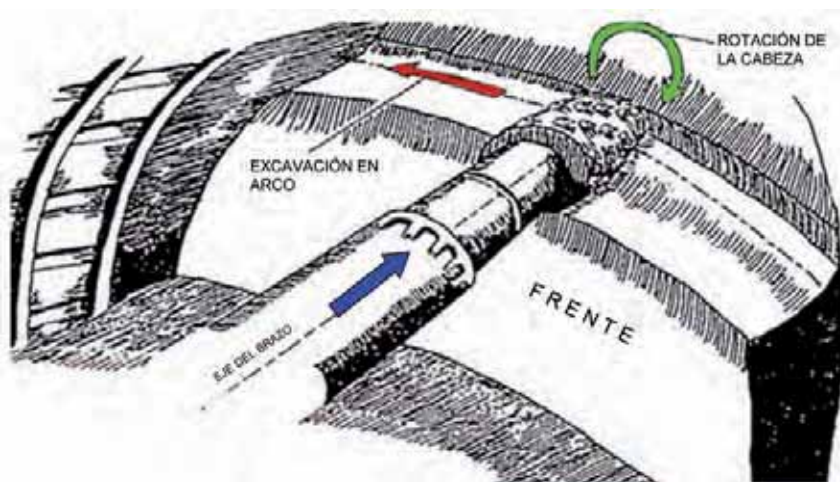


Figura 6. Rozado con cabezal de corte lateral

Se incluye otra clasificación en la que se consideran los principales fabricantes y los pesos y potencias de los modelos más representativos (ver tabla 3 en página siguiente).

## 6. Útiles de corte

Las herramientas de corte, que entran en contacto con el terreno transmitiendo la potencia de las máquinas, tienen una influencia muy importante en el rendimiento y en el costo del proceso de excavación con rozadora.

La calidad de los materiales y el adecuado diseño de las picas son características esenciales para la utilización económica del método de excavación con rozadora, principalmente en rocas duras y abrasivas.

Hay tres tipos de herramientas de corte (picas) (ver figura 7 en página siguiente):

- Radial; que se usa en rocas blandas.
- Ataque frontal para rocas blandas a medias.
- Ataque puntual para rocas medias a duras y rozadoras pesadas.

Las picas van provistas, en la punta o en el filo, de un inserto de material duro muy resistente a la abrasión y a los impactos; su diámetro varía entre 12 mm y 32 mm; los mayores diámetros son para rocas muy duras y abrasivas.

Las picas son recambiables y van alojadas en un bloque-portapicas solidario con la cabeza de corte.

El diámetro del vástago de las picas oscila entre 25 mm y 35 mm, y está relacio-

Tabla 3. Clasificación de los principales tipos de rozadoras

| Tipo de Rozadora | Marca     | Modelo          | Peso  | Potencia instalada | Potencia en cabeza de corte | Máx. altura de corte | Máx. anchura de corte | Presión de orugas en solera | Máx. sección (m <sup>2</sup> ) | σ <sub>c</sub> Máx. de la roca | RQD (%) |
|------------------|-----------|-----------------|-------|--------------------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|
| Ligeras          | ANTRAQUIP | AQM 50          | 13 t  |                    | 41 kW                       |                      |                       |                             |                                |                                |         |
|                  | DOSCO     | Mk 2A           | 23 t  | 67 kW              | 58 kW                       | 4 040 mm             | 5 560 mm              | 0,14 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | MITSUI    | S100            | 27 t  |                    | 100 kW                      | 4 500 mm             | 5 100 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | SIZZ      | EBZ100A         | 27 t  |                    | 100 Kw                      | 4 550 mm             | 4 980 mm              | 0,12 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | SIZZ      | EBZ100          | 27 t  |                    | 100 kW                      | 4 630 mm             | 5 300 mm              | 0,12 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 180          | 40 t  | 230 kW             | 100 kW                      | 5 100 mm             | 6 500 mm              |                             | 25                             | 40-60                          | 0-100   |
|                  | ANTRAQUIP | AQM 100         | 27 t  |                    | 132 kW                      | 4 420 mm             | 5 200 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | SIZZ      | EBZ132          | 30 t  |                    | 132 kW                      | 4 550 mm             | 4 980 mm              | 0,12 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 170          | 35 t  | 220 kW             | 132 kW                      | 4 600 mm             | 6 100 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 120          | 34 t  | 220 kW             | 132 kW                      | 4 050 mm             | 5 500 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | DOSCO     | MD1100          | 33 t  |                    | 157 kW                      | 4 690 mm             | 6 500 mm              | 0,14 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | WIRTH     | T1.14           | 40 t  | 270 kW             | 160 kW                      | 4 400 mm             | 6 000 mm              |                             |                                |                                |         |
| Medianas         | WIRTH     | T1.24           | 55 t  | 310 kW             | 160 kW                      | 5 000 mm             | 7 200 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | ANTRAQUIP | AQM 150         | 35 t  |                    | 175 kW                      | 4 085 mm             | 5 005 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | DOSCO     | Mk 2B           | 44 t  |                    | 194 kW                      | 4 340 mm             | 5 820 mm              | 0,14 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | MITSUI    | S200            | 49 t  |                    | 200 kW                      | 6 000 mm             | 6 400 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 210          | 57 t  | 350 kW             | 200 kW                      | 4 700 mm             | 7 100 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | ANTRAQUIP | AQM 200         | 58 t  |                    | 200 kW                      | 5 300 mm             | 7 600 mm              |                             | 30                             | 60-90                          | 0-100   |
|                  | DOSCO     | Mk 2BP          | 60 t  |                    | 200 kW                      | 4 930 mm             | 7 080 mm              | 0,16 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | SANDVIK   | MT300 series    | 60 t  | 350 kW             | 200 kW                      | 5 000 mm             | 8 900 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 250          | 64 t  | 350 kW             | 200 kW                      | 5 500 mm             | 7 500 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | WIRTH     | T2.24           | 75 t  | 310 kW             | 200 kW                      | 5 200 mm             | 8 700 mm              |                             |                                |                                |         |
| Pesadas          | EICKHOFF  | ET 380          | 100 t | 380 kW             | 200 kW                      | 7 450 mm             | 9 800 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | WIRTH     | T2.11           | 85 t  | 405 kW             | 270 kW                      | 7 000 mm             | 7 000 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | DOSCO     | Mk3             | 85 t  |                    | 284 kW                      | 6 000 mm             | 7 200 mm              | 0,14 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | MITSUI    | SLB 300S        | 92 t  |                    | 300 kW                      | 8 800 mm             | 8 800 mm              | 0,15 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 410          | 105 t | 470 kW             | 300 kW                      | 5 500 mm             | 10 000 mm             |                             |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 450          | 110 t | 490 kW             | 300 kW                      | 7 300 mm             | 10 300 mm             |                             | 40                             | 90-110                         | <80     |
|                  | MITSUI    | SLB-350S        | 115 t | 466 kW             | 300 kW                      | 9 500 mm             | 11 000 mm             | 0,15 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | WIRTH     | T3.20S          | 120 t | 414 kW             | 300 kW                      | 7 690 mm             | 8 960 mm              | 0,15 MPa                    |                                |                                |         |
|                  | EICKHOFF  | ET 480          | 120 t | 490 kW             | 300 kW                      | 7 900 mm             | 11 000 mm             |                             |                                |                                |         |
| Muy Pesadas      | SANDVIK   | MT720 (ATM 105) | 135 t | 555 kW             | 300 kW                      | 6 600 mm             | 9 100 mm              |                             |                                |                                |         |
|                  | DOSCO     | TTM100          | 150 t |                    | 375 kW                      | 5 300 mm             | 6 600 mm              | 0,15 MPa                    | 45                             | 110-140                        | <60     |
|                  | DOSCO     | Mk4             | 96 t  |                    | 407 kW                      | 5 223 mm             | 7 440 mm              | 0,16 MPa                    |                                |                                |         |

nado con la dureza de la roca y la potencia y peso de la máquina; los diámetros mayores se usan en las rozadoras más pesadas para rocas muy duras.

