

# Laboreo I

## Bloque I. Perforación



**Rubén Pérez Álvarez**  
**Noemí Barral Ramón**

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES Y TECNOLOGÍA DE  
PROYECTOS Y PROCESOS

Este material se publica con licencia:

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



## BLOQUE TEMÁTICO I: PERFORACIÓN

- 1.1. El proceso de exploración minera**
- 1.2. Clasificación de los sondeos**
- 1.3. Generalidades de la perforación**
- 1.4. Perforación rotopercutiva**
- 1.5. Perforación rotativa con tricono**
- 1.6. Perforación rotativa por corte**
- 1.7. Perforación horizontal e hincado de tuberías**
- 1.8. Construcción de galerías y tuberías**
- 1.9. Perforación helicoidal**
- 1.10. Fungibles / Captación de polvo**
- 1.11. Perforación de recubrimiento**
- 1.12. Factores que influyen en los rendimientos de perforación / Cálculo de coste de la perforación**

### INTRODUCCIÓN

- **Proyecto de explotación minera:** aquel en el que se describen las fases a seguir para la extracción de los recursos minerales.
- Para su desarrollo es necesario desarrollar una serie de tareas previas para definir las características del yacimiento a explotar, fundamentalmente la calidad del mineral y su ubicación espacial.
- Calidad de un mineral: cantidad de elementos aprovechables económicamente dentro de la matriz rocosa.
- Características geotécnicas: tienen gran influencia a la hora de seleccionar el método de explotación.
- Es importante conocer la forma del yacimiento y la concentración de mineral en el macizo rocoso de forma que se defina la ley del mineral en cada punto del yacimiento de la forma más precisa posible.

### INTRODUCCIÓN

- Se pueden conocer la forma del yacimiento y el contenido de mineral en un macizo rocoso de dos formas:
  1. Indirecta: por medio del estudio de parámetros inferidos, utilizando las propiedades de los minerales así como de la roca encajante y del macizo rocoso. Se utilizan técnicas de prospección geofísica, geoquímica, etc. Con el fin de conocer cómo se comporta el terreno frente a estímulos de tipo sísmicos, eléctricos, electromagnético, etc...
  2. Directa: estudiando las propiedades de muestras de minerales y rocas, ya sea aprovechando los afloramientos o bien por el estudio de muestras tomadas en profundidad. Para ello es necesario que se conozcan las técnicas de perforación de sondeos y la geología de los posibles yacimientos a estudiar.

### PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA

- Se puede enumerar cuatro etapas de trabajo en una mina (Castilla Gómez & Herrera Herbert):
  - 1. Prospección:** etapa de búsqueda de minerales aprovechables en una zona determinada. Se usan técnicas basadas en estudios geológicos o técnicas basadas en geofísica, geoquímica, etc. Se determinan anomalías del terreno para poder realizar una serie de estudios posteriores más precisos.
  - 2. Exploración:** Se realiza un dimensionamiento del depósito mineral para definir la forma, el contenido del mineral y el valor del depósito (cantidad de mineral extraído de manera rentable).
  - 3. Desarrollo:** definiendo los elementos necesarios para la extracción del mineral y su situación en el lugar más adecuado: infraestructuras necesarias, planta de tratamiento... de forma que no afecte a las fases posteriores.
  - 4. Explotación:** se determinan la sucesión de trabajos necesarios para alcanzar el depósito mineral, la secuencia necesaria y los métodos de extracción del mismo.

### PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN COMO FASES EN LA VIDA DE UNA MINA

Fuente: Hartman  
(1987)

FASE	PROCEDIMIENTO	INTERVALO DE TIEMPO
Prospección	<p>Búsqueda de menas. Métodos de prospección: directo, indirecto. Localización de lugares favorables: mapas, publicaciones, minas antiguas y presentes... Aire: fotos aéreas, imágenes de satélite. Superficie: métodos geofísicos y geológicos. Anomalía- análisis- evaluación.</p>	1 a 3 años
Exploración	<p>Dimensión y valor del depósito mineral. Muestreo: excavación, roza, sondeo. Cubicación: cálculo de leyes. Evaluación.</p>	2 a 5 años
Desarrollo	<p>Depósito de mineral abierto para la producción. Estudio del impacto de minería al medio ambiente, infraestructura, planta, explotación.</p>	2 a 5 años
Explotación	<p>Producción de menas. Factores que influyen en la selección del método de extracción: geología, geografía, economía, medio ambiente, aspecto social, seguridad.</p>	10 a 30 años

### TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

- El proceso de exploración minera se compone de una serie de técnicas multidisciplinares que se complementan entre sí.
- Es necesario seguir una secuencia de trabajo para que la información que se obtenga de cada fase sirva de referencia para las posteriores.

#### *1.- Recopilación de la información:*

- Primero se debe obtener toda la información previa, tanto características geológicas de la zona como de las prospecciones realizadas en la zona con anterioridad.
- Es importante la información obtenida de las explotaciones mineras de la zona.

#### *2.- Teledetección:*

- Técnica de adquisición, procesamiento e interpretación de imágenes y los datos asociados, que detalla el comportamiento del terreno ante energía electromagnética incidente.

### TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

#### *3.- Geología:*

- Con su estudio se puede determinar aquellas zonas susceptibles de presentar minerales económicamente explotables.
- Con los datos obtenidos y aprovechando el estudio de afloramientos en superficie, se realiza un modelo del terreno, que sirve para escoger aquellos lugares donde se realizarán las prospecciones posteriores y para definir qué propiedades de los minerales se pueden determinar con las demás técnicas de prospección.

#### *4.- Geofísica y geoquímica:*

- Miden propiedades objetivas que poseen todos los minerales y que dan lugar a gran cantidad de datos digitales referenciados geográficamente.



### TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

#### *5.- Calicatas:*

- Si se tiene incertidumbre de los datos obtenidos, se puede obtener información litológica más fiable de una forma rápida con la apertura de calicatas en una determinada zona.
- Son zanjas que se abren superficialmente hasta alcanzar la roca determinando así la estructura y calidad del material que cubre el macizo rocoso.
- Limitaciones: profundidad no sobrepasa 4 m, presencia de agua limita su utilidad, excavación por medios mecánicos, cumplimiento de normas de seguridad frente al derrumbe de paredes.

#### *6.- Sondeos de exploración:*

- Localizan y definen el valor económico de una mineralización.
- Además de la inversión realizada en sondeos de exploración es imprescindible que la calidad de los datos obtenidos sea muy alta, ya que sobre estos datos se basarán investigaciones posteriores que implicarán inversiones mayores.

### TÉCNICAS DE LA EXPLORACIÓN DE RECURSOS MINERALES

#### *7- Interpretación de resultados:*

- Recopilación de todos los datos obtenidos.
- Con estos datos se logra una interpretación lo más cercana a la realidad posible, construyendo un modelo geológico tridimensional que recoja valores de concentración de mineral y su distribución en el macizo rocoso.

### DEFINICIONES

- Según su aplicación los sondeos se clasifican en tres grandes grupos: de investigación, de explotación y tecnológicos.
- Sondeos de investigación se subdividen en:
- **Sondeos cartográficos.** Se perforan para el levantamiento y confección de mapas geológicos en aquellas regiones donde las rocas no afloran a la superficie.
- **Sondeos de prospección y evaluación geológica–minera.** Con el fin de establecer la presencia de un mineral determinado en una región o con vistas a determinar el yacimiento y evaluar las reservas.
- **Sondeos hidrogeológicos.** Se efectúan con el fin de evaluar las aguas subterráneas, su posible aprovechamiento y su composición química.
- **Sondeos geotécnicos.** Se perforan para identificar y caracterizar las formaciones de superficie con el propósito de llevar a cabo ensayos de la roca y determinar sus propiedades.
- **Sondeos sísmicos.** Se realizan durante las prospecciones sísmicas con el fin de llevar a cabo explosiones subterráneas y registrar las ondas para determinar la estructura de las formaciones geológicas, su estructura y su profundidad.
- **Sondeos geológicos.** Se realizan con el propósito de estudiar las estructuras geológicas, estratificación de las capas, potencial y buzamiento con el fin de llevar a cabo levantamientos geológicos y geofísicos.

### DEFINICIONES

- Sondeos de explotación:

Los pozos de explotación se realizan para extraer del subsuelo los minerales líquidos y gaseosos. Se distinguen los siguientes tipos de sondeos:

- **Sondeos de captación de agua.** Se perforan para el abastecimiento de dicho recurso.
- **Sondeos de petróleo y gas.** Con el fin de extraer dichos hidrocarburos.
- **Sondeos de lixiviación y disolución.** Para la extracción de minerales mediante su arrastre por bombeo hasta superficie.
- **Sondeos para la gasificación subterránea del carbón.** Destinados a la obtención de gases combustibles de las capas de carbón.

### DEFINICIONES

- Sondeos con fines técnicos

Los sondeos o barrenos que se perforan con diferentes fines técnicos se clasifican:

- **Barrenos de voladura.** Destinados a alojar las cargas de explosivo que se utilizan en las operaciones de arranque, tanto en obra civil como en minería.
- **Barrenos de consolidaciones de terrenos.** Dirigidos a mejorar las características mecánicas y resistencia de materiales.
- **Sondeos de drenaje.** Para conseguir una disminución del nivel freático alrededor de las excavaciones mineras y/o obra civil.
- **Sondeos de desgasificación.** Destinados a disminuir el volumen de metano en las capas de explotación y estratos adyacentes en yacimientos de carbón.
- **Sondeos de inyección.** Destinados para alojar en cavidades o formaciones rocosas adecuadas diferentes tipos de agua, gas, CO<sub>2</sub>, residuos tóxicos y elementos que afecten al medio ambiente.

### DEFINICIONES

- [Clasificación de los sondeos según sus características geométricas:](#)

Las características geométricas de los sondeos están determinadas por tres parámetros básicos:

• **Longitud.** La longitud de un sondeo puede variar desde unos pocos metros hasta varios miles. Atendiendo a esta característica los sondeos pueden denominarse de las siguientes formas:

*Superficiales:* Hasta 200 m.

*Poco profundos:* De 200 a 1.200 m.

*Profundos:* De 2.500 m. a 4.000 m.

*Muy profundos:* De mas de 4.000 m

• **Diámetro.** El diámetro también puede variar desde un simple barreno de 22 mm. hasta pozos de gran diámetro. En las primeras fases de la perforación petrolífera se pueden alcanzar diámetros de 30 pulgadas (762 mm) dependiendo de la profundidad que se quiera alcanzar.

• **Inclinación.** Generalmente los sondeos superficiales son verticales, aunque en muchos casos son inclinados u horizontales, principalmente en sondeos de hidrocarburos a gran profundidad.

### DEFINICIONES

- Características de las rocas:

Las rocas son agregados naturales compuestos por minerales.

La Petrografía es la ciencia que tiene como objeto la descripción y clasificación de las rocas, su interpretación genético-evolutiva y el estudio termodinámico de los procesos que las han llevado a adquirir el aspecto actual.

Estudia también los agentes mecánicos y químicos responsables del origen, desintegración y transporte, sus características físicas y composición, así como, los agentes influyentes sobre la deposición de los sedimentos, su estratificación y compactación.

### DEFINICIONES

- [Características de las rocas:](#)

Existen tres tipos de rocas en la Tierra: ígneas, metamórficas y sedimentarias.

Rocas ígneas: formadas por el enfriamiento y solidificación de la masa magmática en fusión en las entrañas de la Tierra. Pueden ser intrusivas o plutónicas y extrusivas o volcánicas. Son del tipo intrusivas, entre otras, el granito. Estas rocas tienen una textura granítica muy bien definida. Entre las extrusivas o volcánicas, se cuentan las pómez, las bombas volcánicas, el lodo volcánico y la lava.

Rocas metamórficas: se forman de las ígneas y sedimentarias al sufrir transformaciones por la acción del calor, por los efectos de la presión o por acción química, produciendo rocas de composición similar pero de textura y proporciones mineralógicas diferentes. Por ejemplo, la caliza puede transformarse en mármol, la lutita en pizarra, la pizarra en esquistos y la arena en cuarcita.

Rocas sedimentarias: están representadas por gravas, conglomerados, arenisca, arcilla, caliza y dolomita. Estas rocas se derivan de las rocas ígneas y metamórficas por medio de la acción desintegradora de agentes como el viento, la lluvia, los cambios de temperatura, organismos, las corrientes de agua, las olas, y por acción de sustancias químicas disueltas en el agua. En general, las rocas sedimentarias son las de mayor importancia desde el punto de vista petrolero. Constituyen las grandes cuencas donde se han descubierto los yacimientos petrolíferos del mundo.



### DEFINICIONES

- Propiedades físicas de las rocas:

De la acumulación de datos teóricos y aplicaciones prácticas, tanto en el laboratorio como en trabajos de campo, se ha logrado catalogar una variedad de propiedades de las rocas que componen los estratos geológicos.

Es importante conocer además el origen de las rocas, la edad geológica, su estructura, composición, granulometría, características externas, propiedades mecánicas y todo cuanto pueda abundar para interrelacionar mejor las deducciones geológicas y geofísicas que conduzcan en definitiva al descubrimiento de acumulaciones comerciales de minerales.

- ✓ Peso específico: Relación entre peso de la roca y su volumen. El peso de la unidad volumétrica de la roca en su estado natural difiere del peso de la misma masa ocupada por el esqueleto mineral sólido de dicha roca. La diferencia esta condicionada por la porosidad.
- ✓ Densidad: Relación entre masa de la roca y su volumen. La masa de la unidad volumétrica de la roca en su estado natural difiere del de la masa de la misma masa ocupada por el esqueleto mineral sólido de dicha roca. La diferencia esta condicionada por la porosidad.

### DEFINICIONES

- Propiedades físicas de las rocas:

- ✓ Porosidad:

La porosidad es el espacio creado por los granos en contacto en donde se almacena el agua, petróleo o el gas natural. El concepto de porosidad y volumen es básico en la estimación de reservas.

Tiene sus fundamentos en la configuración de los granos, la manera como están en contacto, el material que los une, el volumen que representa esa masa y el espacio creado.

Si se toma un envase cilíndrico cuya capacidad es de un litro, se puede llenar con un litro de líquido. Pero si se llena con arena de granos sueltos, más o menos uniformes, aparentemente se ha copado el volumen del envase. Sin embargo, si se vierte agua u otro líquido sobre la arena hasta copar el envase, se verá que el líquido se ha depositado en los huecos entre granos en contacto. Si el volumen de líquido vertido al envase es de 150 cc, la roca teórica dentro del envase tendría una porosidad del 15%.

*Porosidad primaria:* volumen existente entre granos y el cemento que los une.

*Porosidad secundaria:* huecos de la roca que se producen posteriormente a la cristalización o compactación.

Matemáticamente la porosidad se define como el porcentaje de volumen de huecos respecto al volumen total considerado.

### DEFINICIONES

- [Propiedades físicas de las rocas:](#)

- ✓ Permeabilidad

Facultad de la roca para permitir el paso de un fluido a través de sus poros.

Para que se realice este movimiento dentro del material rocoso es necesario que sus huecos estén interconectados y que su tamaño sea lo suficientemente grande para que los efectos de adhesión no impidan la circulación del fluido.

- ✓ Resistencia

Propiedad por la que una roca se opone a su **rotura** bajo una carga exterior, estática o dinámica. Normalmente la resistencia a la tracción de las rocas no sobrepasa el 15% de la resistencia a la compresión. La resistencia de las rocas depende de la composición mineralógica, tamaño de los cristales y porosidad.

- ✓ Dureza

Resistencia de su capa superficial a la penetración por presión de otro cuerpo mas duro. Por tanto la dureza es la resistencia a la **penetración**.

La dureza de los minerales se clasifica según la escala de MOHS, en la que se valora la posibilidad de que un mineral pueda rayar a todos los que tienen un numero inferior al suyo.

Escala de MOHS: talco, yeso, calcita, fluorita, apatito, feldespato, cuarzo, topacio, corindón y diamante.

### DEFINICIONES

- [Propiedades físicas de las rocas:](#)

- ✓ Abrasividad

Capacidad de las rocas para desgastar o erosionar la superficie de contacto de otro cuerpo más duro durante el proceso de rozamiento.

Las propiedades abrasivas de un material rocoso tienen gran importancia en el desgaste de las herramientas de corte que suelen ser de acero, carburo de tungsteno o diamante.

Los factores que afectan a la capacidad abrasiva de las rocas son los siguientes:

- La dureza de los granos de la roca: rocas con granos de cuarzo son muy abrasivas.
- La escasa solidez entre granos: normalmente presentan granulometrías angulosas.
- La forma de los granos: los granos redondeados presentan una menor abrasividad.
- La porosidad de la roca aumenta la rugosidad de la superficie y por tanto la abrasividad.
- Las rocas poliminerales como el granito son más abrasivas, ya que los minerales de menor dureza al disgregarse dejan al descubierto a los minerales de mayor dureza.
- La humedad y la saturación de las rocas (agua adherida a las paredes del poro) reduce la abrasividad.

### DEFINICIONES

- [Propiedades físicas de las rocas:](#)

- ✓ Elasticidad

La mayoría de los minerales que constituyen las rocas tienen un comportamiento elástico que obedece a la ley de Hooke. Superado el límite elástico la deformación es permanente.

Las tensiones provocadas afectan al carácter de deformación considerándose dos grupos de rocas: *elásticas* que obedecen a la ley de Hooke y *plásticas* que no obedecen dicha ley.

La ley de Hooke establece que la deformación de un material elástico es directamente proporcional a la fuerza aplicada.

- ✓ Plasticidad

Permiten la deformación permanente sin llegar a romperse. Rocas con minerales duros disminuyen la plasticidad de la roca.

Las arcillas son un ejemplo de rocas con altas propiedades plásticas. La plasticidad de las rocas pétreas se acentúa claramente con la temperatura.

### DEFINICIONES

- Propiedades físicas de las rocas:

- ✓ Perforabilidad de las rocas

Facilidad o dificultad a ser perforada una roca.

Básicamente el procedimiento consiste en medir la velocidad de penetración.

Para calcular el *Índice de Perforabilidad* se relaciona la fragilidad de la roca (ensayo en el laboratorio golpeando una muestra con una pesa desde una altura determinada y medir el porcentaje de trozos menores de un tamaño determinado) con la profundidad conseguida en la roca al ser taladrada por un taladro de 8.5 mm, después de 200 vueltas y con un peso sobre el taladro de 20 kg.

#### Ensayo de fragilidad

- Muestra troceada entre 11,2 y 16 mm.
- Pesa de 14 kg se deja caer 20 veces desde una altura de 25 cm.
- Se calcula el porcentaje que pasa la malla de 11,2 mm ( $S_{20}$ )

#### • Ensayo de profundidad de taladro

- Broca de 8,5 mm.
- 20 kg de empuje sobre la broca.
- Girar 200 vueltas a la broca
- Longitud perforada en mm (valor S.J)

### DEFINICIONES

- [Clasificación de los sondeos:](#)

- ✓ Arranque

Conjunto de operaciones necesarias para separar la roca del macizo rocoso donde se encuentra. En la mayoría de las ocasiones es necesario, además, romper la roca en trozos suficientemente pequeños para facilitar los procesos posteriores (carga y transporte).

El arranque se realiza de tres maneras: con herramientas, con máquinas y con explosivos. Los dos primeros métodos sólo son rentables cuando las rocas a explotar son relativamente blandas (carbón o fostatos).

En rocas duras es necesario acudir al arranque mediante explosivos. En el caso de las rocas ornamentales (mármol, granitos, pizarras...) empleadas en arquitectura y construcción se utilizan herramientas de corte de diamante y voladuras muy cuidadosas con muy poca cantidad de explosivo.

El arranque mediante explosivos es el más utilizado. Para poder cargar el explosivo, se requiere hacer barrenos en la roca y distribuirlos de tal manera que a cada barreno se le de una secuencia de detonación.