La disposición de las picas en el cabezal, su número y la separación entre ellas, tienen una gran influencia en el rendimiento de excavación y en el consumo de picas.

La separación de las picas y la profundidad de corte influyen notablemente en el consumo específico de energía ( $ES$ , MJ/m<sup>3</sup>)

durante el proceso de excavación (figura 8).

Para diferentes valores de penetración en la roca ( $d$ ), hay una separación óptima entre picas que produce las lajas de roca de mayores dimensiones, con un menor consumo de energía específica  $SE$  (MJ/m<sup>3</sup>), así como el máximo rendimiento de excavación para una máquina determinada. Con una separación óptima entre picas contiguas, su interacción será también óptima; la máquina tendrá un funcionamiento regular

consiguiendo los mayores rendimientos y el menor consumo de energía específica, reduciéndose al mínimo la producción de polvo.

Si las picas están muy juntas, se producirá un sobrecorte de la roca, produciéndose fragmentos muy pequeños y una mayor cantidad de polvo. Se incrementará notablemente el consumo específico de energía y el desgaste de las picas, reduciéndose el rendimiento de excavación.

Cuando las picas están excesivamente separadas no habrá interacción entre ellas, no produciéndose el corte de la roca.

## 7. La abrasividad de las rocas

Una de las mayores limitaciones de las rozadoras es el desgaste y las roturas que sufren las picas en contacto con rocas duras y abrasivas. Estos desgastes obligan a sustituir frecuentemente las herramientas de corte, lo que provoca una reducción del tiempo real de trabajo de la máquina y un consumo importante de estos útiles de corte, con el consiguiente incremento del costo de excavación del m<sup>3</sup> de roca.

La fricción entre el metal de la pica y una roca abrasiva produce un incremento de temperatura del metal de widia que incrementa los desgastes.

Una inyección eficaz de agua en la cabeza de corte permite reducir esta temperatura y evitar la formación de polvo potencialmente peligroso para la salud.

La abrasividad de las rocas depende de varios factores, los más importantes son:

- Contenido de minerales abrasivos.
- Tamaño medio de los granos de cuarzo.
- Dureza y tenacidad del cemento que los une.

La clasificación de las rocas según su contenido en sílice, se resume en la *tabla 4*.

| Tabla 4. Clasificación de las rocas según su contenido en sílice |                    |
|------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Tipo de roca                                                     | % SiO <sub>2</sub> |
| Arenisca silícea                                                 | 98                 |
| Otras areniscas                                                  | 80-95              |
| Arcosas                                                          | 70-80              |
| Granito                                                          | 70                 |
| Grauwaca, granodiorita                                           | 60-70              |
| Pizarra, sienita                                                 | 50-65              |
| Basalto, gabro                                                   | 50                 |
| Arcilla                                                          | 40                 |
| Caliza, dolomía                                                  | 2-10               |

Para determinar la abrasividad de una roca se han desarrollado varios ensayos de laboratorio. Los más importantes y de uso más frecuente son:

- Índice CERCHAR (CAI), Francia años 1980.
- Índice SCHIMAZEK (F), 1970.

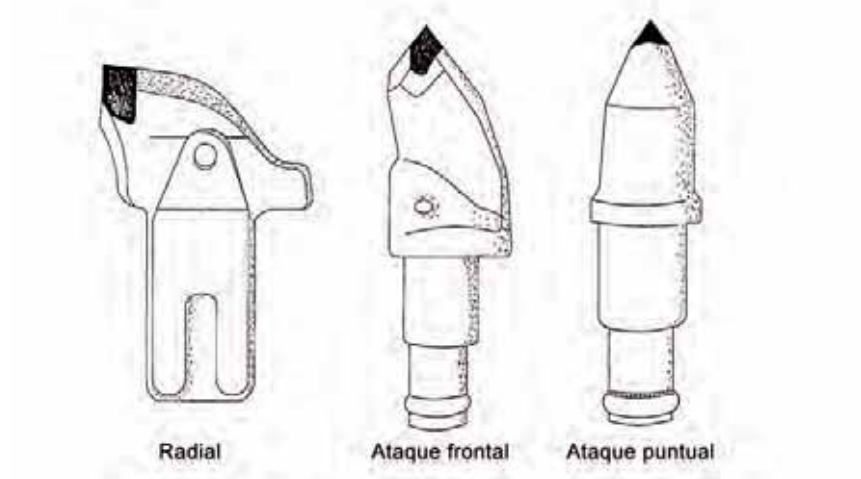


Figura 7. Tipo de herramientas de corte (picas)

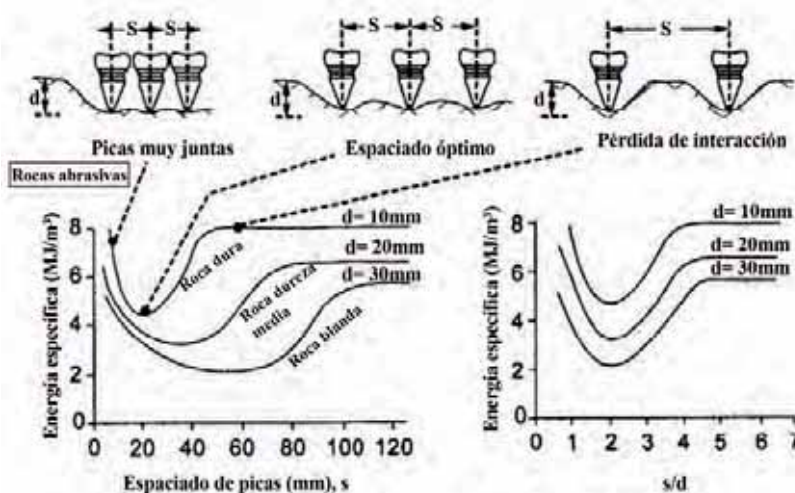


Figura 8. La influencia del espaciado de picas (s) en el consumo de la energía específica (SE) en la excavación con rozadora

| Tabla 5.- Índice CAI/Abrasividad de la roca. Verneuil, 1986 |                         |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------|
| CAI                                                         | Clasificación           |
| 0,3 – 0,5                                                   | No muy abrasivo         |
| 0,5 – 1,0                                                   | Ligeramente abrasivo    |
| 1,0 – 2,0                                                   | Abrasividad media       |
| 2,0 – 4,0                                                   | Muy abrasivo            |
| 4,0 – 6,0                                                   | Extremadamente abrasivo |

- Índice (ABR), ensayo LCPC, Francia años 1970.
- Índice de abrasividad (RAI), 2002.

### 7.1. Índice Cerchar (CAI)

Este índice se determina mediante el ensayo normalizado CERCHAR.

Es muy utilizado y clasifica las rocas por

| Tabla 6.- Índice CAI/Abrasividad de la roca. Restner 2007 |                            |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------|
| CAI                                                       | Clasificación              |
| < 0,5                                                     | No abrasivo                |
| 0,5 – 1,0                                                 | Poco abrasivo              |
| 1,0 – 1,3                                                 | Moderadamente abrasivo     |
| 1,3 – 1,8                                                 | Considerablemente abrasivo |
| 1,8 – 2,3                                                 | Abrasivo                   |
| 2,3 – 3,0                                                 | Muy abrasivo               |
| 3,0 – 4,5                                                 | Altamente abrasivo         |
| > 4,5                                                     | Extremadamente abrasivo    |

su abrasividad. Hay dos clasificaciones, la primitiva de Verneuil (1986) y la de Restner, 2007 (*tablas 5 y 6*).

La clasificación de los tipos de roca según el índice (CAI) se indica en la *figura 9* (ver página siguiente).

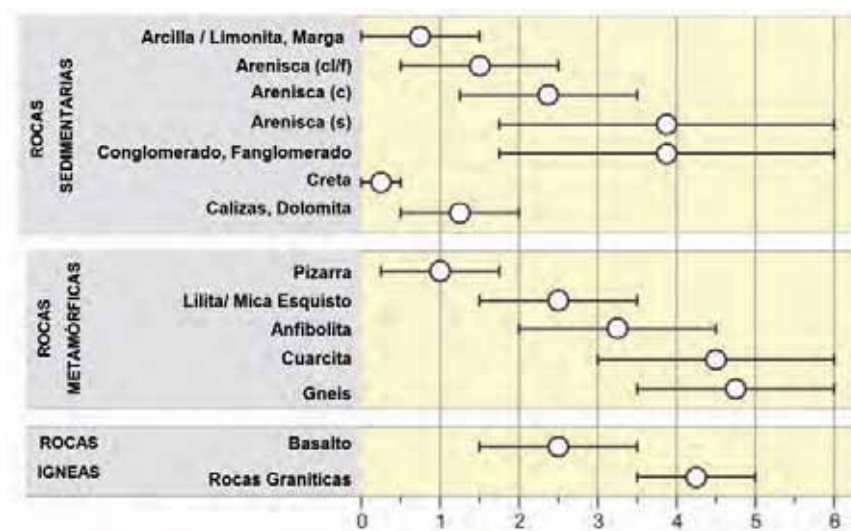


Figura 9. Clasificación de las rocas / Índice CAI

## 7.2. Índice Schimazek (F)

$$F = \frac{V \times d \times t}{100} \quad (6)$$

- $V$  % de minerales abrasivos en volumen.  
 $d$  Diámetro medio de los granos de cuarzo (mm) o, en ausencia de cuarzo, el diámetro del principal mineral duro.  
 $t$  Resistencia a tracción (MPa), (ensayo brasileño).

Según el valor del índice  $F$  la rozabilidad de las rocas será:

Rocas fácilmente rozables:

$F = 0,06$  kN; desgastes ligeros.

Rocas rozables satisfactoriamente:

$F = 0,42$  kN; desgastes moderados.

Rocas rozables:

$F = 0,5-0,6$  kN; desgastes elevados.

Rocas rozables con dificultad:

$F > 0,6$  kN; desgastes muy elevados.

Tabla 8. Abrasivas de las rocas / Índice ABR / AFNOR (1990)

| ABR [g/t]     | Clasificación        |
|---------------|----------------------|
| < 500         | Muy baja abrasividad |
| 500 – 1 000   | Baja abrasividad     |
| 1 000 – 1 500 | Abrasividad media    |
| 1 500 – 2 000 | Alta abrasividad     |
| > 2 000       | Muy alta abrasividad |

Tabla 9. Abrasivas de las rocas / Índice TUM / Thuro *et al* 2006

| ABR [g/t]     | Clasificación           |
|---------------|-------------------------|
| 0 – 50        | No abrasivo             |
| 50 – 100      | Ligeramente abrasivo    |
| 100 – 250     | Poco abrasivo           |
| 250 – 500     | Abrasivo                |
| 500 – 1 250   | Muy abrasivo            |
| 1 250 – 2 000 | Extremadamente abrasivo |

Para determinar  $V$ , al contenido de los diversos minerales abrasivos, expresado en tanto por ciento volumen, se le aplica un factor de corrección basado en la dureza - ROSIVAL (tabla 7).

## 7.3. Ensayo LCPC; índice ABR (g/t)

El índice ABR se determina con el ensayo LCPC Abroy, diseñado inicialmente

para estimar la abrasión que sufren las máquinas machacadoras de rocas.

Realizando el ensayo según la norma AFNOR 1990, se obtiene una clasificación de la abrasividad de las rocas en función del índice ABR (tabla 8).

Utilizando la metodología desarrollada por la Universidad de Munich TUM 2006, se obtiene otra clasificación de la abrasividad de las rocas (Thuro *et al* 2006) (tabla 9).

## 7.4. Índice de abrasividad RAI (2002)

Es un nuevo índice de abrasividad propuesto por Plinninger (2002); es fácil de calcular.

$$RAI = \sigma_c EQC \quad (7)$$

$\sigma_c$  Resistencia a compresión de la roca.  
 $EQC$  Contenido equivalente en cuarzo en la roca.

$$EQC = \sum_{i=1}^n A_i R_i$$

$A_i$  Contenido de cada mineral (%).

$R_i$  Abrasividad relativa ROSIWA en %,  $R_{\text{cuarzo}} = 100\%$ .

A cada mineral se le asigna un factor de ponderación (tabla 10).

Tabla 7. Factores de corrección para determinar el índice F

| Mineral              | Contenido % en volumen | Factor de conversión | %             |
|----------------------|------------------------|----------------------|---------------|
| Cuarzo               | a %                    | 1,00                 | a %           |
| Feldespato           | b %                    | 0,3                  | 0,3 b %       |
| Minerales arcillosos | c %                    | 0,04                 | 0,04 c %      |
| Carbonatos           | d %                    | 0,03                 | 0,03 d %      |
|                      | 100 %                  |                      | $V = \sum \%$ |

Tabla 10. Factores de ponderación de distintos minerales. (Abrasividad relativa ROSIWA)

|             |     |             |     |               |       |
|-------------|-----|-------------|-----|---------------|-------|
| Coridón     | 770 | Espinela    | 342 | Feldespato    | 30-33 |
| Circonio    | 332 | Granate     | 186 | Hornablenda   | 23    |
| Andalucita  | 159 | Topacio     | 134 | Adularia      | 23    |
| Casiterita  | 123 | Rutilo      | 117 | Escapolita    | 14    |
| Cuarzo      | 100 | Turmalina   | 92  | Aragonito     | 6,3   |
| Estaurolita | 75  | Olivino     | 72  | Calcita       | 4,9   |
| Epidota     | 58  | Vesuviana   | 56  | Apatita       | 4,5   |
| Piroxenos   | 56  | Hematita    | 51  | Fluorita      | 4,5   |
| Pirita      | 50  | Cianita     | 49  | Filosilicatos | 4     |
| Titanita    | 43  | Cordierita  | 41  | Carbonatos    | 3     |
| Boncita     | 36  | Leucita     | 36  | Biotita       |       |
| Feldespato  | 35  | Labradorita | 33  | Muscovita     | 3,6   |
| Ortoclasa   | 33  | Magnetita   | 31  | Clinocloro    | 1,8   |
| Hipersteno  | 31  | Oligoclasa  | 30  | Clorita       | 1     |
|             |     |             |     | Talco         | 0,6   |
|             |     |             |     | Yeso          | 0,5   |

La abrasividad de las rocas utilizando los índices CAI y F se indican en la *tabla 11*.