### DEFINICIONES

- [Clasificación de los sondeos:](#)
- ✓ Mecanismo de la perforación

Durante la perforación de las rocas se realizan fundamentalmente las siguientes etapas: fracturación de la roca en el fondo del taladro, elevación hasta superficie de los trozos de roca (detritus) y mantenimiento de las paredes del sondeo.

El ataque a la roca se puede realizar por aplastamiento, penetración, corte, percusión y erosión.

Cuando un útil de corte se empuja contra la roca se produce el aplastamiento de ésta y la penetración del útil de corte en ella.

Una vez que el útil de corte ha penetrado en la roca, se le puede someter a una rotación produciendo un desgarramiento o corte del material. El aplastamiento y corte constituyen los mecanismos de rotura de la roca cuando se perfora.

Si estamos perforando a percusión el elemento de corte se debe desplazar después de cada percusión con el fin de que el impacto siguiente no coincida con los cráteres anteriores.

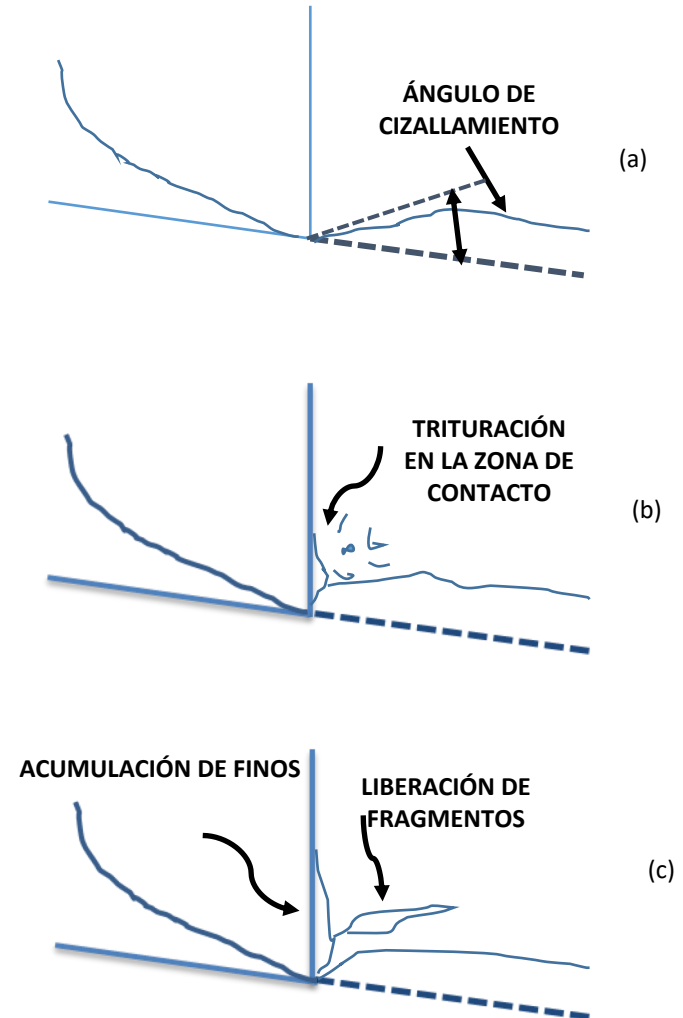
Cuando se utilizan triconos en la perforación rotativa, los dientes del tricono aplastan y golpean la roca desgarrándola en pequeños fragmentos (detritus).

El contacto entre la herramienta de corte, los fragmentos y la roca producen una erosión/desgaste por rozamiento que también se suma al efecto de destrucción de la roca a perforar.



### DEFINICIONES

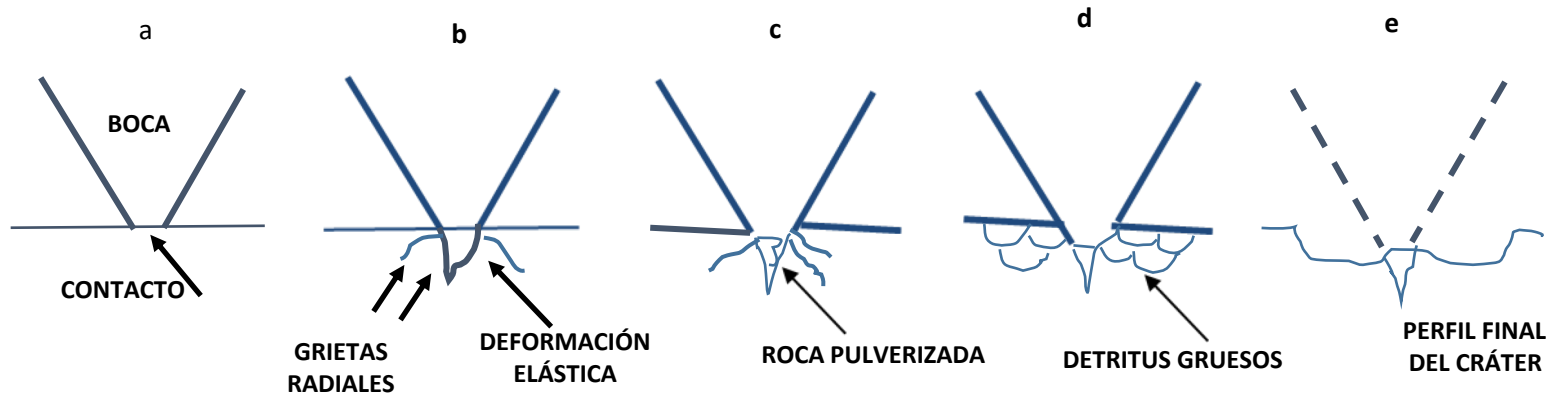
- [Clasificación de los sondeos:](#)
- ✓ Mecanismo de rotura de la roca por corte



Adaptado: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIONES

- [Clasificación de los sondeos:](#)
- ✓ Mecanismo de rotura de la roca por percusión



Adaptado: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIONES

La perforación de las rocas dentro del campo de las voladuras es la primera operación que se realiza y tiene como finalidad abrir unos huecos, con la distribución adecuada en los macizos, con el fin de alojar en su interior las cargas de explosivo y sus accesorios iniciadores.

La técnica de perforación y voladura se basa en la ejecución de perforaciones en roca, para posteriormente colocar explosivos que al detonar transmiten energía necesaria para la fragmentación del macizo rocoso a explotar.

Existen dos tecnologías diferenciadas: la de la perforación y la de diseño y ejecución de voladuras.

Las técnicas de perforación se usan, además de para perforaciones de voladuras, para exploración, drenajes, sostenimientos...

La perforación ha ido evolucionando con el tiempo incorporando diferentes tecnologías, aunque muchas han caído en desuso bien por la eficiencia conseguida o por condicionantes externos (económicos, medioambientales...).

Existe una relación intrínseca entre perforación y voladura: *"una buena perforación posibilita una buena voladura, pero una mala perforación asegura una mala voladura"*.

#### DEFINICIONES

Los sistemas de perforación se clasifican en:

1. Mecánicos: percusión, rotación, rotopercusión.
2. Térmicos: Soplete o lanza térmica, plasma, flujo caliente, congelación.
3. Hidráulicos: Chorro de agua, erosión, cavitación.
4. Sónicos: Vibración de alta frecuencia.
5. Químicos: Microvoladura, disolución.
6. Sísmicos: Rayo láser.
7. Nucleares: Fusión/ Fisión.



Aunque existe una amplia variedad de métodos de perforación, en obra pública se utiliza, principalmente, la energía mecánica.

### DEFINICIONES

En función del tipo de equipo utilizado se clasifica en:

- Perforación manual: Con equipos ligeros manejados a mano por los perforistas. Para trabajos de pequeña envergadura con dimensiones pequeñas donde es inviable el uso de otras máquina o económicamente no está justificado su empleo.
- Perforación mecanizada: Los equipos van montados sobre unas estructuras pudiendo el operador consigue controlar todos los parámetros de la perforación de forma cómoda. Estas estructuras van montadas sobre neumáticos u orugas y pueden ser automotrices o remolcables.

### CLASIFICACIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS CON PERFORACIÓN Y VOLADURA

#### 1.- Perforación en banco:

Al presentar un frente libre para la salida y proyección del mineral se erige como el método óptimo para realizar voladura de rocas ya que presenta un frente libre para la salida y proyección del material. Usada a cielo abierto y en minería subterránea, con barrenos verticales y ocasionalmente, horizontales.

#### 2.- Perforación de avance de galerías y túneles:

Es necesario crear un hueco inicial o cuele por el que comienza a salir la roca al ser fragmentada por las cargas. Los barrenos pueden ser perforados de forma manual pero hoy en día la mecanización es total utilizando jumbos de uno o varios brazos.

#### 3.- Perforación de producción:

En explotaciones mineras subterráneas para extracción de mineral. Al ser un espacio reducido, se deben elegir correctamente los equipos y los métodos según los sistemas de explotación.

### CLASIFICACIÓN DE LOS TRABAJOS REALIZADOS CON PERFORACIÓN Y VOLADURA

#### 4.- Perforación de chimeneas:

En los proyectos subterráneo de minería y obra pública que requieran de la apertura de chimeneas se puede utilizar el método de barrenos largos aunque se ha tendido a la utilización del método de Raise Boring.

#### 5.- Perforación en rocas con recubrimiento:

Utilizada en aquellos macizos rocosos sin consolidar que precisan de perforación con entubado, así como en los trabajos de perforación y voladuras submarinas.

#### 6.- Bulonado:

Para el sostenimiento de rocas en obras subterráneas y algunas a cielo abierto.

### PRINCIPALES MÉTODOS DE PERFORACIÓN

#### 1.- Perforación Rotopercutiva:

Se pueden utilizar en prácticamente todos los tipos de roca, pudiendo situar el martillo en **cabeza** o en el **fondo** del barreno.

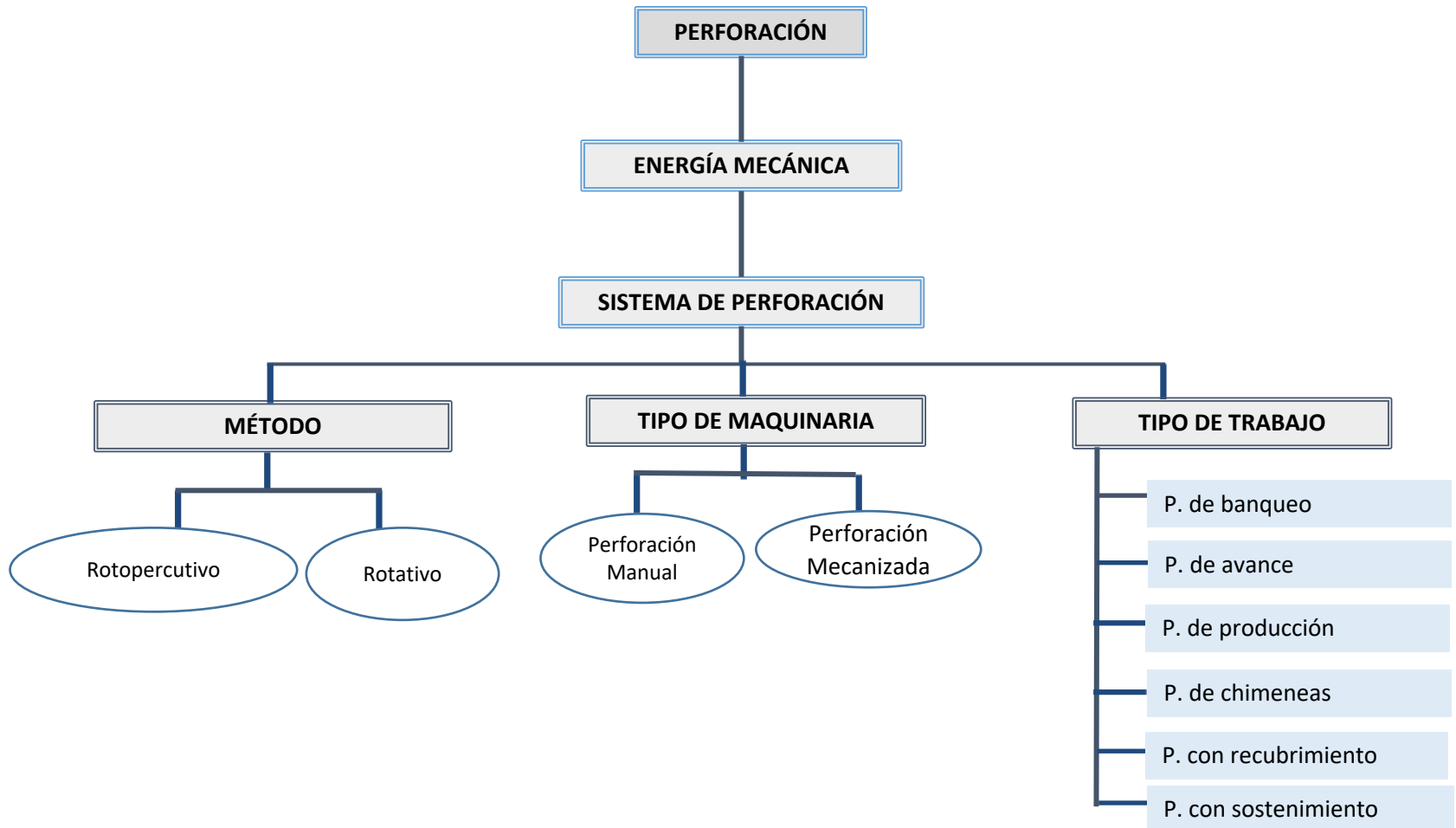
#### 2.- Perforación Rotativa:

Se pueden dividir en dos subgrupos: **triconos** (la perforación se produce por trituración, en rocas duras) o **corte** (con bocas de corte especiales, en rocas blandas).

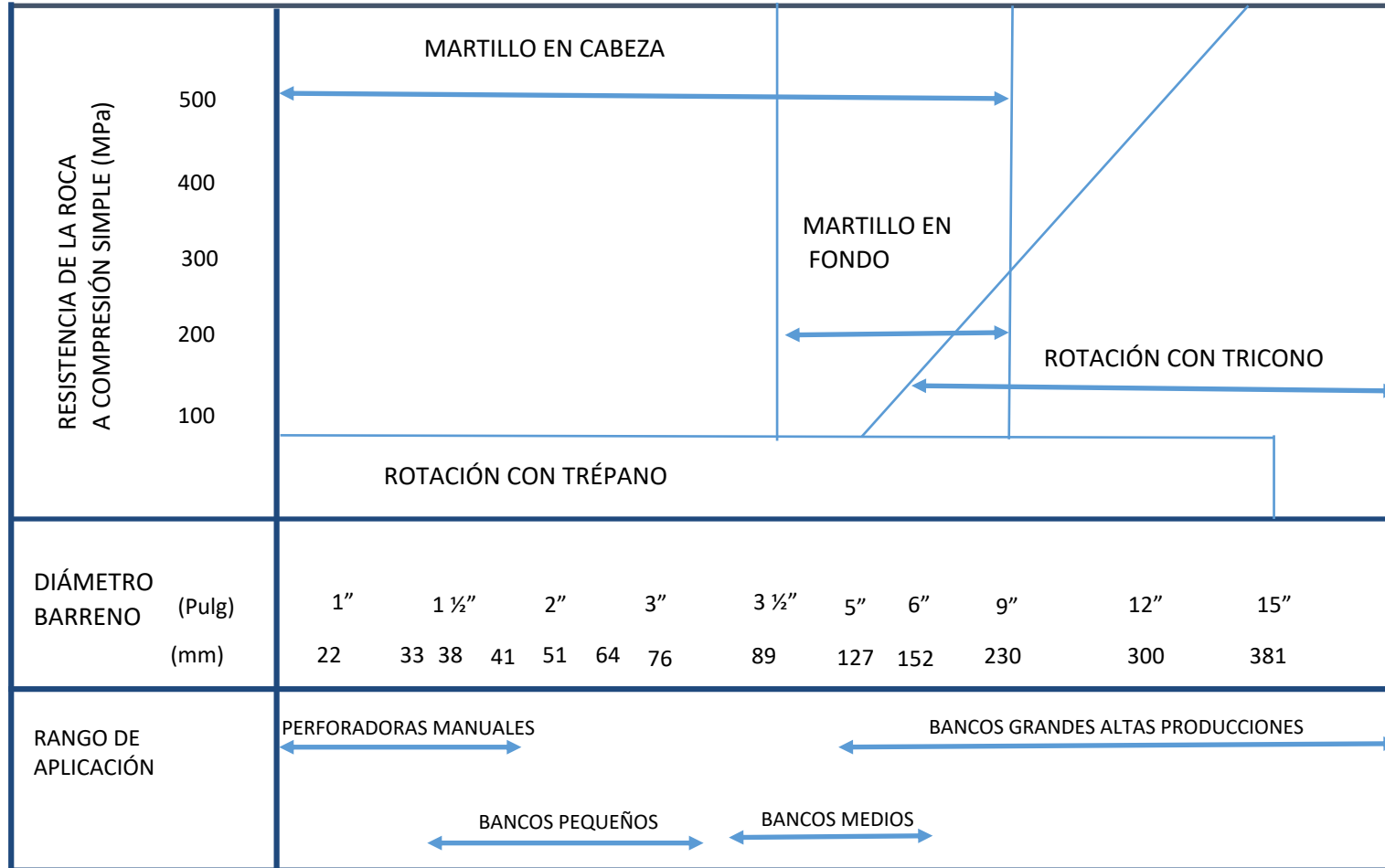
Existe una tercera tipología: percusión por cable.



#### PRINCIPALES MÉTODOS DE PERFORACIÓN



#### PRINCIPALES MÉTODOS DE PERFORACIÓN



Fuente: Sandvik

*Metodologías y diámetros habituales en función de la resistencia a compresión de las rocas*

### SISTEMAS DE MONTAJE PARA APLICACIONES SUBTERRÁNEAS

Se clasifican en los siguientes:

- 1.- Jumbos para excavación de túneles y galerías, explotaciones por corte y relleno, por cámaras y pilares, ...
- 2.- Perforadoras de barrenos largos en abanico, para el método de cámaras por subniveles.
- 3.- Perforadoras de barrenos largos para sistemas de cráteres invertidos y cámaras por banqueo.
- 4.- Otros: Vagones perforadores sobre neumáticos y carros sobre orugas

### GENERALIDADES

Agrupamos aquellas formas de perforación en las que la fragmentación de roca es producida por impacto de un útil afilado sobre la misma.

Los sistemas de percusión simples se utilizan en menor medida en perforadoras de cable (viejos equipos de perforación de pozos de agua). Están compuestos por un trépano en forma de cuchilla con el filo interior más o menos aguzado que suspendido de un cable se deja caer sobre el fondo del pozo.

Vamos a considerar a partir de ahora los métodos rotopercutivos que junto con la percusión, proporcionan al útil de corte un movimiento de rotación y alternativamente una pequeña fuerza de empuje para transmitir la energía eficazmente.

La velocidad de perforación es proporcional a la potencia de la percusión (producto de la energía de impacto por la frecuencia de golpes).

La rotación y el empuje son acciones auxiliares que influyen poco en la velocidad de penetración si son capaces de superar los valores mínimos necesarios para separar los puntos de incidencia de los impactos del útil y que se mantenga en contacto con la roca.

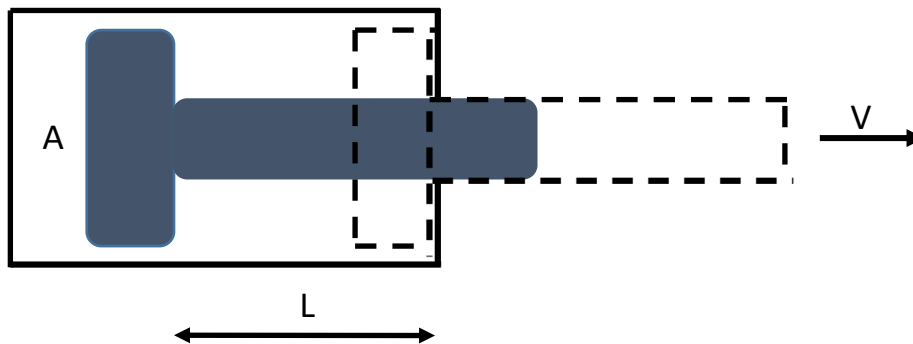
El martillo proporciona la percusión gracias al movimiento alternativo de una pieza de choque (pistón) que golpea sucesivamente sobre la sarta de perforación.