La correlación entre ambos índices se establece mediante las expresiones:

$$CAI = 2,9 \times F^{0,347}$$

$$F = 0,046 \times CAI^{2,88}$$

## 8. Desgaste de las herramientas de corte

El desgaste o la rotura de las picas depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- Abrasividad de la roca
- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción
- Tenacidad  $\left( \frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right)$
- Calidad del diseño y del material de la pica y diámetro de la punta de widia.
- Estado tensional del macizo rocoso.
- Eficacia de la inyección de agua para refrigerar las picas.
- Revoluciones de la cabeza de corte.

La estimación del desgaste de picas en rocas duras y abrasivas tiene una importancia económica muy relevante por su repercusión en el costo de excavación.

Hay distintos modos de relacionar los desgastes de las herramientas de corte con determinados parámetros e índices de abrasividad.

### 8.1. Utilizando el Índice de Cerchar (CAI)

Se utilizan ecuaciones empíricas y correlaciones obtenidas de casos prácticos. El desgaste de picas de punta de ataque (picas/m³) se estima en relación con la resistencia a compresión de la roca ( $\sigma_c$  Mpa) y el valor del índice CAI (*figura 11*).

Otro tipo de estimaciones de base estadística referidas a picas de punta de widia se han realizado en función del valor del índice CAI (Thuro – Plinninger 2007) (*Tabla 12*).

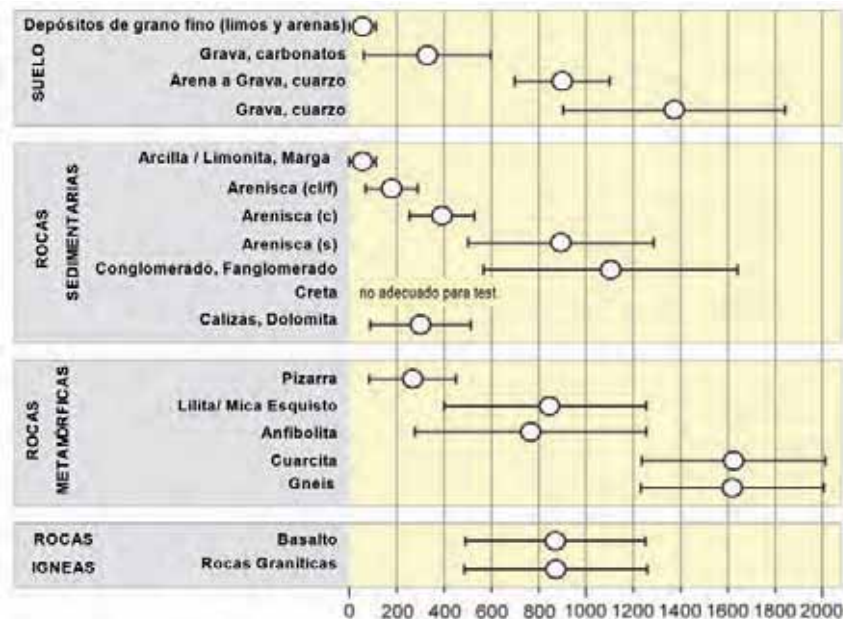


Figura 10. Valores del índice ABR para diferentes tipos de roca (ensayo LCPC, Thuro *et al*, 2006)

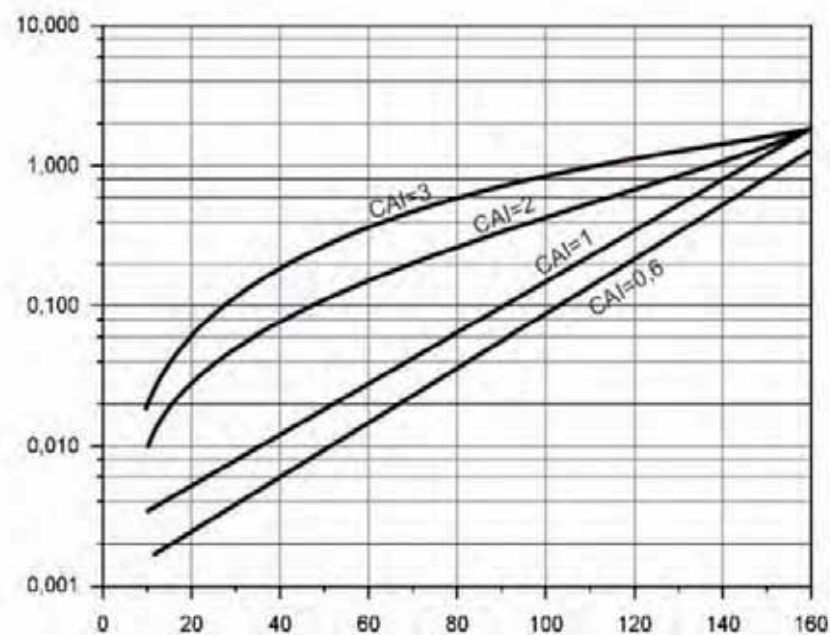


Figura 11. Consumo de picas de punta de widia / Índice CAI (Viest Alpine)

Tabla 11. Abrasivas de las rocas / Índice CAI (Cerchar), índice F (Schimazek)

| Clasificación              | F           | CAI       | Ejemplo                |
|----------------------------|-------------|-----------|------------------------|
| No abrasiva                | <0,01       | <0,5      | Marga, yeso            |
| Poco abrasiva              | 0,01 – 0,05 | 0,5 – 1,0 | Marga arenosa          |
| Moderadamente abrasiva     | 0,05 – 0,10 | 1,0 – 1,3 | Lutita arenosa         |
| Considerablemente abrasiva | 0,10 – 0,25 | 1,3 – 1,8 | Limonita               |
| Abrasiva                   | 0,25 – 0,50 | 1,8 – 2,3 | Arenisca suave         |
| Muy abrasiva               | 0,50 – 1,00 | 2,3 – 3,0 | Basalto, arenisca dura |
| Altamente abrasiva         | 1,00 – 3,50 | 3,0 – 4,5 | Gneiss                 |
| Extremadamente abrasiva    | > 3,50      | > 4,5     | Granito, cuarcita      |

Tabla 12. Abrasividad / Índice CAI / Consumo específico de picas

| PICAS DE PUNTO DE ATAQUE |            |                                        |
|--------------------------|------------|----------------------------------------|
| Abrasividad de la roca   | Índice CAI | Consumo específico de picas (picas/m³) |
| Muy baja                 | 0,3 – 0,5  | < 0,01                                 |
| Baja                     | 0,5 – 1,0  | 0,01 – 0,05                            |
| Moderada                 | 1,0 – 2,0  | 0,05 – 0,15                            |
| Alta                     | 2,0 – 3,0  | 0,15 – 0,3                             |
| Muy alta                 | 2,0 – 4,0  | 0,3 – 0,5                              |
| Extrema                  | 4,0 – 6,0  | > 0,5                                  |
| Cuarcita                 | 6,0 – 7,0  |                                        |

## 8.1.1. El Índice CAI, la resistencia $\sigma_c$ de la roca y el consumo de picas

R. J. Plinninger ha construido un ábaco para determinar el desgaste de picas de punto de ataque con un diámetro de la punta de widia de 22 mm de alta calidad, utilizando la resistencia a compresión de la roca ( $\sigma_c$  MPa) y el índice CAI entre valores 0,5 – 4,5. (Figura 12).

## 8.2. Utilizando el Índice RCI y el consumo de picas

- De acuerdo con H. Coper *et al* el desgaste de picas se puede estimar utilizando la siguiente ecuación de predicción:

$$BCR = 897,06 (RCI)^2 + 6,1769 (RCI) \quad (8) \text{ H. Coper et al}$$

$$RCI = \sigma_c / P \times W \times CHD$$

$$BCR = \text{Consumo de picas (picas/m}^3\text{)}$$

$$\sigma_c = \text{Resistencia a compresión de la roca (MPa)}$$

$$P = \text{Potencia cabeza de corte (kW)}$$

$$W = \text{Peso de la rozadora (t)}$$

$$CHD = \text{Diámetro de la cabeza de corte (m)}$$

- Thuro – Plinninger (2003) han desarrollado la ecuación de predicción del desgaste de picas, válida para conglomerados, margas, calizas, filitas y mármoles.

$$\text{Desgaste (m/pica)} =$$

$$3131 - 624 \ln EQC(\%) \quad (9)$$

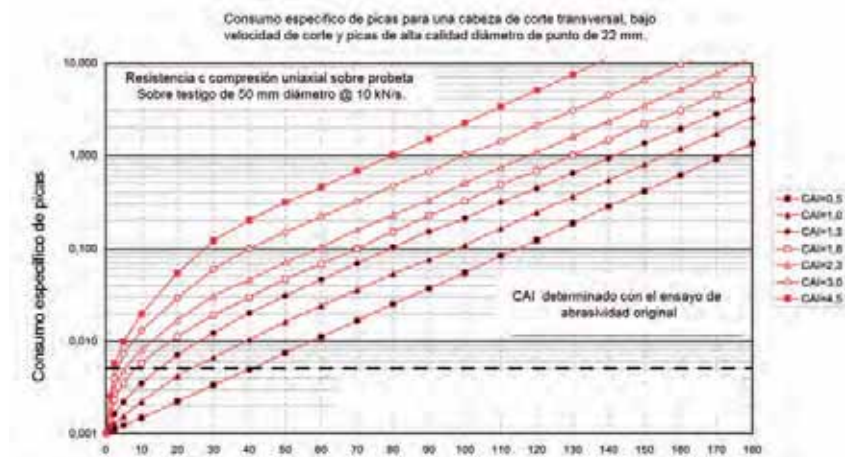


Figura 12. Resistencia a compresión uniaxial (MPa)-

$EQC$  = Contenido equivalente en cuarzo (%)  $EQC$  (%)

## 9. Rendimientos de rozado

El rendimiento neto de excavación con rozadora (REXD) es uno de los parámetros que exige una adecuada y fiable predicción puesto que es esencial para determinar el costo del m<sup>3</sup> de excavación.

Se puede calcular mediante la expresión

$$R_{EXD} = C_E * C_D * (1 - C_1) * n * R_I \quad (10) \text{ L. Cornejo, 1988}$$

$$R_{EXD} = \text{Rendimiento de excavación/día en m}^3 \text{ (sobre perfil).}$$

$$C_E = \text{Coeficiente de eficiencia.}$$

$R_I$  = Rendimiento instantáneo de excavación en m<sup>3</sup>/hora (sobre perfil).

$n$  = Número de horas trabajadas al día.

$C_1$  = Coeficiente de tiempos muertos, que representa el tiempo perdido en cada relevo.

$C_D$  = Coeficiente de tiempo disponible para la excavación.

Para estimar  $R_{EXD}$  es necesario determinar previamente el rendimiento instantáneo de excavación o rozado.

Para estimar el rendimiento instantáneo  $R_I$  pueden utilizarse diferentes expresiones con diversos índices. En las expresiones siguientes el rendimiento instantáneo de excavación o de rozado, se expresa indistintamente como  $R_I = ICR \text{ m}^3/h$ .

### 9.1. Determinación del ICR considerando el Índice de rozabilidad del macizo rocoso (RMCI), la resistencia a compresión de la roca $\sigma_c$ y el $RQD$

$$ICR (\text{m}^3/h) = 0,28 \times P (0,97h)^{RMCI}$$

$$(11) \text{ Bilgin et al, 1996}$$

$P$  = Potencia de la cabeza de corte (HP)

$$RMCI = \sigma_c \left( \frac{RQD}{100} \right)^{2/3};$$

índice de rozabilidad del macizo rocoso.

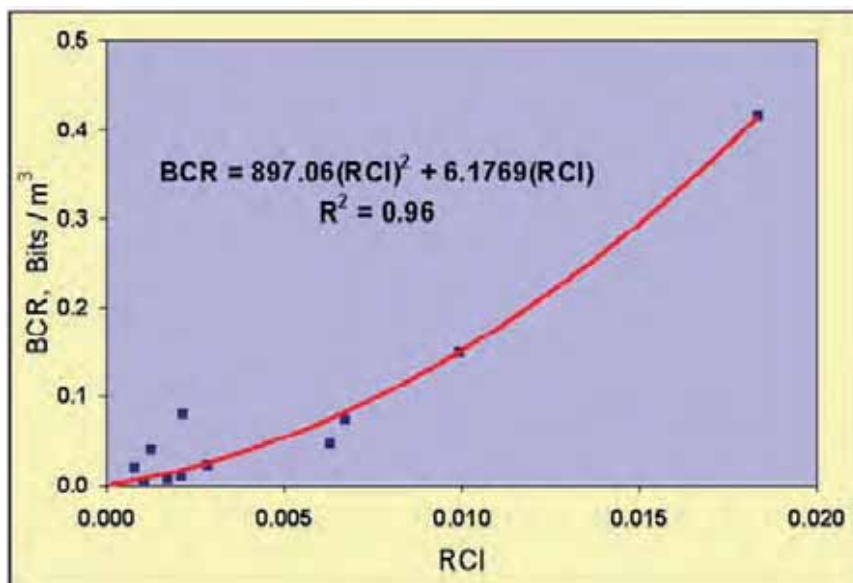


Figura 13. Consumo de picas / índice RCI



Figura 14. Determinación del trabajo específico de destrucción  $W_z$

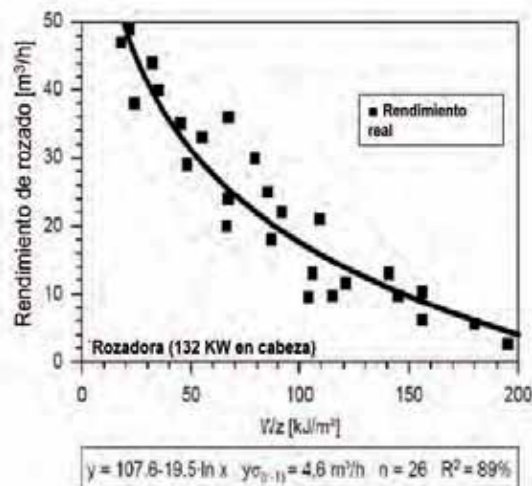


Figura 15. Rendimiento de roza/ $W_z$ . Túnel Zeulenroda (26 ensayos, pizarras arcillosas y cuarcitas) Thuro

## 9.2. Determinación del ICR en función del Índice de penetración de la rozadora (RPI)

$$ICR(m^3/h) = 27,511 e^{0,0023(RPI)}$$

(12) Coper *et al*, 1998.