El pistón puede ser accionado por aire comprimido (perforación neumática) o por aceite hidráulico (perforación hidráulica).

### GENERALIDADES

#### Potencia de percusión:

Para valorar un martillo perforador se utiliza su potencia de percusión y su eficiencia.



Fuente: Bernaola, Castilla,  
Herbert (2013)

Mecanismo de percusión de un pistón. Consta de pieza móvil (pistón), que se desplaza con un movimiento de vaivén en el interior de una cámara (cilindro) por la acción que un fluido a presión (aire o aceite) ejerce sobre una determinada superficie (área de trabajo).

### GENERALIDADES

#### Potencia de percusión:

Para calcular la energía de impacto E se pueden utilizar dos fórmulas distintas:

La primera calculando el trabajo realizado sobre el pistón mediante la expresión:

$$E_1 = P_m \cdot A \cdot L$$

Donde:

$P_m$  es la presión media efectiva del fluido.

A es el área de trabajo del pistón.

L es la carrera.

Fuente: Bernaola, Castilla,  
Herbert (2013)

### GENERALIDADES

#### Potencia de percusión:

Otra forma de cálculo, descontando las pérdidas por rozamiento, es mediante el cálculo de la energía cinética del pistón al final de sus carrera.

$$E_2 = 1/2 \cdot M \cdot v^2$$

Donde:

M es la masa del pistón.

v es la velocidad del pistón al final de la carrera.

Generalmente, es bastante aproximado suponer que se cumple:

$$E_2 = K \cdot E_1 \quad (K < 1)$$

Y despejando v se obtiene:

$$v \propto \sqrt{\frac{2 \cdot P_m \cdot A \cdot L}{M}}$$

Fuente: Bernaola, Castilla,  
Herbert (2013)

### GENERALIDADES

#### Potencia de percusión:

Se puede destacar una proporcionalidad en función de las variables de diseño, entre la velocidad del pistón  $v$  y el producto de la carrera por la frecuencia de impacto:

$$v \propto (L \cdot N)$$

Donde  $N$  es la frecuencia de impacto.

Con todo esto se obtiene una tercera expresión para calcular la potencia de percusión:

$$W \propto E \cdot N \propto P_m \cdot A \cdot L \cdot N \propto P_m \cdot A \cdot v$$

Se concluye que la presión del fluido de accionamiento y el área de trabajo del pistón son los parámetros que más inciden en la potencia de percusión del martillo.

Las tres variables  $M$ ,  $A$  y  $L$  son variables de diseño sobre las que el operador no puede actuar.

Por otro lado, sí se puede actuar sobre la presión del fluido de accionamiento para obtener una gama de potencias de percusión, según requiera cada aplicación en concreto.



### GENERALIDADES

Las aplicaciones más habituales de este tipo de perforación son las siguientes:

- 1.- Barrenos para voladuras
- 2.- Investigación y obtención de muestras,
- 3.- Drenaje,
- 4.- Anclaje,
- 5.- Cimentaciones, etc.

Se usa en:

- Obra civil subterráneas:
  - túneles, cavernas de centrales hidráulicas, depósitos, ...
- Obra pública en superficie:
  - carreteras, autopistas, explanaciones,...
- Minas subterráneas y explotaciones a cielo abierto.
- Sondeos de investigación en materiales duros y muy duros.

### GENERALIDADES

El método se basa en el impacto de una pieza de poca masa (pistón), con gran frecuencia (condicionada por el martillo). La fracturación se debe a la percusión.

Existen dos tipos de mecanismos:

- 1.- Martillo en cabeza: cuando la rotación y la percusión se producen fuera del taladro y se transmiten a la broca a través de la sarta de varillaje.
- 2.- Martillo en fondo: La percusión es en el fondo del taladro golpeando el pistón directamente sobre la roca (neumática), y la rotación se aporta exteriormente (neumática o hidráulica).

Las ventajas de este método son las siguientes:

- 1.- Aplicable rocas tanto blandas como duras.
- 2.- Amplia gama de diámetros de perforación.
- 3.- Equipos versátiles, de con gran movilidad.
- 4.- Necesitan un solo operario.
- 5.- Precio de adquisición no elevado.

### GENERALIDADES

- Neumática
  - Con martillo en cabeza
  - Con martillo en fondo
  
- Hidráulica con martillo en cabeza.

### MARTILLO EN CABEZA

La perforación a rotopercusión se basa en la combinación de las siguientes acciones:

- 1.- Percusión: el pistón al realizar el golpeo produce unos impactos que originan las ondas de choque que se transmiten a través del varillaje a la boca.
- 2.- Rotación: se realiza un giro de la boca para asegurar que los impactos se produzcan en distintas posiciones de la roca.
- 3.- Empuje: sirve para que el útil de perforación se mantenga en todo momento en contacto con la roca, empujando para ello la sarta de perforación.
- 4.- Barrido: utilizando un fluido se extrae el detritus del fondo del barreno.

### MARTILLO EN CABEZA

Consta de los siguientes elementos:

- ✓ **Perforadora (motor)**, proporciona la energía para que pueda verificarse:
  - Percusión
  - Rotación
  - Avance
- ✓ **Sarta de perforación** (barrenas, tubos, varillaje...), encargada de la transmisión energía.
- ✓ **Boca**, rompe la roca debido a la percusión.
- ✓ **Fluido de perforación**, indispensable para la extracción constante de detritus.

## MARTILLO EN CABEZA

### Fundamento de la percusión:

Implica el desarrollo de una energía basada en la presión del aire comprimido, la superficie del pistón, su carrera y peso. La energía producida por el pistón es proporcional a la presión. El nº de golpes por minuto lo es a la raíz cuadrada de la presión.

$$E_c = 1/2 m_p v_p^2$$

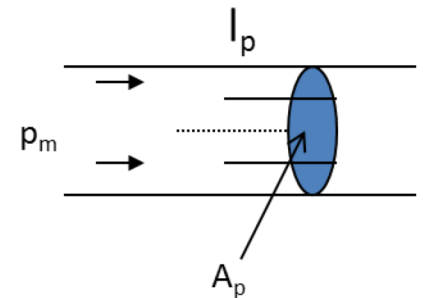
$$E_c = p_m A_p l_p$$

$$v_p = l_p / t$$

(Número de veces que recorre  $l_p$  en el tiempo  $t$ ) =  $1/t \rightarrow$

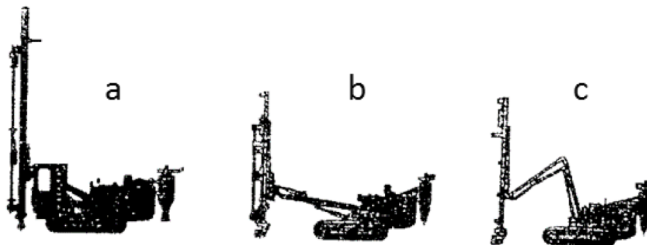
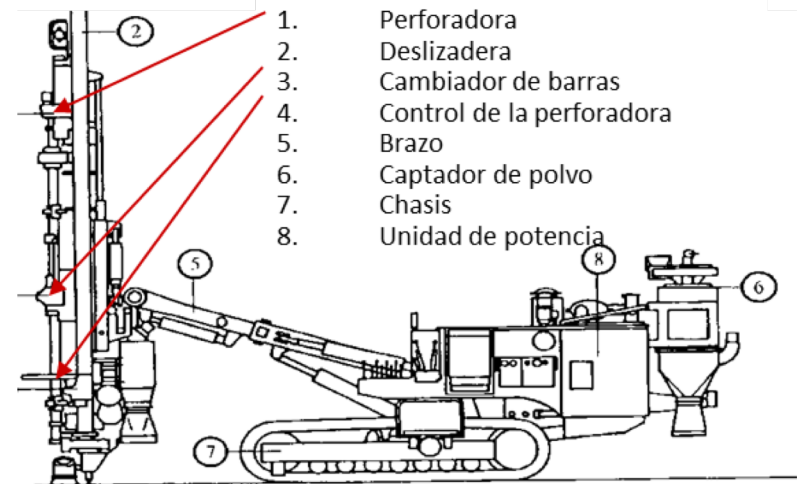
$$1/t = \sqrt{2 p_m A_p / m_p l_p}$$

$$\text{Potencia} = E_c \cdot n^\circ \text{ impactos} = (p_m A_p)^{3/2} (l_p / m_p)^{1/2}$$



### MARTILLO EN CABEZA

- Deslizadera (2): aloja el martillo (en cabeza ), el motor de rotación y el sistema de avance.
- Guía del varillaje.
- Carro portabarreras con cambiador automático.
- Brazo para posicionados de la deslizadera con cilindros hidráulicos. Puede ser fijo (a), telescópico (b) o articulado (c).
- Chasis: armazón soporte de todos los demás elementos, que puede ser propulsado o no; sobre neumáticos, railes, orugas o semimóviles y con los sistemas de accionamiento sobre el chasis o independiente.



Fuente: Manual de perforación, explosivos y voladura.

### MARTILLO EN CABEZA

En estas perforadoras dos de las acciones básicas, rotación y percusión, se producen fuera del sondeo, transmitiéndose a través del varillaje hasta la boca de perforación.

Los martillos en cabeza pueden ser neumáticos o hidráulicos.

La sarta de perforación está constituida por los siguientes elementos:

- Adaptador de culata donde golpea el pistón.
- Manguitos de empalme.
- Varillas de extensión.
- Boca de perforación (broca).

En el caso de varillas de tubo los manguitos de unión no son necesarios ya que se enroscan directamente las varillas de rosca cónica macho/hembra.



### MARTILLO EN CABEZA

A medida que el pozo profundiza es necesario ir añadiendo varillas o tubos a la sarta siguiendo el siguiente procedimiento:

- Cuando la varilla ha entrado en el terreno hasta que el extremo superior de la varilla coincide con la parte inferior de la corredera, se para el sondeo, se sujeta la varilla con la mordaza y se desenrosca el martillo.
- Se sube el martillo a la parte superior de la corredera, intercalando una nueva varilla entre el martillo y la varilla sujeta con la mordaza, enroscándose tanto al martillo como a la varilla que se encuentra dentro del pozo.
- Se suelta la mordaza y se inicia de nuevo la perforación

Cuando se requiere cambiar la broca o tallante se lleva a cabo el proceso inverso, sacando todo el varillaje del pozo.

Respecto al fluido de barrido la mayor parte de las perforadoras utilizan aire comprimido, aunque en algunas ocasiones se utiliza agua o espuma. La velocidad del aire requerida oscila entre 15 y 70 m/s. Cuando se emplea agua la velocidad ascensional debe estar comprendida entre 0,4 y 1 m/s.

### MARTILLO EN CABEZA

Los equipos van montados sobre un bastidor alojado sobre un camión o en un chasis sobre orugas.

Para este tipo de perforación, los diámetros del pozo varían entre 50 y 150 mm. La longitud de los sondeos esta condicionada por la pérdida de energía entre el martillo y la broca: a mayor profundidad la energía llega con más dificultad, debido a las pérdidas a través del varillaje.

La velocidad de barrido se puede calcular por medio de la expresión:

$$V \text{ (m/min)} = Q / S = 4Q / 3,14 (D^2 - d^2)$$

Donde:

V = Velocidad de ascensión (m/min.)

Q = Caudal de aire de barrido ((m<sup>3</sup>/min)

S = Superficie anular (m<sup>2</sup>)

D = Diámetro del pozo (m)

d = Diámetro de la varilla (m)

### MARTILLO EN CABEZA

#### Características de la potencia de la máquina:

La velocidad de avance de perforación es directamente proporcional a la potencia de la máquina.

$$Va = K Wo \left[ \frac{cm}{min} \right]$$

La evaluación de la energía de impacto del pistón al final de su carrera puede obtenerse matemáticamente a partir de la ecuación general que describe su movimiento.

Para una perforadora neumática se supone que la presión del aire comprimido se mantiene constante durante la carrera útil del pistón con un valor promedio.

### MARTILLO EN CABEZA

#### Características de la potencia de la máquina:

Se supone que la aceleración del pistón es también constante durante su carrera, e igual en ambos sentidos. De este modo, la energía de impacto ( $w_0$ ) queda dada por la siguiente expresión:

$$w_0 = 0,5 P A L \left[ \frac{kgm}{golpe} \right]$$

La potencia es:

$$W_0 = 0,5 P A L N \left[ \frac{kgm}{min} \right]$$

Donde:

- P es la presión manométrica del aire a la entrada del cilindro [kg/cm<sup>2</sup>]
- A es el área de la cara frontal del pistón o área del cilindro de la máquina [cm<sup>2</sup>]
- L es la carrera del pistón [m]
- N es la frecuencia de impactos [golpes/min]

Los manuales y catálogos de los fabricantes incluyen las características constructivas de sus equipos en cuanto a diámetro del pistón (D), carrera (L) y frecuencia de impactos (N).

### MARTILLO EN CABEZA

#### Características de la potencia de la máquina:

Cuando se trata de perforadoras accionadas hidráulicamente, los fabricantes indican en sus manuales el impact power (Potencia de Impacto) expresada en [Kw], y también la frecuencia de impactos expresada en (Hz).

La Potencia de Impacto corresponde a la energía que desarrolla la máquina por unidad de tiempo ( $W = \text{Joule/seg.}$ ).

En el caso de las perforadoras hidráulicas el fluido que acciona la máquina (aceite) trabaja a presiones del orden de los 150 a 250 [kg/cm<sup>2</sup>].

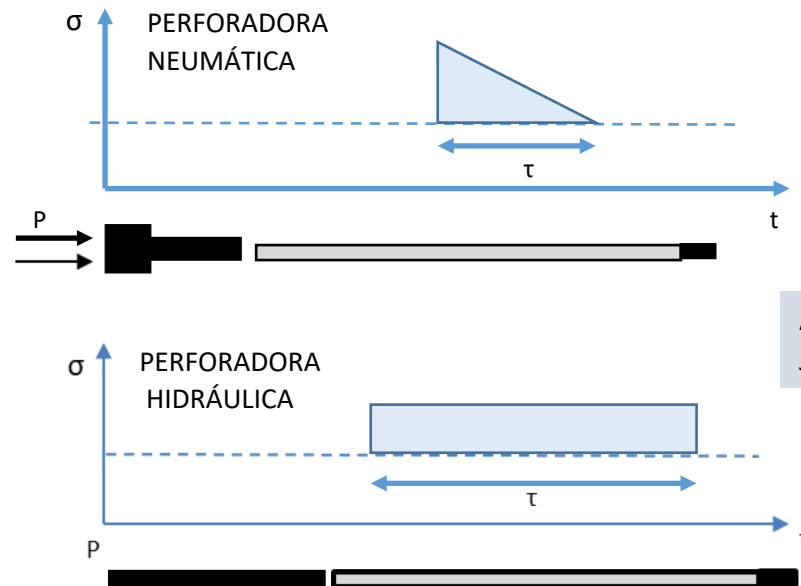
La energía se transmite por la columna de barras en la forma de una onda de compresión. Parte de esta energía se pierde en este proceso, aproximadamente un 30 % en condiciones normales de operación. Al producirse el impacto del pistón contra la parte posterior de la barrena se crea en ella una perturbación. Las partículas del sólido que reciben el golpe experimentan un desplazamiento.

## MARTILLO EN CABEZA

### Características de la potencia de la máquina:

La forma de la onda depende de la geometría del pistón, y en lo esencial de la relación entre el área del pistón ( $A_p$ ) y el área de la barrena ( $A_b$ ).

En el caso de las perforadoras neumáticas  $A_p > A_b$ , la onda de compresión que se transmite por la barra tiene un perfil triangular. En cambio, en las perforadoras hidráulicas,  $A_p \approx A_b$  y la longitud del pistón es bastante mayor, de modo que la onda toma una forma rectangular plana y alargada, de bajo perfil.



Adaptado: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### MARTILLO EN CABEZA

#### Características de la potencia de la máquina:

El área representa la energía que se transmite en cada impacto. Al comparar las áreas correspondientes, se concluye que una perforadora hidráulica puede transmitir una energía por golpe bastante mayor, sin sobrepasar el límite de resistencia a la fatiga de las barras, lo que se traduce en una velocidad de penetración muy superior.

La fuerza de empuje que es necesario aplicar al sistema cumple básicamente las siguientes funciones:

1º) Contrarrestar la fuerza que ejerce el fluido a presión en la parte posterior del cilindro de la máquina. Así, en el caso de una perforadora neumática, la situación sería la mostrada en la figura.

$$F \approx 0,5 P A \text{ [Kg} - p\text{]}$$

P= presión del aire a la entrada [kgp/cm<sup>2</sup>]

A = área del pistón [cm<sup>2</sup>]

2º) Contrarrestar la fuerza de reacción de la roca, de acuerdo con el principio acción – reacción.

### MARTILLO EN CABEZA

#### Características de la potencia de la máquina:

La fuerza de empuje ( $F$ ) se aplica en forma permanente; en cambio, la reacción ( $R$ ) actúa durante un intervalo de tiempo muy pequeño, equivalente al período de propagación de la onda a través del varillaje y transferido al tallante.

3º) Optimizar el proceso de aplicación de la energía. Según el modelo aceptado en la actualidad, la energía de impacto se transmite por la barra en la forma de una onda de compresión. Dicha energía se aplica por intermedio de la herramienta a la roca, la cual debe mantenerse permanentemente presionada contra la roca para que el proceso de transferencia de la onda resulte eficiente.

Los ensayos demuestran que cuando la fuerza de empuje es demasiado baja, se produce una sobre-rotación de la herramienta lo que incide negativamente en la velocidad de penetración. Por el contrario, si la fuerza aplicada es muy grande, la rotación tiende a reducirse, situación que también puede conducir a una operación ineficiente; incluso la herramienta podría atascarse, con la consiguiente pérdida de tiempo y eventualmente la pérdida de la herramienta.

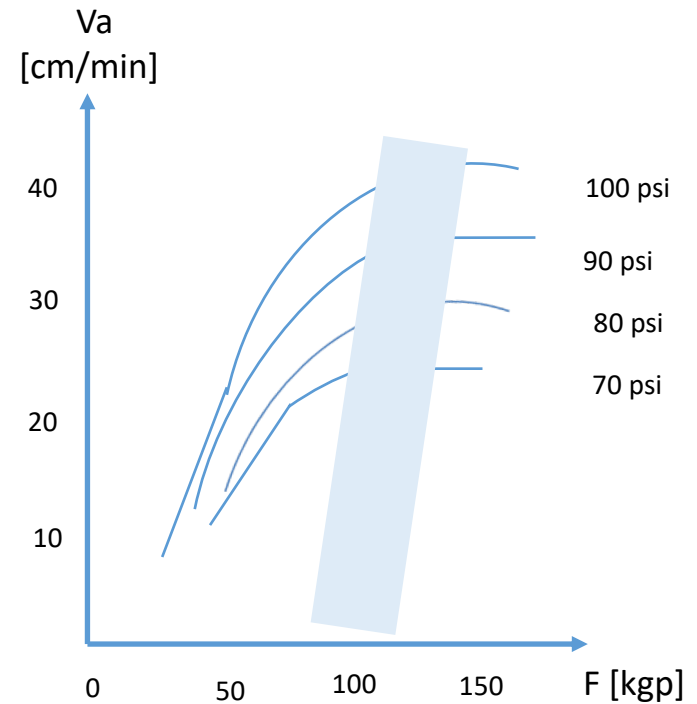
En suma, para cada combinación perforadora-roca, existe una fuerza de empuje óptima que maximiza la velocidad de penetración.



### MARTILLO EN CABEZA

#### Características de la potencia de la máquina:

En el gráfico se aprecia que la velocidad de avance máxima se obtiene para una fuerza de empuje (F) comprendida aproximadamente entre 70 y 130 [kg-peso], dependiendo de la presión de trabajo del aire comprimido.



Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### MARTILLO EN CABEZA

#### Fundamento de la rotación:

- Con cada golpe se realiza un giro de la herramienta para enfrentar superficie fresca de la roca.
- La rotación influye en el tamaño de detritus:

#### VELOCIDAD DE ROTACIÓN BAJA

- Poca penetración, baja velocidad de perforación.

#### VELOCIDAD DE ROTACIÓN ALTA

- Pérdida de energía y desgaste prematuro en las roscas y varillaje.

Velocidad de rotación martillo en cabeza → 80 – 150 rpm.  
Giro de 10 – 20 °.

A más diámetro menos velocidad de giro → menor velocidad periférica → reducción desgastes

### MARTILLO EN CABEZA

#### Equipos de perforación: Martillos:

Dependiendo de las diversas tareas de perforación, de las características de la roca, de los diámetros y las longitudes de los taladros, los aparatos perforadores se equipan con martillos perforadores de percusión de alto rendimiento.

Estos nuevos martillos disponen de un moderno sistema de amortiguación de rebote. Así se consigue reducir el desgaste de las herramientas perforadoras, ya que la columna de perforación está permanentemente bajo tensión previa.

Esto significa para la perforación que se evitan los impactos en vacío y de rebote a la vez que se utiliza la energía completa del impacto, consiguiendo altas velocidades de perforación.

### MARTILLO EN CABEZA

#### [Equipos de perforación: Aceros de perforación:](#)

Las variables que se deben tener en cuenta para una buena elección de la sarta de perforación (varillaje y tallante) son: propiedades de las rocas, litología del terreno, abrasividad, profundidad de bancos y tipo de los aceros.

En cuanto la calidad de los aceros, la norma ASTM 519 estandariza el tipo de acero. La calidad 4140 es un acero al carbono, cromo, molibdeno y la calidad 4340 es un acero al carbono, cromo, níquel, molibdeno.

También hay que tener presente los elementos de recubrimiento anti-desgaste como el carburo de cromo, carburo de tungsteno y carburos de vanadio.

### MARTILLO EN CABEZA

#### Equipos de perforación: Tallantes o brocas:

Todos los elementos de los tallantes perforadores están fabricados con material altamente resistente al desgaste, a la percusión y a la torsión. Para las diversas aplicaciones está disponible una amplia gama de tallantes.

Para colocar bulones de anclaje en mortero con resina sintética, los tallantes pueden equiparse con un dispositivo desplegable hidráulico para el varillaje de perforación y con un dispositivo para soltar dicho varillaje.

Tras perforar un taladro de anclaje, el tallante permanece en su posición perforadora, la barra de perforación se despliega y el bulón de anclaje se puede introducir en el agujero de anclaje mediante la máquina perforadora.

### MECANISMOS DE ROTACIÓN

- Con barra estriada
- Con rueda de trinquetes



Para perforaciones “ligeras”

- Con motor independiente

Para sondeos de gran diámetro, en que el par es muy alto

### MECANISMOS DE ROTACIÓN

[Perforadoras neumáticas: Rotación con rueda de trinquetes.](#)

- El pistón es en parte helicoidal (engranando con la rueda de trinquetes mediante una tuerca de rotación) y posee estrías rectas que engranan con el buje de rotación (portabarrenas).

**RETROCESO: TRINQUETE FIJO, GIRA EL PISTÓN, Y CON ÉL LA BARRENA**

**AVANCE: CEDE EL TRINQUETE (GIRA), QUEDAN FIJOS EL PISTÓN Y LA BARRENA**

### MECANISMOS DE ROTACIÓN

#### Perforadoras neumáticas: Rotación con barra rifle.

- Consta de:
- Barra rifle, con estrías helicoidales unida a la carcasa por trinquetes.
- Pistón hueco, con la barra rifle en su interior unida a la tuerca de rotación.
- Buje de rotación solidario interiormente con el pistón y el portabarrenas.

En el avance : ceden los trinquetes, gira la barra, pistón fijo y barrena fija.

En el retroceso: trinquetes fijos, barra fija, pistón gira y barrena gira



### ROTACIÓN INDEPENDIENTE

#### Características del sistema:

- La rotación se consigue mediante un motor neumático tipo engranaje conectado al portaherramientas con un engranaje cilíndrico.
- Se usan engranajes rectos soportados por cojinetes de rodillos.
- Velocidad de rotación varía de forma continua regulando la entrada de aire.

#### **Ventajas:**

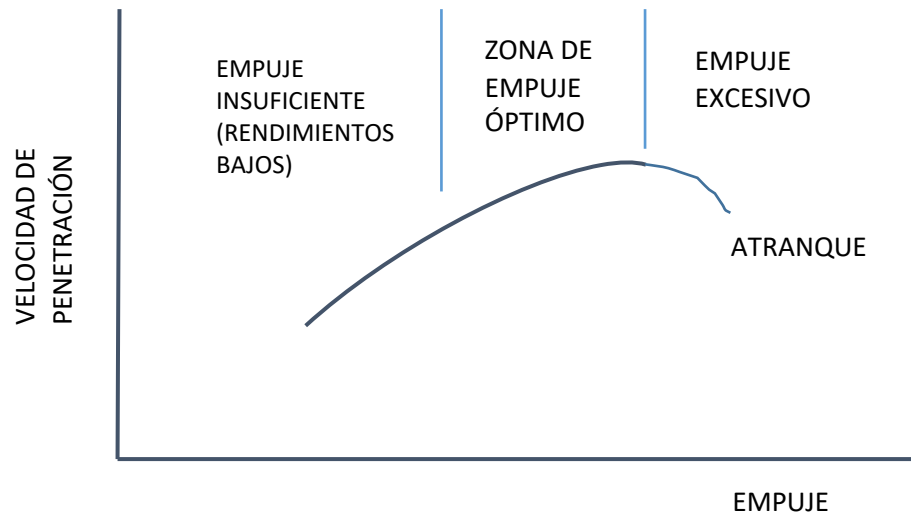
- Para igual tamaño de pistón, se dispone de más energía para el golpe.
- Hay más par para la rotación, por lo que se pueden usar mayores diámetros y alcanzar más profundidad.
- La regulación de la velocidad de rotación y de la energía de percusión según el tipo de roca es más fácil.
- Aumenta el rendimiento de la perforación.

**Inconvenientes:** Requiere más aire y presenta mayor desgaste de las bocas de perforación por arrastre contra fondo.

### EMPUJE

#### Fundamentos del empuje:

- **Objetivo:** Mantener la boca en contacto con el fondo.
- Variable de acuerdo con las características de la formación perforada.
- Si es excesivo: se necesita mayor par de rotación y se acorta tiempo rebote, con lo que dispone de menos tiempo para rotar, y es mayor el riesgo de atranque.
- Si es deficiente: riesgo de impacto en vacío.



### BARRIDO

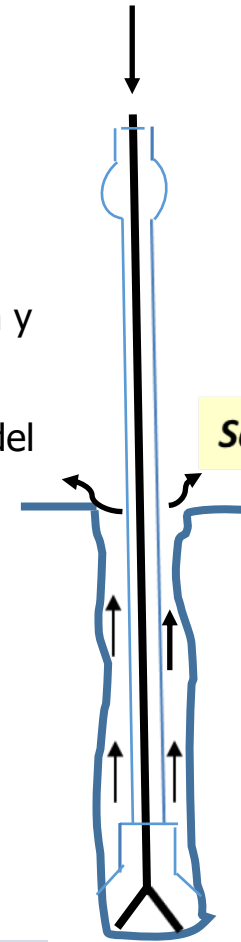
#### Fundamentos del barrido:

- Retirada de detritos de la interfase boca-fondo del barreno.
- Extracción por inyección a presión de un fluido.
- Barrido escaso: remolienda, reduce la velocidad de penetración y aumenta desgaste de la boca.
- Barrido excesivo: aumenta coste, desgaste varillaje y paredes del sondeo.

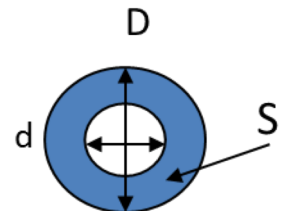
$$V(\text{m/min}) = Q(\text{m}^3/\text{min})/S(\text{m}^2) = 4Q / \pi(D^2-d^2)$$

Adaptado: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

*Fluido de barrido Q*



*Salida detritus*



V (1000 – 3000m/min)

### SISTEMAS DE AVANCE

#### 1.- Empujadores:

Compuestos de dos tubos. El exterior es ligero y el interior de acero, unido a la perforadora.

#### 2.- Deslizador de cadena:

Cadena que se desplaza por dos canales arrastrada por: motor hidráulico o neumático, actuando sobre el martillo que se desplaza sobre el lado superior de la deslizadera.

- **Ventajas:** precio bajo, fácil reparación y longitud de avance grande.
- **Inconvenientes:** desgaste, peligroso si se rompe la cadena en perforaciones hacia arriba y avance poco suave a pequeñas profundidades.

### SISTEMAS DE AVANCE

#### 3.- Deslizadera de tornillo:

Tornillo que gira accionado por motor neumático y hace avanzar el martillo.

Tiene poco diámetro por lo que no son de gran longitud para evitar el pandeo.

Presenta como ventajas una fuerza de avance más regular y suave, siendo adecuado para sondeos profundos , y resistente al desgaste. Es además más seguro que al cadena.

Entre las desventajas figura su alto precio, la dificultad para la reparación, o las limitadas longitudes a considerar para evitar el pandeo.

#### 4.- Deslizadera hidráulica:

Cilindro hidráulico que desplaza a la perforadora. Resulta simple, robusta, precisa, adecuada para perforaciones a grandes profundidades, y adaptable a gran diversidad de equipos y longitud de barrena.

### BARRIDO

#### Fundamentos del barrido:

Los fluidos habitualmente empleados son:

- Aire.
- Agua.
- Agua + espumantes: especialmente indicados en perforaciones de pozos de agua en terrenos poco consolidados. Ofrecen buena limpieza en diámetros grandes, y velocidades ascensionales menores.

La velocidad ascendente del aire es de 1070 a 1520 m/min. Si es con espumantes desciende a 46 m/min.

Los factores que condicionan el caudal requerido son los siguientes:

- Tamaño de los detritus.
- Agua que afluye al sondeo.
- Profundidad del sondeo.
- Diámetro de la boca de perforación.
- Diámetro del varillaje.

### EL MARTILLO NEUMÁTICO MANUAL. INTERIOR Y EXTERIOR

#### Exterior:

Empuñadura abierta (permite sujetar el martillo con ambas manos).

Accionamiento y barrido neumático.

#### Interior:

Empuñadura cerrada (adaptadas al barrenado horizontal, uso con una sola mano).

Barrido puede ser con aire y/o agua.

### EL MARTILLO NEUMÁTICO MANUAL. TENDENCIAS ACTUALES

#### Antiguamente:

Pistones grandes (mucho masa).

Larga carrera.

Pocos golpes y muy fuertes.

#### Actualmente:

Pistones pequeños.

Carrera corta.

Muchos golpes y no muy fuertes.

**Conclusión:** Hoy hay martillos más ligeros y eficientes.



### EL MARTILLO NEUMÁTICO MANUAL. APLICACIONES

#### Cielo Abierto:

Taqueo de bolos y repiés.

Perforación para obras de pequeña envergadura.

Demoliciones.

#### Subterráneas:

Perforación secundaria.

Producción.

Túneles y galerías de pequeña sección y longitud (no justificado uso de equipos mecanizados).

### PERFORADORAS NEUMÁTICAS. GENERALIDADES

#### Síntesis de los sistemas de percusión, rotación y barrido en perforadoras neumáticas.

- Martillo: movimiento alternativo de un pistón por el empuje de aire comprimido.
  - Cilindro cerrado con tapa delantera y orificio axial para portabarrenas y retenedor de varillas.
  - Pistón que golpea la culata de la barrena.
  - Válvula distribuidora: bola o clapeta.
  
- Mecanismo de rotación:
  - Barra estriada y trinquete.
  - Motor independiente.
  
- Sistema de barrido: tubo que permite el paso del aire de barrido hasta el interior del varillaje.

### PERFORADORAS NEUMÁTICAS. GENERALIDADES

#### Componentes fundamentales de las perforadoras neumáticas:

- Mecanismo de impacto hace que golpee un pistón.
- Sistema de regulación para dirigir el fluido hacia un lado u otro del pistón. Mediante válvulas o similares.
- Sistema de rotación que provoca el giro de varillaje y boca en cada impacto.
- Engrase con aceite para reducir desgaste.
- Sistemas de avance del tren de perforación para que la boca esté siempre en contacto con el fondo vástago empujador, cadena o tornillo.

### CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MARTILLOS NEUMÁTICOS

- Características:
  - Relación diámetro pistón/diámetro barreno 1,5/1,7.
  - Carrera pistón 50-95 mm.
  - Frecuencia de golpeo 1500-2800 golpes/min.
  - Velocidad de rotación 40-400 rpm.
  - Consumo de aire 2,1-2,8 m<sup>3</sup>/min. Cm diámetro.
  
- Aplicaciones:
  - Barrenos cortos 3-15 m.
  - Diámetro pequeño 50-100 mm.
  - Rocas duras.
  - Acceso difícil.
  - Trabajos preparación.
  
- Desventajas:
  - Forma de transmisión de onda de choque no muy buena: desgaste alto del material.
  - Alto consumo de aire 6-7 kg/cm<sup>2</sup>.
  - Alto consumo de fungibles.
  - Alto consumo energético.
  
- Ventajas:
  - Sencillo, fiable, de bajo mantenimiento, fáciles de reparar.
  - Bajo coste de adquisición.
  - Usadas en minas que utilizan aire comprimido.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Características principales:

- Desarrollados en 1951 por Stenuick.
- Usados en cielo abierto en rocas de resistencia media-alta con diámetros de 105 a 200 mm (algunos modelos pueden alcanzar los 915 mm).
- Usados en trabajos subterráneos a partir de 1975 en los métodos de barrenos largos y cráteres invertidos.
- En la actualidad se usan en obras de superficie en rocas duras y diámetros superiores a 150 mm, entrando en competencia con los equipos a rotación.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Características principales:

- El aire comprimido inyectado a través del varillaje acciona el martillo en el fondo del pozo y es utilizado a su vez como fluido de barrido de los detritus.
- En la perforación con martillo en fondo, se utilizan diferentes tipos de útiles cortantes: brocas plaquetas y botones de carburo de tungsteno.
- En este método el pistón del martillo golpea directamente la boca de perforación (broca). El diámetro mínimo es de 85 mm limitado por el tamaño del martillo de unos 76 mm de diámetro.
- El accionamiento del martillo es normalmente neumático, aunque puede funcionar con agua y espumantes. El fluido de barrido inyectado en superficie es el encargado de accionar el martillo.
- Para iniciar la perforación, se conecta el aire comprimido y se hace girar lentamente el martillo en fondo. A continuación, se inicia el avance lento hasta que la boca comienza a martillar sobre el terreno. La presión del empuje sólo debe ser suficiente como para iniciar la rotura de la roca.
- Después de algunos minutos, se aumenta la presión de empuje sin exceder el máximo recomendado sobre la broca. El peso + empuje máximo recomendado es el peso/empuje más allá del cual se producirá un desgaste excesivo de la broca, y debe determinarse empíricamente según el tipo de formación a perforar.
- El peso total optimo sobre la boca es la media entre peso total mínimo y peso total máximo.

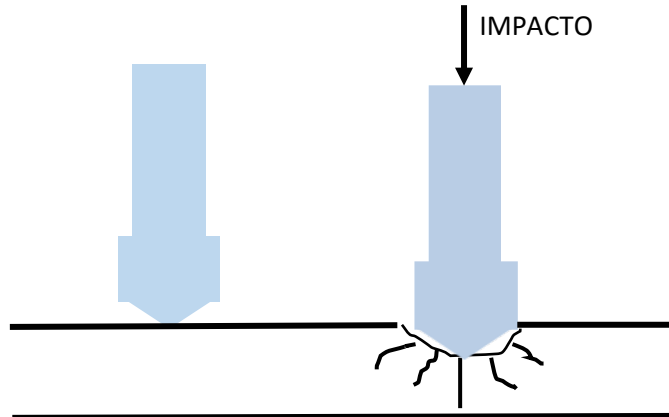
### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Características principales:

- Frecuencia de golpeo oscila entre 600 y 1600 golpes por minuto.
- Para una perforación eficiente es muy importante saber determinar **empíricamente** cuantos metros pueden perforarse, en una formación determinada, antes de cambiar la broca.
- El cambio de la broca se realiza si cualquiera de las siguientes circunstancias denuncia la existencia de una broca gastada:
  1. Coeficiente de penetración lento.
  2. Disminución del tamaño o volumen de los detritus .
  3. Chirridos u otros indicios de atascamiento.
  4. Traqueteo y rotación con sacudidas o tirones.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

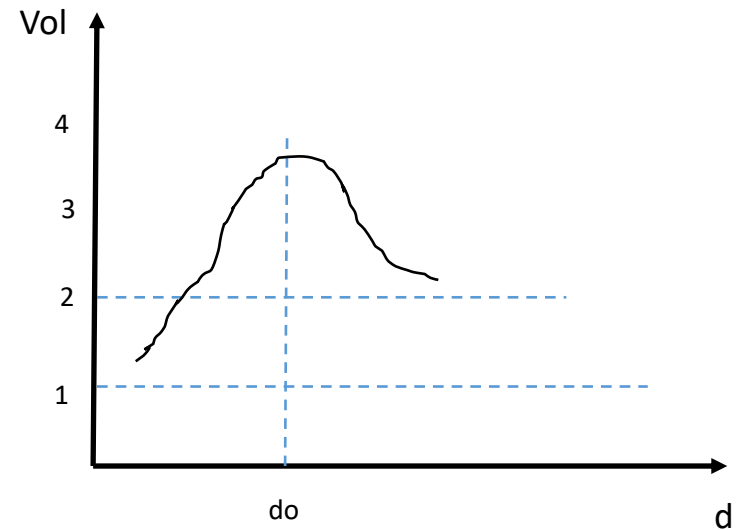
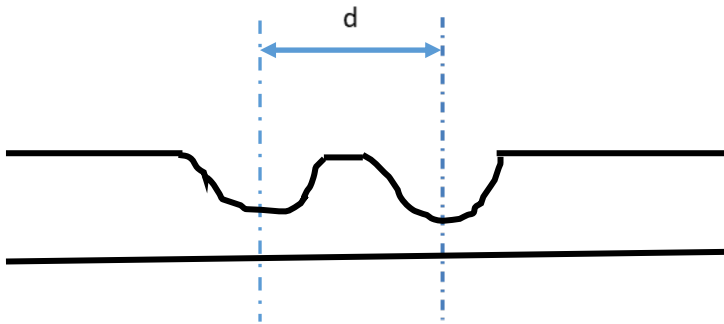
- **Indentación:** proceso de fracturación de la roca por el efecto de penetración de una herramienta con forma de cuña mediante la aplicación de golpes sucesivos.
- Para una aproximación al menos cualitativa, suponemos que se realiza una experiencia consistente en golpear sucesivamente una superficie rocosa mediante una simple traslación paralela de una herramienta provista de un solo filo.
- Como resultado de esta experiencia, es posible obtener un gráfico que representa el volumen de roca removido por dos golpes sucesivos en función de la distancia entre dichos golpes.
- La unidad de medida corresponde al volumen removido por un golpe aislado.





### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- **Indentación:**



Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- **Indentación:**
- Se distinguen tres escenarios:
- Si la distancia tiende a cero, significa que el filo golpea dos veces en la misma posición, y el volumen removido es solamente un poco mayor que 1.
- Si la distancia es muy grande, no existe interacción entre los golpes y el volumen removido tiende a 2.
- Si los golpes son cercanos, se produce interacción y el núcleo central de roca se rompe, resultando un volumen removido que podría incluso ser mayor de 3.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Características principales:

- La rotación se efectúa con un motor neumático o hidráulico colocado en la deslizadera. La sarta en todo momento esta presionada desde superficie contra el fondo de pozo.
- El varillaje esta formado por tubos. El sistema de empalme de tubos es similar al descrito en la perforación con martillo en cabeza.
- Las ventajas que presenta el método de martillo en fondo con respecto al martillo en superficie son:
  - Menor desgaste del tallante.
  - Vida mas larga del varillaje.
  - Consumo de aire menor.
- Hoy día la perforación con martillo hidráulico en cabeza es más ventajosa para diámetros pequeños menores de 85 mm. Entre 85 mm y 125 mm se pueden usar indistintamente con martillo en cabeza o martillo en fondo.
- Para diámetros grandes entre 125 y 250 mm el método de martillo en fondo es más ventajoso.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Características principales:

- Uso extendido en explotaciones a cielo abierto.
- Diámetros comprendidos entre 100 – 200 mm.
- La perforadora está colocada inmediatamente a continuación de la boca, en el interior del barreno.
- Evita la pérdida de energía en la transmisión a través del varillaje. Permite velocidad homogénea con el aumento de profundidad.
- Limitación: diámetro del pistón. Parámetros que mejoran rendimiento: aumento de presión, de carrera del pistón y disminución de la masa del pistón.
- En rocas duras y diámetros superiores a los 150 mm, entra en competencia con la perforación a rotación.
- Para evitar la entrada de agua en el martillo se dispone de una válvula antirretorno.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Ventajas:

- Barrenos limpios sin desviaciones.
- No se requiere altos empujes, equipos más ligeros.
- Velocidad de avance constante con la profundidad .
- Mayor penetración en rocas medias a duras.
- Mayor capacidad de perforación a diámetros mayores con la misma torre e igual martillo.
- Bajo ruido.
- Vibración baja.
- Mayor vida de las herramientas.
- Tubería de perforación no forzada.
- Ventajas en Coste / metro.
- Como la rotación es en cabeza, más recursos para desatascar el varillaje.
- Velocidad de subida elevada de los detritus pues hay poca diferencia entre la tubería y el diámetro de perforación.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Inconvenientes:

- Elevado riesgo de pérdida del martillo en caso de atranques.
- Imposibilidad actual para perforar barrenos de diámetros inferiores a 76 mm.
- Consideración del martillo como un accesorio de desgaste más.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Funcionamiento del martillo en fondo:

- El pistón golpea directamente la boca de perforación.
- El fluido es aire comprimido que pasa por el interior del tubo de perforación:
  - Permite el paso de fluido.
  - Soporta la boca.
  - Hace girar la boca.
- La rotación se hace con motor neumático o hidráulico montado en el carro.
- El avance igual.
- El aire de escape limpia el sondeo.
- Mientras el martillo se encuentre suspendido, todo el aire pasa directamente a la boca.
- Cuando el martillo está apoyado contra el fondo, parte del aire pasa a la parte inferior del pistón y lo hace retroceder iniciando el ciclo.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Consumo de aire del martillo en fondo:

- El volumen de aire que pasa por el martillo (aire consumido), expresado en m<sup>3</sup>/min es el resultado de multiplicar el número de impactos por minuto por el volumen de la cámara posterior del pistón (swept).

$$900 \text{ impactos/min} * 0,01 \text{ m}^3 / \text{impacto} = 9 \text{ m}^3 / \text{min}$$



### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### [Empuje en el martillo en fondo:](#)

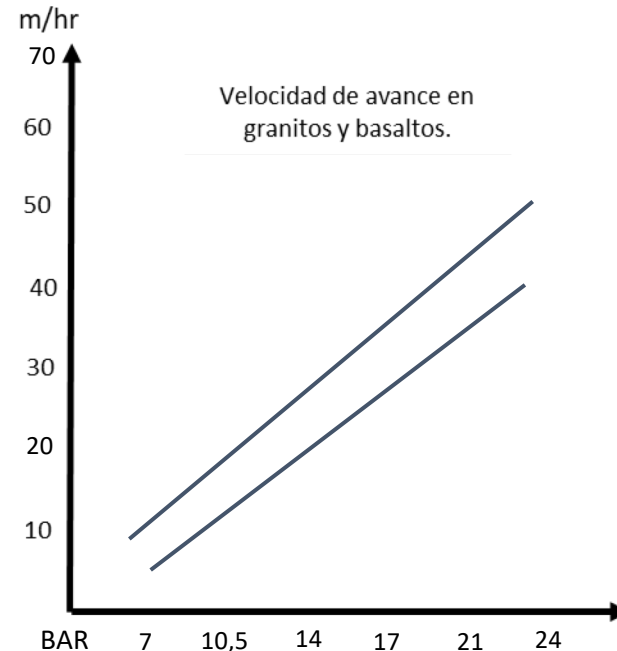
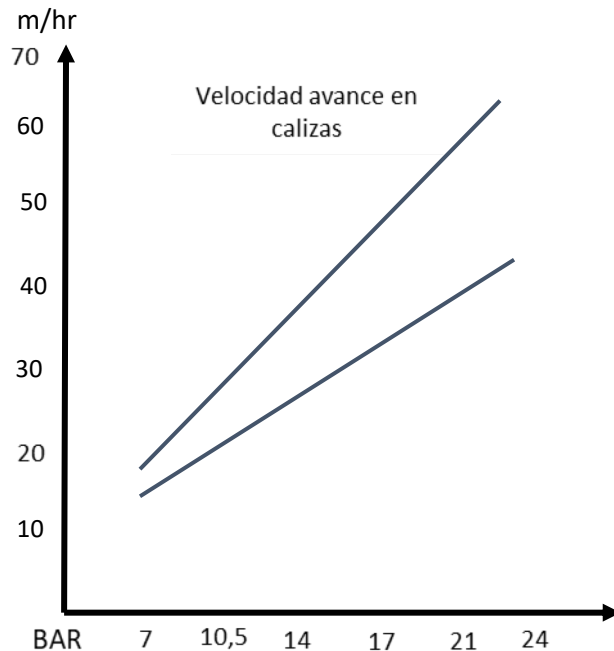
- Martillo apoyado contra el fondo para mantener la boca en contacto contra la roca.
- Valor medio: 85 kg/cm de diámetro.
- Si el empuje es excesivo:
  - Acelera los desgastes en la boca.
  - Aumenta los esfuerzos sobre el sistema de rotación.
  - No aumenta la velocidad de penetración.
- Si se perfora a gran profundidad → retención del varillaje.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

#### Velocidad de avance del martillo en fondo:

- Depende de la presión de aire.
- A mayor presión de aire mayor velocidad de avance.
- Si se perfora con aire comprimido a alta presión, es necesario un empuje mayor para superar el efecto del contraempuje del aire en el fondo.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)



### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- El martillo en fondo es una herramienta de perforación, que funciona mediante aire comprimido y que básicamente lo que hace es transmitir la energía cinética del pistón a la boca de perforación con el objeto de que pueda ir descendiendo en el pozo a medida que éste se perfora.
- Teniendo en cuenta que hay una pieza (pistón) que se desplaza a una alta velocidad dentro del cilindro, y con unas tolerancias muy ajustadas, es imprescindible una correcta lubricación, ya que en caso contrario se producirían desgastes en los martillos.
- Por ello, debe disponerse en el equipo de perforación de una bomba de inyección de aceite, preferentemente de desplazamiento positivo, con el fin de asegurar que se inyecta la cantidad de aceite adecuada, que puede oscilar, según el diámetro del martillo, entre 1 y 5 litros/hora.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- La broca o tallante, es el elemento que finalmente rompe la cohesión de la roca. Hay diferentes formas constructivas, si bien las más utilizadas son las de botones de carburo de tungsteno, insertados sobre la base de acero del tallante.
- En el caso de trabajar en formaciones no abrasivas, la duración de las bocas de buena calidad, debe superar la media de 2.000 metros. En caso de formaciones abrasivas, lógicamente, los rendimientos serán inferiores.
- La selección del compresor a utilizar es de una gran importancia, ya que de ello depende, en un alto porcentaje, la obtención de buenos resultados.
- El aire comprimido realiza dos funciones básicas cuando se perfora con el martillo en fondo:
  - Hacer funcionar el martillo para obtener la energía necesaria para romper la roca.
  - Servir de vehículo de transporte, para extraer los detritus del pozo y mantener éste limpio.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- En el caso de que la velocidad del fluido sea inferior a la necesaria, se producirían problemas de transporte de los recortes, siendo los más pequeños los que saldrían únicamente al exterior, produciéndose una remolienda de aquellos que por su tamaño no pueden ser transportados por el fluido.
- En estas condiciones, una parte de la energía del martillo se estará utilizando en volver a romper en fragmentos más pequeños los recortes inicialmente producidos, y por lo tanto el tallante de perforación no estará incidiendo sobre el fondo limpio del pozo.
- En el caso del aire comprimido, la velocidad optima se sitúa entre los 1.200 y los 1.800 metros/minuto. Es importante el tener en cuenta estas velocidades para conseguir una producción óptima.
- La velocidad del barrido dependerá de los siguientes factores:
  - Caudal de aire suministrado por el compresor.
  - Diámetro de perforación.
  - Diámetro de la tubería de perforación.
  - Pérdidas de aire en el pozo.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- En todos los martillos, la energía cinética obtenida del pistón es función de la presión diferencial de aire que actúa sobre la parte superior del pistón, y que le impulsa en su carrera descendente hacia la boca o tallante de perforación.
- Cuanto mayor sea la presión de aire, mayor será también la energía cinética obtenida, estando limitada esta presión por la propia resistencia mecánica del martillo.
- Una mayor presión de aire supone, al mismo tiempo, un mayor caudal.

$$Q = V\pi \frac{(D^2 - d^2)}{4}$$

Q: caudal de aire necesario para obtener la velocidad de barrido

V: la velocidad del aire en el espacio anular

D: diámetro del pozo

d: diámetro de la tubería.

Por ejemplo: si decimos que un compresor tiene una capacidad de 24 m<sup>3</sup>/min. a presión de 20 Kg/cm<sup>2</sup>, significa que este compresor aspira 24 m<sup>3</sup>/min. de aire atmosférico y lo comprime hasta 20 Kg/cm<sup>2</sup>, siendo el volumen final 1.2 m<sup>3</sup>/minuto, a temperatura constante, y esto será así siempre y cuando el compresor esté situado al nivel del mar y la temperatura del aire sea de 15 °C.

## MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

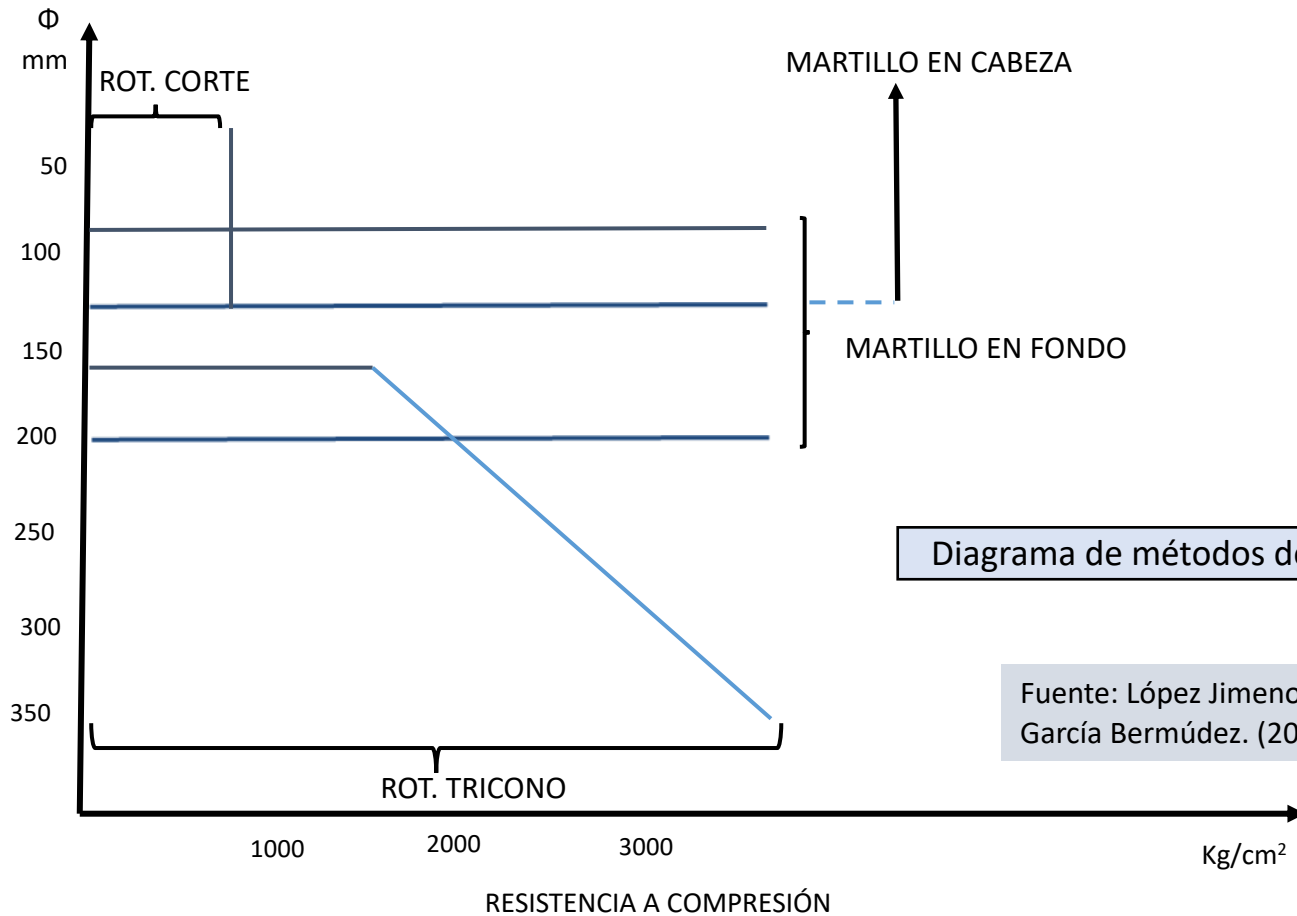


Diagrama de métodos de perforación

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

- El martillo en fondo se utiliza básicamente en gamas de 85-200 mm de diámetro. En diámetros inferiores sería poco eficiente y en diámetros superiores requeriría compresores de aire excesivamente grandes.
- En principio puede utilizarse en cualquier tipo de roca.
- El martillo en cabeza generalmente se utiliza para diámetros menores de 125 mm, debido fundamentalmente a que el varillaje tradicional no permite transmitir los esfuerzos necesarios a la broca de mayor diámetro con un buen rendimiento.
- Al igual de los martillos en fondo la perforación con los martillos en cabeza son aptos para cualquier tipo de roca, aunque su mayor potencia de percusión les favorece para formaciones duras. Las limitaciones se producen para taladros largos al disminuir la velocidad de perforación y aumentar la posibilidad de desviación.



### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

[Comparativa martillo en cabeza/ martillo en fondo:](#)

#### Martillo en cabeza

##### **Ventajas:**

- Simplicidad.
- Fiabilidad y bajo mantenimiento.
- Facilidad de reparación.
- Precios bajos.
- Posibilidad de utilizar una fuente de energía externa.

##### **Inconvenientes:**

- Profundidad y diámetros limitados.
- Muy ruidoso.
- Se pueden producir desviaciones.

### MARTILLO NEUMÁTICO EN FONDO

[Comparativa martillo en cabeza/ martillo en fondo:](#)

#### **Martillo en fondo**

##### **Ventajas:**

- Velocidad de penetración.
- Desviaciones pequeñas.
- Aplicable en formaciones descompuestas o estratificaciones desfavorables.
- No es preciso lastrar la sarta con barras de carga.
- Coste menor en diámetros grandes y rocas duras.
- Nivel de ruido bajo.

##### **Inconvenientes:**

- Martillos diseñados con una gama estrecha.
- El diámetro mas pequeño de pozo (85mm) esta limitado por las dimensiones del martillo (en la actualidad de 76 mm).
- Riego de perder el martillo por desprendimientos o agarres.
- Compresores de alta presión.

### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Características generales:

- A finales de los años 60 y principios de los 70 hubo un gran avance en la perforación de rocas desarrollándose los martillos hidráulicos.
- Se diferencia del neumático en que el motor actúa sobre un grupo de bombas que suministran un caudal de aceite que acciona los componentes,
- La perforadora hidráulica está compuesta de los mismos elementos que la neumática:
  - 1.- Pistón de amortiguación: presiona el adaptador-sarta-boca contra la boca.
  - 2.- Cámara de amortiguación: Ondas reflejadas por la roca son absorbidas y convertidas en calor.
  - 3.- Pistón de impacto: igual área que la sección transversal del varillaje para máxima eficiencia.
  - 4.- Adaptador: adaptado al pistón de impacto (transmite energía con máxima eficiencia).
  - 5.- Motor de rotación: reversible. Más de 200 Nm.
  - 6.- Cámara de barrido: presión de barrido de más de 10 bar.
  - 7.- Junta de sellado: previene el retroceso del martillo.
- En principio se utilizaba en trabajos subterráneos pero hoy en día se ha impuesto en la perforación en superficie desplazando a las neumáticas.

### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Características generales:

##### **Características:**

- Frecuencia de golpeo: 2000 – 5000 golpes / min.
- Velocidad de rotación: 0 – 500 rpm.
- Consumo de aire: 0,6 – 0,9 m<sup>3</sup>/min cm diámetro.

##### **Ventajas:**

- Mejor rendimiento energético. Los neumáticos aprovechan el 15% de la energía suministrada mientras que los hidráulicos el 45 %.
- Frecuencia de golpeo más alta → aumenta la potencia para las mismas dimensiones.
- Menos fugas de aceite que los neumáticos de aire.
- Mejor transmisión de la potencia y mayor vida de los accesorios
- Mayor velocidad de penetración: Debido a la mejor transmisión de la energía y la forma de la onda de choque, la velocidad de penetración es de un 50 – 100 % mayor.
- Mejores condiciones ambientales: ruidos bajos, no hay nieblas de aceites de engrase, ergonomía, seguridad.
- Más versatilidad al modificar la presión del aceite → energía por golpe o el número de golpes por unidad de tiempo.
- Mejores condiciones de regulación de presión, avance, rotación, sistemas de antiatranque y automatización
- Accesorios más baratos: pistones usados más largos y estrechos → onda choque más limpia → menos fatiga → se puede incrementar la vida del varillaje un 20%.

### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Características generales:

#### **Inconvenientes:**

- Mayor inversión inicial.
- Mayor complejidad de los elementos hidráulicos: bombas, motores, válvulas, latiguillos, ...
- Mayor formación del personal de operación y mantenimiento.
- Es necesario refrigerar el aceite. Inflamabilidad del aceite.

### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Aplicaciones:

- Perforación de barrenos en banco de hasta 20 mts de altura.
- Gama de diámetros de 2" a 6", según potencia.
- Trabajos de producción de nivel medio en rocas de cualquier dureza.
- Perforación de túneles.

### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Comparación perforadoras neumáticas e hidráulicas:

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

	Neumática	Hidráulica
Presión del fluido (bares)	7	120 a 240
Potencia de impacto (Kw)	6 a 12	10 a 20
Frecuencia de golpeo (rpm)	1500 a 3000	2000 a 5000
Velocidad de rotación (rpm)	0 a 400	0 a 500
Consumo de aire (por cm de diámetro (m <sup>3</sup> /min))	2,4	0,8
Gama de diámetros de perforación aproximada	2" a 4"	2" a 6"

### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Transmisión de la energía en martillos hidráulicos:

- Al disponer de alta presión del fluido (P), se puede:
  - 1.- Reducir el tamaño del pistón, con objeto de dar mayor nº de golpes (es más fácil su aceleración).
  - 2.- Estilizar su diseño alineándolo con el eje del varillaje.
- Ello se traduce en una mejor transmisión de los golpes hasta el útil, con lo que se consigue una velocidad de perforación mayor y una mayor duración del material fungible.