Válido para rocas evaporíticas y rozadoras con cabezal transversal

$RPI = P \times W / \sigma_c$  = Índice de penetración de la rozadora

$P$  = Potencia de la rozadora en kW

$W$  = Peso de la rozadora en t

## 9.3. Determinación del rendimiento instantáneo de roza utilizando el trabajo de destrucción (Thuro)

$$Ri(m^3/h) = 107,6 - 19,5 \ln W(z) (K J/m^3) \quad \dots (13)$$

Potencia C.C. de la rozadora 132 kW.

$W_z$  = Trabajo específico de destrucción ( $K J/m^3$ ).

El trabajo específico de destrucción  $W_z$  se determina realizando ensayos tensión-deformación sobre una probeta de roca sometida a compresión simple (figura 14).

En la figura 15 se presentan los resultados, de 26 ensayos realizados por Thuro en el túnel de Zeulenroda, de los rendimientos instantáneos de roza en  $m^3/h$  en función del índice  $W_z (K J/m^3)$ .

## 9.4. Determinación del rendimiento instantáneo de roza utilizando el consumo específico de energía (SE)

$$Ri(m^3/h) = K \frac{P(KW)}{SE(KWh/m^3)} \quad (14)$$

$P$  = Potencia de la máquina kW

$SE$  = Energía específica kWh/ $m^3$

$K$  = Índice de transferencia de energía (Energy Transfer ratio)

$K = 0,8$  para cabezas de corte tipo "milling"

## 9.5. Determinación del rendimiento instantáneo de roza en función de la resistencia a compresión de la roca ( $\sigma_c, MPa$ )

$$Ri(m^3/h) = 75,7 - 14,3 \ln \sigma_c \quad (15) \text{ (Thuro - Plinninger, 2003);}$$

Para  $P = 130$  kW

## 9.6. Determinación del rendimiento instantáneo de roza en función de la resistencia a compresión simple de la roca $\sigma_c$ y de la potencia de la cabeza de corte

$$L^* = \frac{K_1 \times K_2 \times K_3}{\sigma_c} N$$

(16) .... Gehring, 1992

$L^*$  = Producción instantánea o rendimiento medio de roza (cm/h)

$N$  = Potencia de la cabeza de corte (kW)

$K_L$  = cortabilidad/rozabilidad relativa de la roca intacta,

= 6 para rocas muy tenaces y rocas plásticas

= 7 para roca dura y plástica

= 8 para roca de dureza media

= 9 para roca frágil

= 10 para roca muy frágil

= 10-15 para carbón

$K_z$  = influencia de la discontinuidad (juntas, estratos, etc.)

=1 para roca masiva con discontinuidades > 25 cm

=1.5-2 para rocas estratificadas/fisuradas/lecho de rocas más fino, discontinuidad 10-25 cm

= 2.5 para roca interestratificada/agrietada/en capas. Discontinuidad < 5 cm

$K_3$  = Influye en la condición específica de corte. Es una función que no tiene en cuenta la socavación, ni la altura de corte, ni la oscilación de la cabeza de corte, ni los cambios de picas, ni la substitución del tipo de pica. No obstante, para la rozadora su valor abarca desde 3,5 a 4,5.

Gehring clasificó la roca para la aplicación de TBM y rozadoras basándose en el Índice de Cortabilidad de Roca de Voest-Alpine (VARCI) como se muestra en la tabla 13 de la página siguiente.

Tabla 13. Selección de TBM y rozadoras basado en VARCI (Gehring, 1980)

| VARCI (mm) | Cortabilidad con TBM                                             | Cortabilidad con rozadora                                                                                 |
|------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <0,5       | Rendimiento moderado                                             | No se aplica                                                                                              |
| 0,5-0,8    | Rendimiento normal a bueno                                       | Se aplica sólo cuando la roca se encuentra en una única capa fina                                         |
| 0,8-1,5    | Mejor rango de aplicación                                        | Rozable con máquinas pesadas y con robustas picas cónicas                                                 |
| 1,5-2,5    | Solo para TBM con cortadoras de disco                            | Máquinas de peso medio con picas cónicas                                                                  |
| 2,5-5,0    | Ruedas con picas cónicas, cortadoras de disco para roca abrasiva | Máquinas de peso medio y ligero, picas cónicas / picas de tipo de arrastre, mejor cobertura de aplicación |
| 5,0-10,0   | Aplicación de TBM sólo en versión escudo con picas de arrastre   | Máquina de peso medio y ligero, picas de tipo de arrastre finas y cónicas                                 |

(Nota: Las rozadoras de servicio de tipo pesado y medio varían de 50 a 80 tipos de toneladas y de 23 a 50 tipos de toneladas respectivamente.)

Tabla 15. Coeficiente de eficiencia (L. Cornejo, 1988)

| Grado | Condiciones de Trabajo                                  | Coeficiente de eficiencia |
|-------|---------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1     | Buenas condiciones en la solera. Se produce poco polvo. | 1                         |
| 2     | Solera en malas condiciones. Poco polvo.                | 0,86                      |
| 3     | Mucho polvo a veces hay que interrumpir el trabajo.     | 0,69                      |
| 4     | Solera en malas condiciones. Mucho polvo.               | 0,52                      |

## 9.7. Rendimiento real de excavación con rozadora

Una vez estimado el rendimiento instantáneo de corte de una rozadora utilizando alguna de las ecuaciones de predicción anteriormente indicadas, el valor obtenido se afectará de los coeficientes  $C_E$ ,  $C_D$ ,  $C_P$ ,  $(1-C_I)$  y  $n$  de la expresión utilizando las tablas 14 y 15 para obtener el rendimiento de excavación esperable.

## 10. Criterios para estimar la rozabilidad o excavabilidad de las rocas

Pueden utilizarse varios criterios para estimar la excavabilidad de las rocas con rozadora.

### 10.1. Energía específica

Unos de los parámetros más utilizados es la energía específica mediante el ensayo

Tabla 16. Selección de rozadoras basada en ensayos de laboratorio. Energía específica

| Valor superior de energía específica de laboratorio (MJ/m³) |                       | Rendimiento generalizado del corte                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Máquina pesada                                              | Máquina de tipo medio |                                                                                                                                                        |
| 25-32                                                       | 15-20                 | La máquina puede cortar de una manera económica con un espesor de estrato duro (<0,3 m)                                                                |
| 20-25                                                       | 12-15                 | Mal rendimiento de corte. La herramienta de ataque puntual puede conseguir una velocidad baja y beneficiosa, el motor de corte mejorará su estabilidad |
| 17-20                                                       | 8-12                  | Rendimiento de moderado a bajo. Si se usa con frecuencia con picas para rocas abrasivas, se cambiarán con frecuencia.                                  |
| 8-17                                                        | 5-8                   | Rendimiento del corte de moderado a bueno con un bajo desgaste de la máquina.                                                                          |
| <8                                                          | <5                    | Avance y productividad elevadas                                                                                                                        |

Tabla 17. Clasificación de los parámetros de la nueva clasificación de cortabilidad del macizo rocoso

| Tipo                                                                 | I         | II        | III       | IV        | V        |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Índice de carga puntual ( $I_{s50}$ )                                | < 0,5     | 0,5 – 1,5 | 1,5 – 2,0 | 2,0 – 3,5 | > 3,5    |
| Clasificación ( $I_g$ )                                              | 5         | 10        | 15        | 20        | 25       |
| Volumen específico de juntas ( $n^{\circ}/m^3$ )                     | > 30      | 30 – 10   | 10 – 3    | 3 – 1     | 1        |
| Clasificación ( $J_v$ )                                              | 5         | 10        | 5         | 20        | 25       |
| Abrasividad                                                          | < 0,5     | 0,5 – 1,0 | 1,0 – 2,0 | 2,0 – 3,0 | > 3,0    |
| Clasificación ( $A_w$ )                                              | 3         | 6         | 9         | 12        | 15       |
| Dirección del corte respecto a la dirección de la diaclasa principal | 72° - 90° | 54° - 72° | 36° - 54° | 18° - 36° | 0° - 18° |
| Clasificación ( $J_s$ )                                              | 3         | 6         | 9         | 12        | 15       |
| Potencia de la máquina (kW)                                          | > 1 000   | 800-1 000 | 600 – 800 | 400 – 600 | < 400    |
| Clasificación (M)                                                    | 4         | 8         | 12        | 16        | 20       |

en laboratorio (*core cuttability test*, Roxborough 1987).

### 10.2. Determinación de la rozabilidad de una roca utilizando el índice de corte (*cuttability index*) IC

Tabla 14. Coeficiente de tiempo disponible (L. Cornejo, 1988)

| $C_D$ | Condiciones de Trabajo                                                                                                                      |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10%   | Condiciones pésimas                                                                                                                         |
| 20%   | Terrenos malos con varias fases de ejecución realizadas con la misma rozadora, en los que se coloca un sostenimiento sistemático importante |
| 50%   | Cuando se trabaja por un frente en una sola fase y con un sostenimiento de cuantía ligera                                                   |
| 85%   | En condiciones óptimas sin ningún impedimento para el trabajo de la máquina. (Situación no real)                                            |

Se utiliza la expresión:

$$CI = I_s + J_v + A_w + J_s + M \quad (17). \text{Greminger, 1982.}$$

Los cinco parámetros se obtienen de la clasificación de rocas relativa a su rozabilidad utilizando la *tabla 17*.

Si el tamaño de la muestra sometido al ensayo "point load" no es de 50 mm, al índice de carga *point load* obtenido debe aplicarse un factor de corrección  $F = (\frac{\phi}{50})^{0.45}$ ;  $I_{50} = FI_S$ ;  $I_S$  es el "índice *point load*" de la muestra.

En función del índice CI, se determina la excavabilidad de la roca (tabla 18).

Tabla 18. Valoración de la excavabilidad de las rocas / Índice de cortabilidad (CI).

| Índice de Excavabilidad | Posibilidad de escombros                     |
|-------------------------|----------------------------------------------|
| 50>CI                   | Excavación muy fácil                         |
| 50<CI<60                | Excavación fácil                             |
| 60<CI<70                | Excavación económica                         |
| 70<CI<80                | Excavación difícil, puede no ser económica   |
| CI>80                   | Se deberían utilizar rozadoras de superficie |

## 11. Limitaciones al uso de la excavación mecánica de túneles con rozadora

### 11.1. Resistencia a compresión de la roca

El método de excavación por corte de la roca de las rozadoras tiene sus propios límites por el mismo principio de excavación y la magnitud de las fuerzas generadas por la máquina y aplicadas a la roca.

Para que se produzca la rotura de la roca, es necesario que primeramente se produzca la indentación de las picas dentro de ésta. Cuando la roca tiene una resistencia a compresión y una tenacidad excesivas las rozadoras, aún las más pesadas, no pueden aportar la fuerza de empuje ( $F_N$ ), necesaria para que se produzca esta indentación. En estas condiciones el rendimiento de la máquina será muy bajo y hará que el método de excavación no sea económicamente rentable. Se considera un rendimiento no rentable cuando baja a valores de 10-13 m³/h. sobre perfil. Esto sucede en rocas que superen los 100 MPa de resistencia a compresión. En determinadas circunstancias muy favorables (fracturación intensa de la roca, alteración de la roca, estratificación favorable y valores de RQD<60) y utilizando las rozadoras más potentes y pesadas (>300 kW, >120 t), se

podría llegar a excavar rocas de hasta 150 MPa.

### 11.2. Nuevas máquinas y herramientas de corte

El objetivo para los próximos años es poder excavar rocas con rozadora de hasta 200 MPa. Este objetivo se conseguirá construyendo máquinas más potentes y pesadas (500 kW, 150 t) y sustituyendo las picas "point attack" por minidiscos (EMI, Escuela de Minas de Colorado), que permiten aplicar una mayor fuerza de empuje ( $F_N$ ) y obtener un mayor rendimiento de excavación (m³/h) con un menor desgaste de las herramientas de corte (mini-discos).

### 11.3. Abrasividad de las rocas

Otro aspecto importante es el relativo a la abrasividad de las rocas que, fundamentalmente, depende del contenido equivalente en cuarzo (%) y de la trabazón o unión entre los granos.

La abrasividad de las rocas produce en las picas desgastes por rozamiento con pérdida de metal; estos desgastes serán tanto mayores cuanto mayor sea la abrasividad de la roca, expresada por los índices CAI, F, ABR y RI.

Una roca muy abrasiva (CAI=2,3-3) producirá un desgaste de 0,3-0,5 picas/m³, mientras que una roca altamente abrasiva (CAI=3-4,5) producirá un desgaste de picas >0,5 picas/m³. El límite económico puede alcanzarse con un desgaste de 1 pica/m³.

#### A. Rotura frágil de las picas

Al consumo de picas por abrasión se le sumará las roturas frágiles de las picas al golpear las rocas muy duras ( $\sigma_c > 90 \text{ MPa}$ ).

#### B. Consumo de picas

El consumo de picas, sumando estos dos efectos, puede llegar a incrementarse hasta valores muy elevados, que puede hacer económicamente inviable el uso de la rozadora (Túnel de Nuremberg, 3,96 picas/m³, Thuro).

La rotura frágil de las picas se ve incrementada notablemente cuando se excava un frente mixto en el que en rocas blandas se intercalan capas finas de roca

muy dura ( $\sigma_c > 100 \text{ MPa}$ ); las capas de cuarcita que en ocasiones pueden ir intercaladas en espesores de varios centímetros entre capas de rocas blandas ( $\sigma_{media} = 50 \text{ MPa}$ ), pueden alcanzar valores de ( $\sigma_c = 130 - 230 \text{ MPa}$ ).