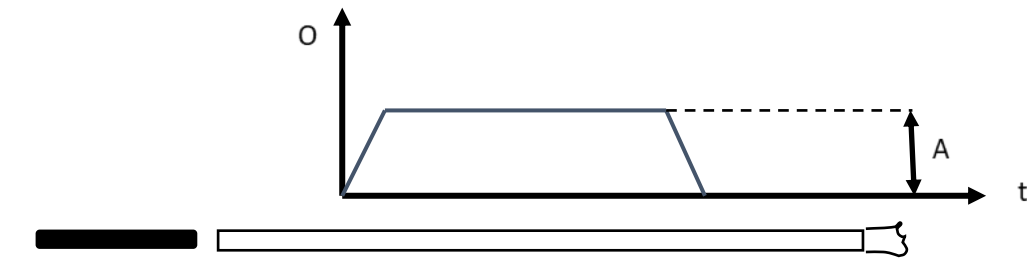
### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Ondas de choque en martillos hidráulicos y neumáticos:

- La forma de la onda de choque de los martillos hidráulicos es mucho más limpia y uniforme que los neumáticos.
- En los neumáticos se producen niveles de tensión muy elevados originados por la fatiga sobre el acero y por las ondas secundarias de bajo contenido energético.
- La vida útil en las perforadoras hidráulicas es un 20% superior a las neumáticas.

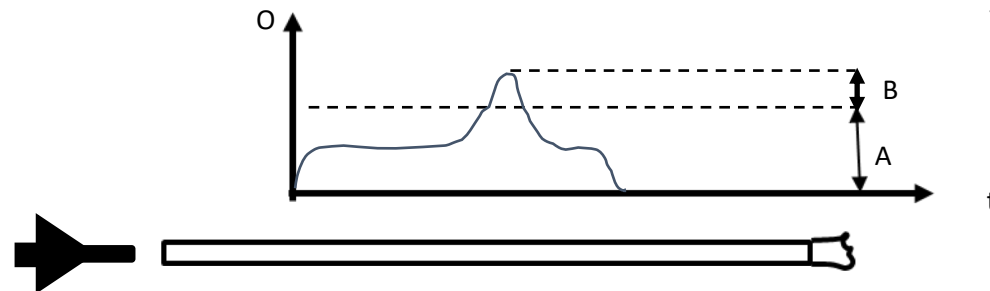
### MARTILLO HIDRÁULICO

#### Ondas de choque en martillos hidráulicos y neumáticos:



Pistón de martillo en  
cabeza hidráulico

**A** = Nivel de tensión aceptable  
**B** = Exceso de tensión provoca  
fatiga en el varillaje

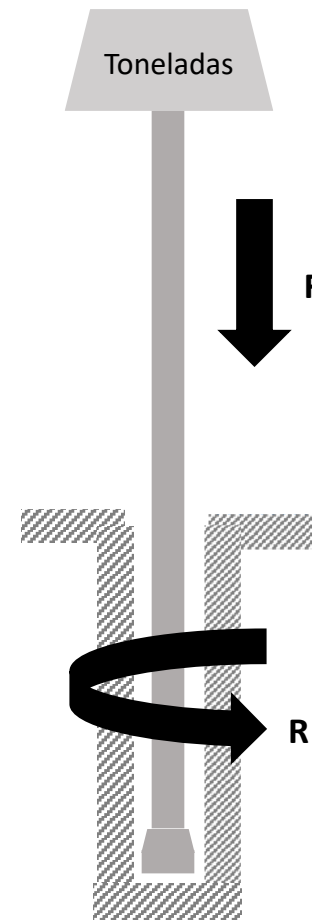


Pistón de martillo en  
cabeza neumático

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIÓN

- El principio utilizado por este sistema consiste en aplicar energía a la roca haciendo rotar una herramienta (trépano) conjuntamente con la acción de la fuerza de empuje.
- Constituidas por una fuente de energía, una batería de barras o tubos, individuales o en serie, transmisoras del empuje, la rotación y el aire de barrido a una boca con dientes de acero o insertos de carburo de tungsteno.



### HISTORIA

- En la práctica minera, este sistema de perforación presenta tres variantes según el tipo de herramienta utilizado:
  1. Rotación con trépano cortante.
  2. Rotación con trépano triturante.
  3. Rotación con herramienta abrasiva.
- El primero fue usado originalmente en la perforación de pozos petrolíferos, pero limitado sólo a formaciones rocosas más bien blandas. En los inicios del siglo XX aparecen los primeros trépanos indentados que ruedan sobre el fondo del sondeo, triturando la roca.
- Su diseño evoluciona rápidamente hasta el tricono.
- A principios de los años '50 del siglo pasado se empieza a aplicar en los primeros equipos rotativos que realizaban perforaciones de voladuras en minas a cielo abierto.
- Gracias a innovaciones posteriores, sobre todo en el diseño y en la calidad de los aceros, se puede afirmar que es un método muy versátil.
- Aplicable en rocas blandas y duras.

### EQUIPO

#### Equipos de la unidad de perforación

- Mecanismo de rotación.
- Mecanismo de empuje.
- Mecanismo de izamiento.
- Sistema de barrido con aire comprimido.
- Accionamientos hidráulicos, mástil y patas de apoyo.
- Mecanismo de desplazamiento de la unidad.
- Dispositivo de extracción de polvo.

#### Montaje y propulsión

- Se utilizan dos sistemas de montaje: sobre orugas o sobre camión.
- Para elegir el sistema idóneo es necesario considerar las condiciones del terreno y el grado de movilidad requerido al mismo. Mientras están perforando, estos equipos se apoyan sobre cuatro patas hidráulicas, que además de soportar su peso sirven para nivelar la máquina.
- El montaje sobre orugas se utiliza preferentemente en las grandes minas a cielo abierto, donde los requerimientos de movilidad son escasos. Su limitación es la velocidad de traslación, 2 a 3 km/hr. En el caso de montado sobre camión la velocidad media de desplazamiento es del orden de diez veces mayor, 20 a 30 km/hr.

### EQUIPO

#### Unidad de potencia

- La fuente primaria de potencia utilizada por estos equipos puede ser eléctrica o motores diésel y su aplicación se realiza mediante mecanismos de transmisión mecánicos e hidráulicos.
- Los equipos que perforan diámetros superiores a 9" (230 mm), grandes minas a cielo abierto, por lo general son alimentados por energía eléctrica, corriente alterna de mediano voltaje (380 V).
- En el caso de perforadoras de menor tamaño, montadas sobre un camión, la fuente de energía son dos motores diésel, uno para mover el camión y otro para mover la sarta de perforación.
- También existen versiones diésel-eléctricas, utilizadas en aquellas minas con una elevada producción y que no disponen de suministro de energía eléctrica.

#### Mecanismo de rotación

- Montado sobre un bastidor que se desliza por el mástil de la perforadora. El par de rotación se transmite a la herramienta a través del varillaje.
- En los equipos de mayor tamaño, se utiliza preferentemente un motor eléctrico de corriente continua con su eje en posición vertical, que permite una fácil regulación de la velocidad de rotación en un rango entre 0 a 150 rpm.
- Los equipos montados sobre un camión (potencia diésel) utilizan un motor hidráulico que opera en circuito cerrado con una bomba de presión constante y un convertidor de par, permitiendo variar la velocidad de rotación.

### EQUIPO

#### Mecanismo de empuje

- Una penetración eficiente en la roca se consigue aplicando una fuerza de empuje según la resistencia de la roca y el diámetro de perforación requerido.
- El peso de las barras no es suficiente para obtener la carga necesaria por lo que se deben aplicar fuerzas adicionales transmitidas casi exclusivamente utilizando energía hidráulica.
- Prácticamente, casi sin excepciones, esta fuerza de empuje se obtiene a partir de un motor hidráulico.
- Existen varios sistemas, entre los cuales los más utilizados son: accionamiento por cadena, accionamiento por piñón y cremallera y accionamiento por cadena, piñón y cremallera.
- El mecanismo de empuje está diseñado para aplicar una fuerza del orden de un 50 % del peso de la máquina, y los equipos de mayor tamaño que operan hoy en día alcanzan un peso de hasta 120 toneladas.
- El sistema, además, permite accionar el izado de la columna de barras, a velocidades de elevación del orden de 20 metros por minuto.

### EQUIPO

#### Sistema de barrido

- El barrido del detritus de la perforación se realiza con aire comprimido, para lo cual el equipo está dotado de uno o dos compresores ubicados en la sala de máquinas.
- Las funciones que realiza son: enfriar y lubricar los cojinetes del tricono, limpiar el fondo del barreno y elevar el detrito con la correcta velocidad ascensional.
- Mediante un tubo flexible se inyecta el flujo de aire -a través del cabezal de rotación- por el interior de la columna de barras hasta el fondo del pozo. La presión requerida está en un rango de 2 a 4 bar.
- La falta de aire produce un consumo de energía innecesario, menor velocidad de penetración y mayor desgaste de la boca.
- La velocidad alta aumenta los desgastes en el centralizador y las barras de perforación.

#### Herramientas de corte (trepano)

- Existe básicamente un tipo trépano triturante formado por tres rodillos endentados, de forma cónica, que ruedan sobre el fondo del pozo, fracturando la roca por un proceso de indentación y corte, llamados triconos.



### EQUIPO

- Hoy en día, gracias a las innovaciones introducidas, este sistema de perforación rotativa predomina en la minería a cielo abierto de gran tamaño, tanto en rocas blandas como muy duras, en el rango de diámetros de perforación superiores a 175 mm.
- Se fabrican dos tipos de triconos: con dientes estampados y con insertos de carburo de tungsteno. Los primeros son los más antiguos, con un campo de aplicación restringido a rocas blandas y medianas.
- Los de insertos son capaces de perforar rocas muy duras, pero tienen un precio del orden de cinco a uno en relación con los anteriores, relación que es compensada por su mayor vida útil.
- El efecto de penetración de un tricono se obtiene por la aplicación combinada de dos acciones: indentación y corte.
- Los dientes o insertos del tricono, al rodar sobre el fondo, penetran en la roca por la aplicación de una gran fuerza de empuje. Esta acción es la que produce la indentación de la roca.
- También, por efecto de un desplazamiento lateral de los conos se consigue una acción de corte o desgarre de la roca.
- Esta segunda acción de corte o desgarre se incorpora cuando se trata de triconos diseñados para perforar rocas blandas a medianas, de menor resistencia a la compresión.

### EQUIPO

- Ángulo del eje:

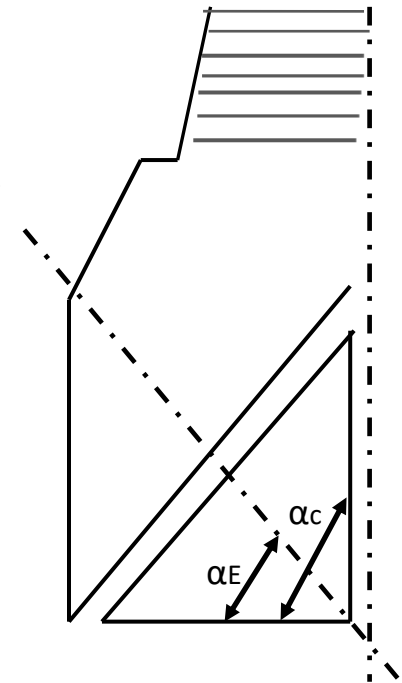
$\alpha_E$  = proporcional a la dureza de la roca.

- Ángulo del cono:

$\alpha_C$  = inversamente proporcional a la dureza de la roca.

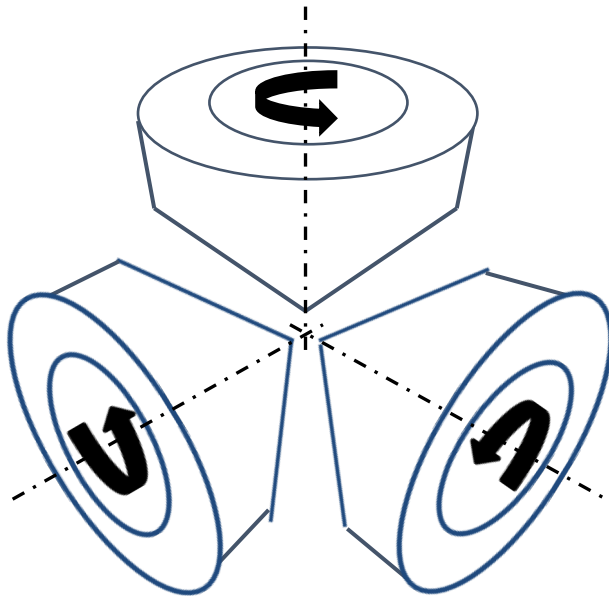
- Diámetro del cono:

$\Phi_C$  = inversamente proporcional a a dureza de la roca.

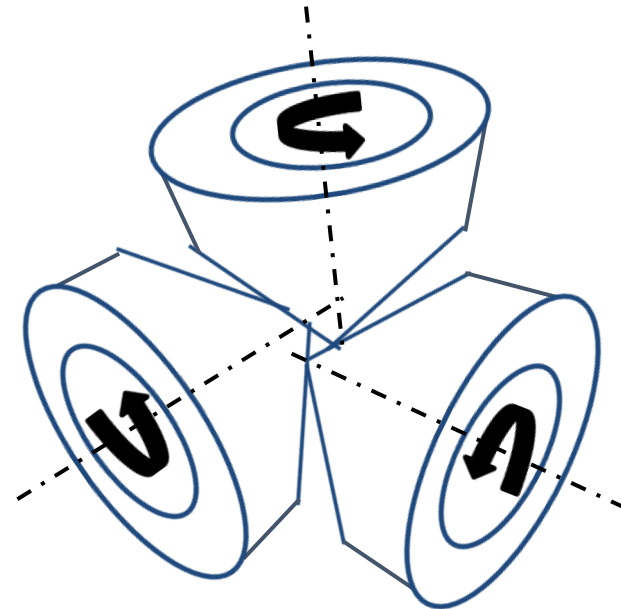


EQUIPO

Excentricidad



EXCENTRICIDAD NULA  
INDENTACIÓN PURA  
ROCAS DURAS



















EXCENTRICIDAD  $> 0$   
INDENTACIÓN Y CORTE  
ROCAS BLANDAS

EQUIPO

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

## TRICONOS CON DIENTES

TIPO DE ROCA	DISEÑO DIENTES		ACCIÓN		MODELO
	ESPACIO	ALTURA	TRITURACIÓN	CORTE	
BLANDAS					S (SOFT)
MEDIANAS					M (MEDIUM)
DURAS					H (HARD)
DURAS Y ABRASIVAS					HR





















## 1.5. Perforación rotativa con tricono

### EQUIPO

Rocas blandas → dientes o insertos largos y espaciados

Rocas duras → dientes o insertos cortos y juntos

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

TIPO DE ROCA	DISEÑO INSERTOS		ACCIÓN		MODELO
	ESPACIO	RESALTE	TRITURACIÓN	CORTE	
<b>BLANDAS</b> (< 40 MPa)					HH33
<b>MEDIANAS</b> (40 a 90 MPa)					HH44
<b>SEMIDURAS</b> (90 a 170 MPa)					HH55
<b>DURAS</b> (170 A 230 MPa)					HH77
<b>MUY DURAS</b> (>230 MPa)					HH99

### PROPIEDADES

#### Práctica operativa. Variables de operación

- Las variables de operación inherentes al sistema, que inciden en la velocidad de penetración, son:
  - Velocidad de rotación
  - Fuerza de empuje
  - Diámetro de perforación
  - Velocidad y caudal del aire de barrido
  - Desgaste de los trépanos
- Estas variables dependen de un factor externo al sistema: la fragilidad, dureza o resistencia de la roca.
- En el caso de la perforación rotativa, la evidencia empírica indica que existe una relación directa entre la resistencia a la compresión de la roca y la velocidad de penetración.
- Esta conclusión resulta conceptualmente coherente, atendiendo a la forma como se aplica la energía a la roca y su consiguiente ruptura originada por un proceso de indentación.

### PROPIEDADES

- No existe una clasificación universalmente aceptada de las rocas en función de su resistencia a la compresión.
- En la literatura técnica sobre el tema se encuentran diversas proposiciones. Algunas muy simples, que sólo diferencian entre rocas blandas, medianas y duras. Otras más sofisticadas, incluyen hasta seis o siete categorías.
- Haciendo una síntesis, para los efectos del análisis que sigue, se adoptará la clasificación que se enuncia en el cuadro siguiente.

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm <sup>2</sup> ]	Sc [MPa]
MUY BLANDAS	< 400	➤ 40
BLANDAS	400 - 800	40 - 80
MEDIANAS	800 - 1200	80 - 120
DURAS	1200 - 2000	120 - 200
MUY DURAS	> 2000	> 200

- 1 millón de Pascales (1 Mpa) = 10 Kg/ cm<sup>2</sup>

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### PROPIEDADES

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

#### Velocidad de rotación

- Una velocidad de rotación  $N$ , expresada en [rpm] adecuada, suele ser inversamente proporcional a la resistencia a la compresión de la roca ( $Sc$ ).
- En la tabla siguiente se indican las velocidades aplicadas en la práctica (**empíricamente**) para los diferentes tipos de rocas identificados previamente.

TIPO DE ROCA	$Sc$ [kgp/cm <sup>2</sup> ]	$N$ [rpm]
MUY BLANDAS	< 400	120 – 100
BLANDAS	400 – 800	100 – 80
MEDIANAS	800 – 1200	80 – 60
DURAS	1200 – 2000	60 - 40
MUY DURAS	> 2000	40 - 30

- Según el tipo de dientes, esta velocidad de rotación varía en un rango de 60 a 120 rpm para los triconos con dientes estampados, y entre 50 a 80 rpm en el caso de los triconos con insertos.



### PROPIEDADES

#### Fuerza de empuje y diámetro de perforación

- La fuerza de empuje (F) que es necesario aplicar aumenta directamente con la dureza de la roca, y debe alcanzar una magnitud suficiente para sobrepasar su resistencia a la compresión.
- Esta fuerza no puede exceder un determinado valor límite, para evitar daños prematuros en el trépano.
- Aumenta proporcionalmente con el empuje hasta que llega a un agarrotamiento o defecto de limpieza.
- En formaciones rocosas duras o muy duras, una fuerza excesiva conduce a la destrucción de los rodamientos, lo que significa el fin de la vida útil de la herramienta.
- La mayor o menor resistencia de los rodamientos depende del tamaño del trépano o, en último término, del diámetro de perforación.
- A mayor diámetro, más grande es el trépano y por consiguiente más robustos y resistentes son sus rodamientos.
- Conclusión: la fuerza de empuje es función de dos variables: la dureza de la roca y el diámetro de perforación.

### PROPIEDADES

#### Fuerza de empuje y diámetro de perforación

- Según la dureza de la roca, la fuerza de empuje mínima necesaria para vencer su resistencia a la compresión, está dada por la siguiente fórmula empírica:

$$F_{\text{mín}} = 28,5 S_c \Phi \text{ [lbp]}$$

- Donde,

$$S_c = \text{Resistencia a compresión de la roca [Mpa]}$$

$$\Phi = \text{diámetro de perforación [pulg]}$$

- La fuerza de empuje se expresa en libras-peso [lbp] por unidad de diámetro del trépano, expresado en pulgadas ( $\emptyset$ ").

### PROPIEDADES

#### Fuerza de empuje

- En la tabla siguiente se comparan los valores mínimos que resultan de aplicar la fórmula anterior con los valores observados en la práctica minera según la dureza de la roca.

1 libra = 453 gramos

1 Mpa = 10 Kg/cm<sup>2</sup>

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

TIPO DE ROCA	Sc [kgp/cm <sup>2</sup> ]	F' min [lbp/" de $\Phi$ ]	F' prác [lbp/" de $\Phi$ ]
MUY BLANDAS	< 400	< 1150	<1500
BLANDAS	400 – 800	1150 – 2300	1500 - 3000
MEDIANAS	800 – 1200	2300 – 3400	3000 – 5000
DURAS	1200 – 2000	3400 – 5700	5000 – 7000
MUY DURAS	> 2000	>5700	7000 – 9000

### PROPIEDADES

#### Fuerza de empuje

- El empuje máximo por encima del cual se produce el enterramiento del tricono es el doble del anterior:

$$E_M = 2 * E_m$$

- El empuje límite que soporta un tricono es función del tamaño de sus cojinetes, que depende del diámetro de perforación ( $\phi$ ).

$$F_{\text{máx}} = 810 \phi^2 \text{ [lbp]}$$

### PROPIEDADES

#### Fuerza de empuje máxima que soportan los rodamientos del tricono

- Si se asignan valores numéricos a la fórmula anterior, redondeando las cifras, se obtienen los resultados de la tabla siguiente.

$\Phi''$	F máx [lbp]	F' máx [lbp/ de $\Phi$ ]
5	20000	4000
6	29000	4900
7	40000	5700
8	52000	6500
9	66000	7300
10	81000	8100
12	117000	9700
15	182000	12100

### PROPIEDADES

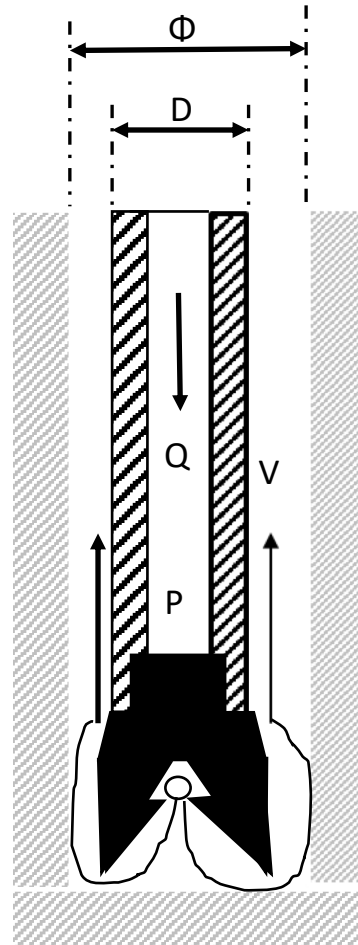
#### Velocidad y caudal del aire de barrido

- El aire comprimido que se inyecta por el interior de la columna de barras hacia el fondo del barreno, cumple los siguientes objetivos:
  - Barrido del detritus en el fondo del pozo.
  - Extracción del detritus a superficie.
  - Refrigeración y lubricación de los rodamientos del tricono.
- El barrido y extracción del detritus de perforación se realiza gracias a la energía cinética del aire que circula por el espacio anular comprendido entre las barras y las paredes del pozo.
- La eficiencia del proceso depende de la velocidad del aire ( $V$ ) en este espacio anular y de la masa de aire o caudal ( $Q$ ) que circula por el sistema.

## 1.5. Perforación rotativa con tricono

### PROPIEDADES

#### Velocidad y caudal del aire de barrido



### PROPIEDADES

#### Velocidad y caudal del aire de barrido

- La refrigeración de los rodamientos se obtiene por efecto del paso del aire por el tricono, que a su vez depende de la presión (P) con que llega el aire a la herramienta de corte.
- ❖ Velocidad del aire
- La velocidad ascensional mínima para la extracción del detritus es función de la densidad de la roca y del tamaño promedio de las partículas.
- Existen algunas fórmulas empíricas que permiten estimar esta velocidad.

$$V = 573 \times \frac{\delta r}{\delta r + 1} \times d^{0,6}$$

- O también:

$$V = 250 \times \delta^{1/2} \times d^{1/2}$$

- Donde:

V = velocidad ascensional mínima (m/min)

$\Delta_r$  = densidad de la roca (g/cm<sup>3</sup>)

D = diámetro promedio de las partículas (mm)



### PROPIEDADES

- En etapa de proyecto, las fórmulas anteriores tienen escasas posibilidades de aplicación, dado las dificultades para obtener datos fiables acerca del tamaño promedio del detritus de perforación.
- Según la práctica minera, las velocidades de aire recomendadas atendiendo al tipo de roca, son las indicadas en la tabla siguiente:

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD MÍNIMA		VELOCIDAD MÁXIMA	
	(m/min)	(pies/min)	(m/min)	(pies/min)
<b>BLANDAS</b>	1200	4000	1800	6000
<b>MEDIANAS</b>	1500	5000	2100	7000
<b>DURAS</b>	1800	6000	2400	8000

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### PROPIEDADES

#### Velocidad y caudal del aire de barrido

- La velocidad ascensional máxima indicada obedece al problema de desgaste de las barras o tubos de perforación.
- El flujo de aire que circula por el espacio anular lleva en suspensión un material que puede ser altamente abrasivo, especialmente si hay presencia de cuarzo u otros minerales de gran dureza, como ocurre frecuentemente en la minería metálica.
- En los fenómenos de flujo de este material, el desgaste por roce es proporcional al cuadrado de la velocidad.

### PROPIEDADES

#### Velocidad y caudal del aire de barrido

- Caudal del aire de barrido

El caudal de aire de barrido (Q) se calcula a partir de la fórmula básica que lo relaciona con la sección del anular y con la velocidad de flujo.

Q = Área de la sección transversal x Velocidad de flujo

$$Q = \frac{\pi(\Phi^2 - D^2)}{4 \times 10^6} \times V \quad \left(\frac{m^3}{min}\right)$$

$$Q = \frac{\pi(\Phi^2 - D^2)}{4 \times 144} \times V \quad \left(\frac{pies^3}{min}\right)$$

Donde:

Q = caudal de aire (m<sup>3</sup>/min) o (pies<sup>3</sup>/min)  
 Φ = diámetro del trépano (mm) o (pulg)  
 D = diámetro exterior barras (mm) o (pulg)  
 V = velocidad del aire (m/min) o (pies/min)

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### PROPIEDADES

#### Velocidad y caudal del aire de barrido

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

- Caudal del aire de barrido
- Otro factor a considerar es el área de la sección anular por donde circula el aire o diferencia entre el diámetro de perforación y el diámetro exterior del varillaje [ $\Phi - D$ ].
- Dado que a medida que aumenta la resistencia de la roca el tamaño del detritus es más pequeño, la práctica operacional aconseja adoptar los siguientes valores:

TIPO DE ROCA	$(\Phi - D)$	
	(pulg)	(mm)
<b>BLANDAS</b>	3	76
<b>MEDIANAS</b>	2	51
<b>DURAS</b>	1 <sup>1/2</sup>	38

### PROPIEDADES

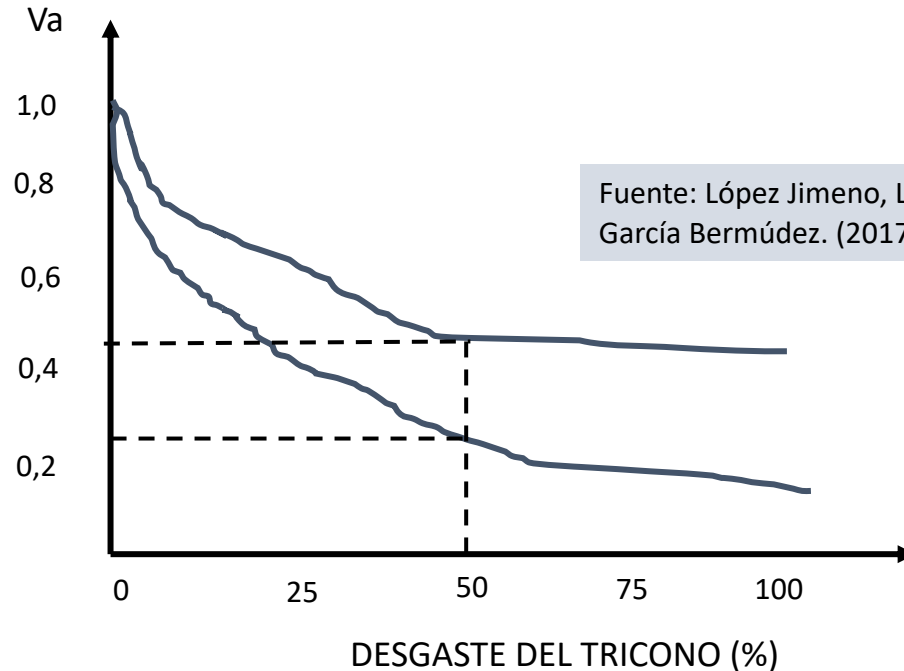
#### Velocidad y caudal del aire de barrido

- Presión del aire de barrido
- Los resultados de las investigaciones realizadas por los fabricantes indican que la caída de presión (AP) del aire al pasar por el tricono, requerida para una adecuada refrigeración de sus rodamientos, se encuentra en un rango de 30 a 50 [psi], lo que equivale a 2,1 y 3,5 [bar] respectivamente.
- Si se suma la pérdida de carga que experimenta el flujo de aire entre el compresor y la herramienta, estimada en unas 10 [psi], se concluye que el valor promedio de la presión manométrica requerida a la salida del compresor es del orden de 3,5 [bar].
- Esta presión final incide significativamente en el consumo de energía del compresor, y en último término en el costo de operación del equipo.
- Tal como se verá más adelante, el mayor consumo de energía de las perforadoras rotativas se origina en el suministro de aire comprimido para la extracción del detritus.

### PROPIEDADES

#### Desgaste del tricono

- Si se utilizan triconos con dientes estampados, la velocidad de penetración disminuye según aumenta el desgaste de la herramienta.
- Cuando un tricono se encuentra en la mitad de su vida útil (50 %), la velocidad de penetración se ha reducido, aproximadamente, entre un 50 a un 75 % con respecto a la alcanzada con una herramienta nueva.



### PROPIEDADES

#### Consumos de energía

- Cuando la máquina está perforando los principales consumos de energía son los vinculados a los siguientes accionamientos:
  - Rotación
  - Fuerza de empuje
  - Barrido y extracción del detritus

#### Energía consumida por la rotación

- Para hacer rotar la columna de barras (varillaje), es preciso aplicar una fuerza tangencial (F).
- La energía consumida en un giro ( $E_r$ ) es igual al producto de la fuerza por el camino recorrido:

$$E_r = F \times 2 \pi R = 2 \pi T \text{ (kgm/vuelta)}$$

- donde T es el torque ( $R \times F$ ) de rotación [kgm].

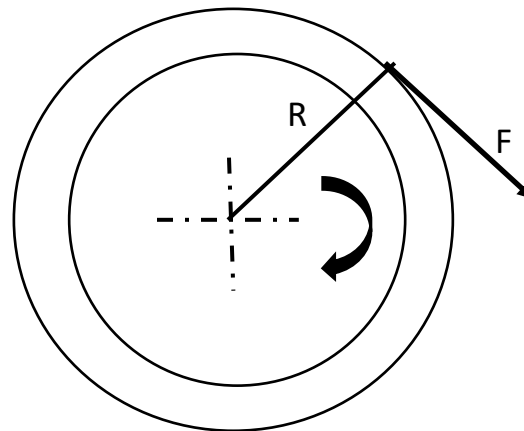
### PROPIEDADES

#### Energía consumida por la rotación

- Si se considera como unidad de tiempo [min], la potencia requerida ( $W_r$ ) será por lo tanto igual a:

$$W_r = 2 \pi N T \quad (\text{kgm/min})$$

- donde  $N$  es la velocidad de rotación, que es inversamente proporcional a la dureza de la roca ( $S_c$ ).



SECCIÓN DE LA COLUMNA  
DE BARRAS



### PROPIEDADES

#### Energía consumida por la rotación

- La fórmula anterior muestra la energía consumida en el fondo del pozo.
- En el caso de un equipo eléctrico, para obtener la potencia aplicada en el motor de rotación ( $W_{MR}$ ), es preciso incorporar el rendimiento mecánico de la transmisión ( $\eta_m$ ) y el rendimiento eléctrico ( $\eta_e$ ) del motor.
- Expresada esta potencia en [HP], se obtiene:

$$W_{MR} = \frac{2\pi N T}{60 \times 75 \times \mu_m \times \mu_e} \quad (\text{HP})$$

- Donde:

$$\begin{array}{l} \mu_m \quad \quad \quad 0,80 - 0,9 \\ \mu_e \quad \longrightarrow \quad 0,90 - 0,95 \\ \quad \quad \quad \longrightarrow \end{array}$$

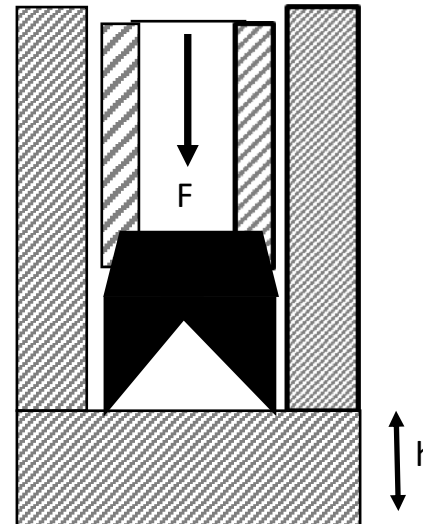
- HP se define como la potencia necesaria para elevar verticalmente a la velocidad de 1 pie/minuto una masa de 33.000 libras.  
Un HP = 1,0138 CV

### PROPIEDADES

#### Energía consumida por el sistema de empuje

- La penetración de la herramienta requiere la aplicación de una fuerza de empuje ( $F$ ); no obstante, la energía consumida por este accionamiento es pequeña comparada con la rotación.
- Suponiendo que en un giro el tricono avanza una longitud  $h$ , la energía consumida en una vuelta ( $E_e$ ) será igual al producto de la fuerza [kgp] por el camino recorrido [m].

$$E_e = F \times h \quad (\text{kgm/vuelta})$$



### PROPIEDADES

#### Energía consumida por el sistema de empuje

- Luego, si se elige como unidad de tiempo [min], la potencia requerida ( $W_e$ ) será igual a:

$$W_e = F \times V_a \quad (\text{kgm/min})$$

- donde  $V_a$  es la velocidad de avance expresada en [m/min].
- En la práctica minera, en un rango de diámetros de 8 a 12 pulgadas (200 a 300 mm) y en rocas medianas a duras (80 a 200 Mpa), se registran velocidades del orden de 20 a 10 [m/hr].
- Al igual que en la situación anterior, esta energía es la consumida en el fondo del barreno.
- En el caso de los equipos eléctricos, generalmente el mecanismo de empuje es accionado por un motor hidráulico, que tiene detrás una bomba y un motor eléctrico que acciona dicha bomba.
- Por lo tanto, es preciso considerar el rendimiento mecánico de las transmisiones ( $\eta_m$ ), el rendimiento hidráulico del motor de empuje ( $\eta_h$ ), el rendimiento de la bomba ( $\eta_b$ ) y el rendimiento eléctrico ( $\eta_e$ ) del motor que acciona la bomba.

### PROPIEDADES

#### Energía consumida por el sistema de empuje

- Así, la potencia aplicada en la fuerza de empuje ( $W_E$ ), expresada en [HP], será:

$$W_E = \frac{F \times V_a}{60 \times 75 \times \mu_m \times \mu_h \times \mu_b \times \mu_e} \quad (HP)$$

- Donde:

$\mu_m$                       0,75 – 0,85

$\mu_h$      $\longrightarrow$       0,65 – 0,75

$\mu_b$      $\longrightarrow$       0,65 - 0,75

$\mu_e$      $\longrightarrow$       0,90 – 0,95

$\longrightarrow$

### PROPIEDADES

#### Energía consumida en el aire de barrido

- Los equipos de perforación rotativa están dotados de uno o dos compresores que suministran el aire comprimido necesario para el barrido y extracción del detritus.
- La energía consumida en un proceso de compresión depende de dos parámetros: la presión final (P) y el caudal de aire libre (Q) que interviene en el proceso.
- Generalmente se emplean compresores de tornillo de baja presión: 2,8 y 3,5 [Bar].
- Una adecuada refrigeración de los rodamientos del tricono no requiere presiones mayores.
- Respecto al caudal, factor que incide directamente en la velocidad del aire (energía cinética) que hace posible la extracción del material, se encuentra en un rango entre 10 y 50 [m<sup>3</sup>/min], según el tamaño del equipo.

### PROPIEDADES

#### Energía consumida en el aire de barrido

- Simplificamos realizando el trabajo ( $W_{is}$ ) de compresión del aire mediante un proceso isotérmico teórico.
- Imaginemos que en el cilindro del pistón del compresor tenemos un volumen  $V$  de aire.
- En un principio este sistema se encuentra en equilibrio, la presión que ejerce el gas sobre las paredes del cilindro y sobre el pistón es igual a la presión que ejerce el peso del pistón sobre el aire.
- Ahora imaginemos que repentinamente aumentamos la presión del pistón sobre el aire, se rompe el equilibrio y el pistón se deslizará realizando un trabajo  $W = fuerza \times desplazamiento = Sección \times Presión \times Desplazamiento = Volumen \times Presión$ .
- Esta energía se convertirá instantáneamente en un incremento de energía interna del aire en el cilindro, y es así como el aire absorberá el trabajo del desplazamiento pistón.

## PROPIEDADES

### Energía consumida en el aire de barrido

$$W_{is} = \int_{P_1}^{P_2} V dP$$

$$W_{is} = P_1 V_1 \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

$VP = V_1 P_1$  de donde:

$V = P_1 V_1 / P$

El valor del trabajo efectuado por el pistón del compresor:

T = Fuerza x desplazamiento del pistón

F = Presión x Sección

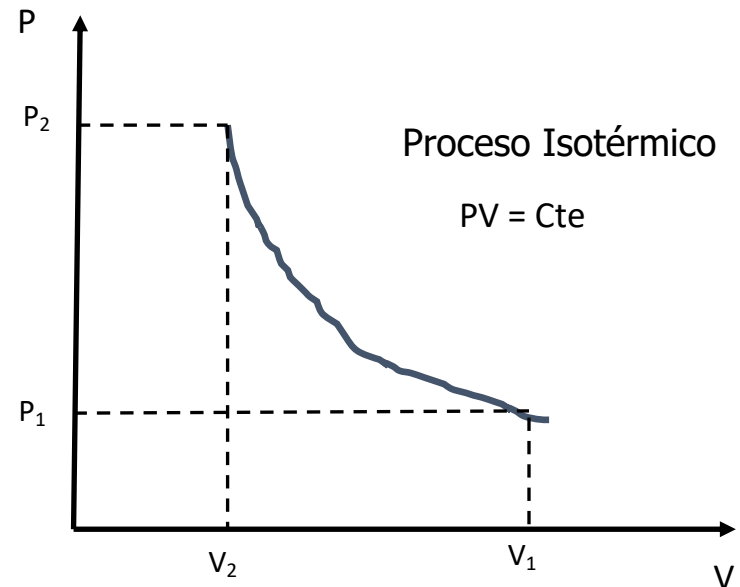
Siendo:

F = fuerza del pistón

$P_1$  = presión inicial

$V_1$  = Volumen inicial

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)



### PROPIEDADES

#### Energía consumida en el aire de barrido

- Reemplazando en la fórmula anterior los valores correspondientes a la situación práctica que aquí se analiza, se obtiene la fórmula siguiente que representa la potencia del compresor en HP:

$$W_{ac} = \frac{P_o Q \text{Ln} \left( \frac{P_1}{P_o} \right)}{75 \times 60 \times \mu_c} \quad (\text{HP})$$

- Siendo:
  - $P_o$  = Presión atmosférica
  - $P_1$  = Presión a la salida del compresor
  - $Q$  = Caudal de aire
  - 1 CV = 75 kgm/seg
  - 1 min. = 60 seg



### PROPIEDADES

#### Velocidad de penetración

- En la etapa de estudio de un proyecto es preciso estimar costes de operación.
- En una mina a cielo abierto, el coste de perforación es relevante.
- Para realizar una estimación es necesario considerar cuántos metros por hora barrenará el equipo seleccionado para un determinado diámetro de perforación.
- La velocidad de penetración depende no sólo de las variables operativas del sistema, si no también de las propiedades físico-mecánicas del macizo rocoso.
- Cuando es posible realizar ensayos de perforabilidad en muestras de roca, se puede recurrir a fórmulas empíricas.
- Tales fórmulas combinan algunas variables de operación del sistema con la resistencia a la compresión de la roca.
- En el caso de la perforación rotativa existe una buena correlación entre la velocidad de avance y esta propiedad de la roca.