Las roturas de las picas en rocas duras se incrementa también cuando, al no producirse la indentación adecuada, el rozamiento pica-roca genera una alta temperatura que reblandece el acero y la vida de la pica, facilitando su rotura. En este punto es importante la refrigeración de las picas mediante chorro de agua orientado.

### 11.4. Consistencia de los materiales excavados

También puede resultar inadecuada la elección del método de excavación con rozadora en determinadas circunstancias.

#### a) Arcillas y limos húmedos

Cuando en el frente del túnel aparecen arcillas o limos húmedos, el giro de la cabeza de corte puede producir el amasado del terreno, quedando la cabeza de corte recubierta de una capa de arcilla que la impide excavar; si este fenómeno es puntual se elimina manualmente la capa de barro y se prosigue el trabajo.

Si este fenómeno es persistente, será necesario retirar la rozadora sustituyéndola por otro medio de excavación (excavación mecánica puntual con máquina retro y cuchara de excavación con dientes)

Cuanto mayor es el porcentaje de arcillas dentro de la matriz rocosa, menores serán los rendimientos de excavación con rozadora. Esta disminución del rendimiento se acentúa con valores de materiales arcillosos superiores al 50% (Thuro).

#### b) Cuando en un frente mixto de excavación aparecen arcillas o limos en grandes proporciones y arenas con agua, la mesa de carga de la rozadora no puede alimentar la cinta de carga con estos materiales debido a su fluidez.

Este mismo problema puede suceder también en frentes mixtos con capas de arcillas y areniscas blandas en presencia de agua que, al ser excavadas, se convierten en arenas, originándose

la misma problemática anteriormente descrita.

- c) Reducción del rendimiento en túneles en pendiente

El efecto de la pendiente en la solera del túnel produce la reducción del tiempo útil de excavación y, por tanto, de su rendimiento.

En funcionamiento adecuado el tiempo útil dedicado a la excavación con la rozadora, está en el entorno del 30-38% del tiempo total del ciclo; en un túnel con pendiente significativa se puede reducir al 8%.

- d) Soleras en terrenos blandos con agua  
En estas condiciones, se dificultan los desplazamientos de la máquina; las orugas se hunden en el terreno; se pueden producir averías en el tren de desplazamiento de la máquina e inestabilidades en su funcionamiento.  
Estas dificultades afectan notablemente también a los rendimientos de excavación.

## 12. Ventajas de utilizar la excavación mecánica puntual con máquina rozadora

Dentro del campo de utilización recomendable para este tipo de máquinas, su uso como procedimiento de excavación presenta varias ventajas:

1. Menor costo de inversión que una tuneladora.
2. Mayor versatilidad que una tuneladora; puede realizar una excavación de cualquier tamaño y forma. Permite la excavación secuencial por fases de grandes secciones en terrenos blandos.
3. Menores costos de traslado e implantación en obra que una tuneladora.
4. No daña la roca circundante, mejorando su estabilidad en relación con el método de perforación y voladura.
5. Las sobre-excavaciones son mínimas en relación con el método de perforación y voladura, produciendo una sección de perímetro más regular y más estable.
6. No hay incremento en el volumen de hormigón de revestimiento al no existir

sobre-excavaciones, si se compara con las sobre-excavaciones que se producen con el uso de explosivos; estas sobre-excavaciones pueden dar lugar a volúmenes de hormigón muy superiores a los teóricos, pudiendo llegar a superar el doble del teórico.

7. Método de excavación más seguro y ausencia de vibraciones con relación al método de perforación y voladura.

## 13. Conclusiones

La decisión en la elección del método de excavación con rozadora y en el tipo de máquina más adecuado puede entrañar grandes riesgos económicos. Por esta razón su elección debe ser cuidadosamente analizada para que sea acertada.

Es necesario disponer de datos geológicos suficientes relativos a las rocas existentes y realizar estudios estadísticos relativos a la dureza a compresión simple de la roca, a su tenacidad (contenido equivalente en cuarzo C%), así como al grado de fracturación, meteorización, estratificación de las diferentes rocas existentes, y a la presencia de agua del contenido de materiales arcillosos o limosos y de frentes mixtos con estratos de resistencias y abrasividades muy diferentes.

Los materiales más adecuados para ser excavados con rozadoras son las rocas, principalmente sedimentarias de una resistencia a compresión moderada (40-50 MPa) y una abrasividad también moderada ( $CAI = 1-1,3$ ;  $F = 0,05-0,1$ ).

1. Los límites económicos de excavación con las rozadoras actuales pueden establecerse en:

- a) Rocas masivas:  $\sigma_c \leq 100 \text{ MPa}$ ;  $CAI = 2,3-3$ ;  $F = 0,5-1$ ;  $0,15-0,3 \text{ picas/m}^3$ .

En el entorno de estos límites es necesario utilizar rozadoras muy pesadas con cabezal de corte frontal,  $P \leq 120 \text{ t}$ ;  $W(c.c.) \geq 300 \text{ kW}$ ; picas *point attack* muy robustas.

- b) Rocas muy fracturadas, estratificadas, alteradas:  $\sigma_c \leq 160 \text{ MPa}$ ;  $CAI = 2,3-3$ ;  $F = 0,5-1$ ;  $0,15-0,3 \text{ picas/m}^3$ ;  $ROD < 60$ .

Debe utilizarse el mismo tipo de ro-

zadora indicado anteriormente.

2. Las circunstancias en las que no debe optarse por el uso de una máquina rozadora para la excavación de túneles son:

- a) Cuando se presuma la existencia de frentes de excavación mixtos de estratos de rocas blandas ( $\sigma_c < 20 \text{ MPa}$ ) con intercalación de estratos rocosos muy duros ( $\sigma_c > 120 \text{ MPa}$ ) de espesores significativos.

En estas circunstancias el consumo de picas puede llegar a superar 4 picas/m<sup>3</sup> y el rendimiento de excavación reducirse hasta 13 m<sup>3</sup>/h sobre perfil (Túnel Altenberg Thuro) por debajo del rendimiento económico. Se consideran rendimientos adecuados valores entre 30-35 m<sup>3</sup>/h sobre perfil.

- b) En túneles en arcillas y/o limos con suficiente humedad, puede producirse el amasado de la arcilla y formarse pegotes de ésta que pueden recubrir la cabeza de corte, dejándola inoperante.
- c) En túneles con frentes mixtos con agua en arcillas o limos con intercalaciones de capas de areniscas blandas o de arenas.

En el caso de las arcillas y arenas con agua, no será posible cargar el material a la cinta de desescombro de la máquina; en arcillas y areniscas blandas, al ser éstas excavadas, se producirán arenas que no se podrán cargar.

- d) En túneles con pendientes significativas, puede reducirse el tiempo real de rozado por debajo del 10% del tiempo total del ciclo, obteniendo unos rendimientos que hacen no económica la excavación.

- e) En túneles con agua en suelos blandos, la movilidad de la máquina puede quedar muy reducida. La máquina se hundirá en el barro pudiendo provocar averías en el sistema de traslación. En posición de trabajo, en estas circunstancias, la máquina puede presentar también problemas de estabilidad durante su funcionamiento. ❖