### PROPIEDADES

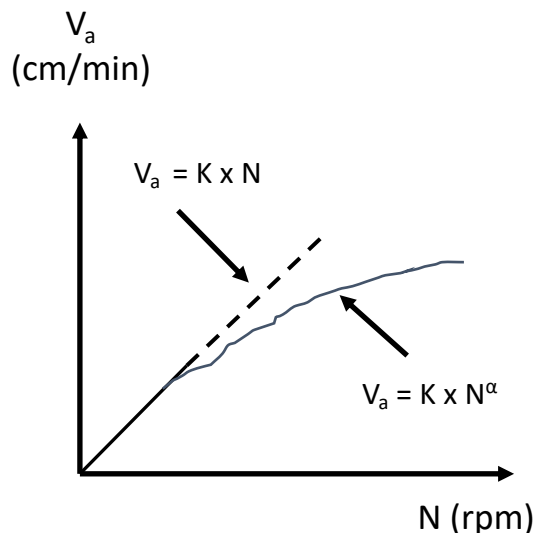
#### Velocidad de penetración

- Si se dispone de muestras de tamaño adecuado, las compañías fabricantes de triconos ofrecen a sus clientes ensayos a escala en sus "bancos de prueba", a partir de los cuales le emiten un informe donde incluyen el tipo de tricono recomendado, velocidad de rotación y fuerza de empuje adecuadas, velocidad de penetración estimada y posible vida útil de la herramienta.

#### Velocidad de avance versus las variables de operación

##### a) Velocidad de rotación

- Mientras el barrido es perfecto, la velocidad de avance es linealmente proporcional a la velocidad de rotación.



En la práctica, a medida que  $V_a$  aumenta, el barrido se torna ineficiente.

$$V_a = K \times N^\alpha$$

$$\alpha < 1$$

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

## PROPIEDADES

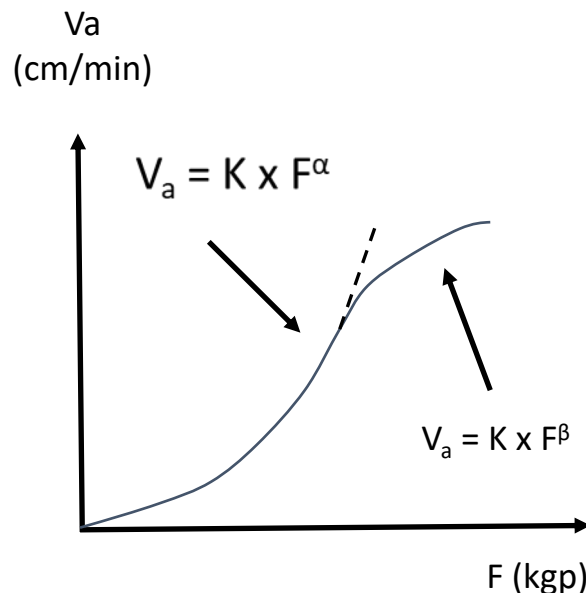
### Velocidad de avance versus las variables de operación

#### b) Fuerza de empuje

Mientras el barrido es perfecto, la velocidad de avance **V<sub>a</sub>** aumenta exponencialmente con la fuerza de empuje.

$$V_a = K \times F^\alpha$$

$$\beta < 1$$



En la práctica, a medida que **V<sub>a</sub>** aumenta, el barrido se torna ineficiente.

$$V_a = K \times F^\beta$$

$$1 < \alpha < 2$$

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### PROPIEDADES

#### Velocidad de avance versus las variables de operación

##### c) Dureza de la roca

- En la perforación rotativa, al aplicarse la energía en la interfase herramienta-roca, principalmente por una acción de indentación, un buen indicador para estimar la velocidad de penetración es la resistencia a la compresión de la roca.
- Así lo confirman tanto los ensayos a escala de "banco de pruebas" como la práctica operacional.
- Una primera aproximación se puede lograr recurriendo al concepto de energía específica ( $E_v$ ), definida como la energía requerida para remover la unidad de volumen de roca, expresada generalmente en [kgm/cm<sup>3</sup>].

### PROPIEDADES

#### Velocidad de avance versus las variables de operación

##### c) Dureza de la roca

- En el caso de la perforación por percusión, se puede enunciar el siguiente principio: "la energía aplicada a la roca por unidad de tiempo [min] se consume en remover un cierto volumen de roca en esa misma unidad de tiempo".
- Luego, se puede escribir:  $E_r + E_e = A \times V_a \times E_v$  (kgm/min)

donde:

- $E_r$  → energía consumida en la rotación (kgm/min)
- $E_e$  → energía consumida en la fuerza de empuje (kgm/min)
- $A$  → área de la sección transversal del barreno (cm<sup>2</sup>)
- $V_a$  → velocidad de penetración (cm/min)
- $E_v$  → energía específica (kgm/cm<sup>3</sup>)
- 

$E_v$  = Energía requerida para remover la unidad de volumen de roca (kgm/cm<sup>3</sup>)

### PROPIEDADES

#### Velocidad de avance versus las variables de operación

##### c) Dureza de la roca

- A partir de la relación anterior y recordando que [ $E_e \approx 0,1 E_r$ ], se obtiene:

$$1,1 (2 \pi N T) = A x V_a x E_v \quad \left(\frac{kgm}{min}\right)$$

$$V_a = \frac{1,1 (2 \pi N T)}{A x E_v} \quad \left(\frac{cm}{min}\right)$$

N → velocidad de rotación (rpm)

T → torque de rotación (kgm)

A → área sección transversal del barreno (cm<sup>2</sup>)

E<sub>v</sub> → energía específica (kgm/cm<sup>3</sup>)

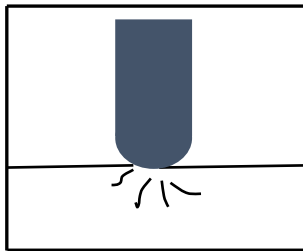
→

### DEFINICIÓN

- La perforación rotativa por corte tuvo su máximo desarrollo en los años 40 del siglo pasado.
- Hoy día ha sido sustituida por otro tipo de perforación como es la rotopercusión con motor en cabeza, rotopercusión con motor en fondo o rotativa con tricono, limitándose solamente a diámetros pequeños y resistencia a la compresión de la roca baja.
- Incluye todas las formas de perforación rotativa mediante útiles cuya estructura de corte está formada por elementos de carburo de tungsteno dispuestos en la herramienta de perforación ocupando unas posiciones fijas.
- Según la variación en forma y ángulo de estas posiciones se distinguen los siguientes tipos:
  1. Bocas bilabiales o de tenedor de diámetros de 36 a 50 mm.
  2. Bocas trialetas o multialetas de diámetros ente 50 y 115 mm.
  3. Bocas de labios reemplazables de diámetros entre 150 y 400 mm.

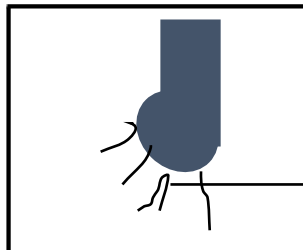
### DEFINICIÓN

- La fragmentación de la roca se origina principalmente como consecuencia de los esfuerzos de cizalladura generados.
- En la rotación con tricono el mecanismo principal de ataque con boca con dientes estampados o insertos es de trituración por impacto fallando la roca por compresión.
- Por ello la velocidad de perforación varía de forma proporcional a la velocidad de giro.
- También es proporcional a la fuerza de empuje siempre y cuando ésta no supere un cierto valor limite que haga a la broca hundirse tanto dentro de la formación que se quede atascada.



Fallan la roca  
por  
compresión

Perforación con tricono



Fallan la roca  
por esfuerzo de  
corte

Perforación por corte





### EQUIPO

- [Tipos de bocas de perforación:](#)
  1. Bilabiales.
  2. Trialetas.
  3. Multialetas.
  4. Escariadoras.

### MECANISMO

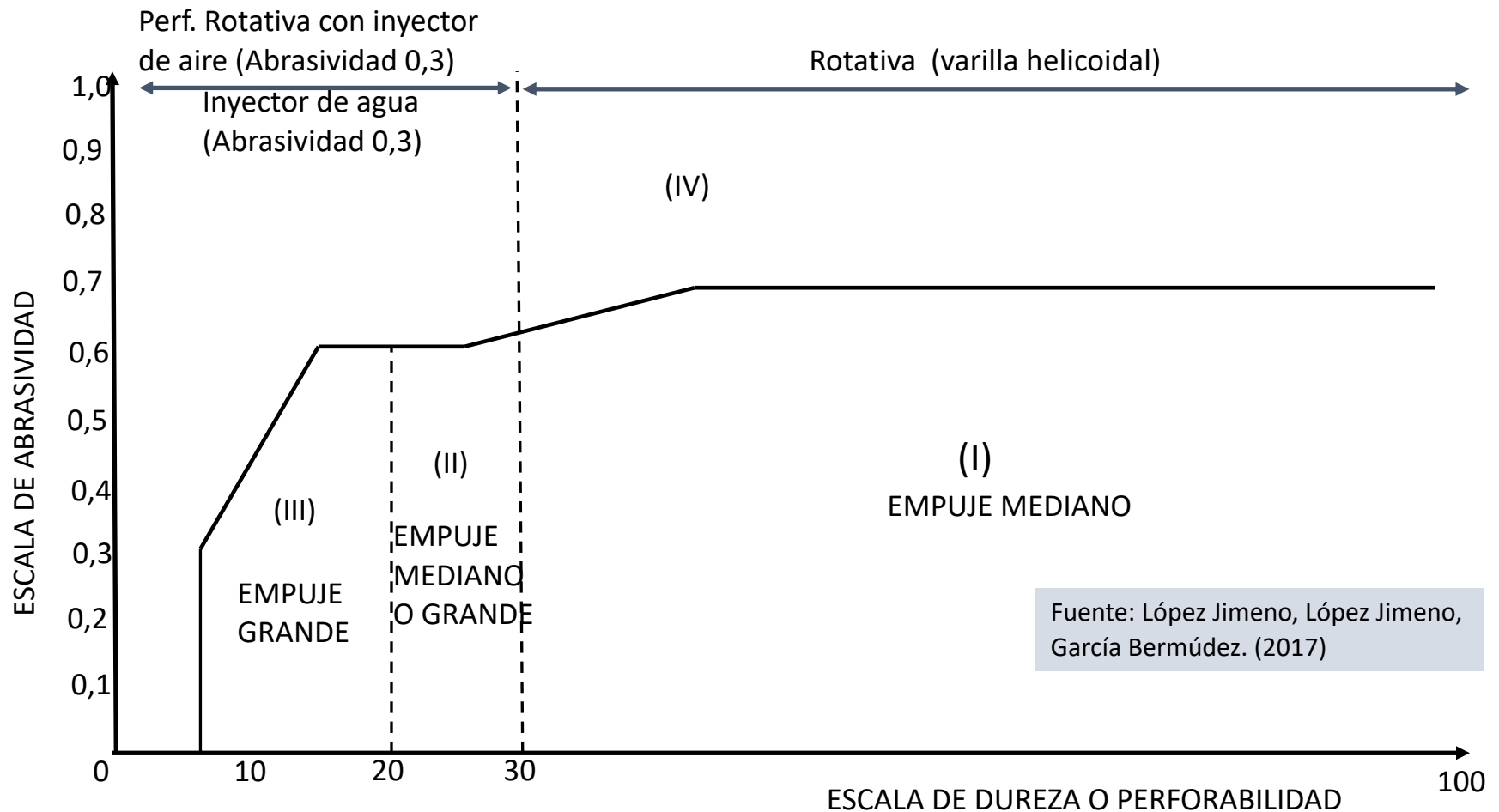
- La experiencia demuestra que el empuje y el par de rotación sobre la boca varían en función de la naturaleza discontinua de la formación de detritus.
- Las acciones de la boca sobre la roca, que dan lugar al mecanismo de rotura, son:
  - 1.- Deformaciones elásticas debidas a las tensiones provocadas por la torsión de la boca.
  - 2.- Tensiones en la zona de impacto boca – roca, con desprendimientos de fragmento de roca.
  - 3.- Liberación de las tensiones de deformación e impacto de la boca contra la roca.
  - 4.- Una vez evacuados los fragmentos de roca se inicia de nuevo el ciclo

### FUNDAMENTOS

- Las velocidades de perforación obtenidas con este sistema son superiores a las que se obtendrían con un sistema a percusión.
- Esto es debido a que la perforación rotativa con corte es un proceso de corte de la roca casi continuo, mientras que en la perforación percutiva la fragmentación de la roca ocupa en tiempo escasamente el 15% del ciclo del martillo.
- Principal limitación: fuerte incremento del par de giro y del desgaste del útil a medida que aumenta el diámetro de perforación o la dureza de la roca.
- Aplicable por tanto a rocas blandas que puedan perforarse con empujes inferiores a las 2500 libras por pulgada de diámetro (500 N/mm aproximadamente) y con un contenido de sílice no superior al 8%.
- La velocidad de rotación está limitada por el desgaste del útil de perforación que depende a su vez de la naturaleza de la roca y de la velocidad periférica.
- Entonces la velocidad de rotación y el diámetro de barreno se tienen que adecuar entre sí para que la velocidad periférica del útil de corte no sea superior a 1 m/s.

### FUNDAMENTOS

- La velocidad de penetración para una roca dada y para un diámetro determinado es linealmente proporcional al empuje y a la velocidad de rotación.



### FUNDAMENTOS

- **Zona I:**
- Dureza muy débil y de poca abrasividad con dominio de la perforación rotativa en seco y presiones pequeñas.
- Perforación rotativa y poco empuje (1 a 8 kN)
- Velocidad de rotación: 800-1100 rpm.
- Perforación en seco.
- Tipos de roca: carbón, potasa, yeso y fosfato blando.
- Útiles: barrenas espirales, bocas bilabiales ( $\alpha= 110^{\circ}$ - $125^{\circ}$ ;  $\beta=75^{\circ}$ ;  $\gamma=0^{\circ}$ - $14^{\circ}$ )
- Velocidad de penetración: 3,5-5m/min.
- Con aire húmedo las velocidades de penetración se multiplican por 1,5 y 2.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### FUNDAMENTOS

- **Zona II:**
- Dureza débil y de poca abrasividad con dominio de la perforación rotativa en seco o inyección de aire a presión media.
- Empuje 8 a 12 kN.
- Velocidad de rotación: 550-800 rpm.
- Perforación con inyección de aire húmedo.
- Tipos de roca: caliza y bauxitas blandas, minerales de hierro blandos.
- Bocas: ( $\alpha=125^\circ$ ;  $\beta=75^\circ-80^\circ$ ;  $\gamma=0^\circ-2^\circ$ )
- Velocidad de penetración: 2-3,5 m/min.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### FUNDAMENTOS

- **Zona III:**
- Dureza media y de poca abrasividad con dominio de la perforación rotativa, empujes grandes con inyección de agua a alta a presión. El empuje sobre la barrena puede alcanzar 20 kN.
- Empuje 12 a 18 kN.
- Velocidad de rotación: 300 550 rpm.
- Perforación con inyección de agua.
- Tipos de roca: bauxitas y calizas medias, esquistos sin cuarcitas, yesos duros y fosfatos duros.
- Bocas: ( $\alpha= 125^{\circ}$ - $140^{\circ}$ ;  $\beta=80^{\circ}$ ;  $\gamma=-2^{\circ}$ - $6^{\circ}$ )
- Velocidad de penetración: 1-1,8 m/min.
- La potencia de rotación, en HP, necesaria para hacer girar un trépano es:

$$HP_r = 8,55 \cdot 10^{-9} \cdot D^2 \cdot N_r \cdot E^2$$

Donde:

D: diámetro (mm)

Nr: empuje de rotación (rpm)

E: Empuje (kN)

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### FUNDAMENTOS

- El par de rotación necesario se calcula:

$$T_r = \frac{HP_r \times 7,14}{N_r}$$

- Donde:

$T_r$  = Par de rotación (kN.m)



### FUNDAMENTOS

- [Evacuación del detrito](#)
- El detrito se elimina con el fluido de barrido que puede ser aire (en trabajos a cielo abierto), agua o aire húmedo (en los trabajos de interior).
- El uso de aire con inyección de agua como fluido de barrido aporta las siguientes ventajas:
  1. Refrigerar la boca de perforación.
  2. Disminuir desgastes.
  3. Evitar el colmatado del barreno (acumulación de sedimentos).
  4. Eliminar el polvo (gran importancia en terrenos abrasivos).
- Para la inyección de aire húmedo se necesita del orden de 1000 a 1500 l/min y unos 250 cm<sup>3</sup>/ min de agua.
- En rocas muy blandas, de 30 a 40 Mpa, puede emplearse varillaje helicoidal para evacuar el detrito.

### FUNDAMENTOS

- [Evacuación del detrito](#)
- En la tabla siguiente se indican las velocidades típicas de penetración en diferentes tipos de rocas y el sistema de barrido.

TIPO DE ROCA	VELOCIDAD DE PENETRACIÓN (m/min)	SISTEMA DE BARRIDO
Yeso duro	1,5 – 2	Agua
Caliza, bauxita	1,5 – 2,5	Agua
Pizarra	1,5 – 3	Agua o en seco
Mineral de hierro blando	3 – 8	Aire húmedo o en seco
Yeso blando	3,5 – 8	Aire húmedo o en seco
Fosfato, carbón, sal potasa	3,5 - 10	Aire húmedo o en seco

### FUNDAMENTOS

- [Útiles de corte](#)
- Es importante el diseño del útil de corte para conseguir una mayor eficiencia, según el tipo de roca a perforar.
- El ángulo de ataque “ $\alpha$ ” varía generalmente entre  $110^\circ$  y  $140^\circ$  (más obtuso al aumentar la dureza de la roca).
- El ángulo del labio de corte “ $\beta$ ” varía entre  $75^\circ$  y  $80^\circ$ .
- El ángulo de corte “ $\gamma$ ” entre  $-6^\circ$  y  $14^\circ$ , siendo positivo en rocas blandas y negativo en las duras.
- El ángulo de desahogo  $\delta = 90^\circ - \beta = \gamma$

### FUNDAMENTOS

- La velocidad de rotación esta limitada por el desgaste de las bocas al aumentar las revoluciones.
- Los desgastes aumentan con la abrasividad de las rocas y según aumenten el empuje y las fuerzas de rozamiento.
- Los limites prácticos son dos:
  1. Resistencia a la compresión de las rocas menor de 80 Mpa .
  2. Contenido en sílice inferior al 8%.

### CARACTERÍSTICAS

- [Perforación horizontal dirigida:](#)
- La perforación horizontal dirigida es un método de perforación utilizado para la instalación de tuberías sin zanjas.
- Su principal uso es la instalación de líneas de comunicación (fibra óptica, cables de datos), líneas eléctricas, gaseoductos, oleoductos y conducciones de agua a presión.
- Se trata de una técnica que está adquiriendo un mayor auge en las grandes ciudades debido a que no es necesario excavar zanjas a cielo abierto, con lo cual no se destruye el pavimento existente ni se afecta a las conducciones próximas.
- Es de gran utilidad cuando es necesario pasar conducciones por debajo de ríos, conducciones férreas e incluso carreteras, no afectando en absoluto a su servicio.
- Los diámetros máximos que se pueden manejar con esta técnica son de hasta 1800 mm y con longitudes de hasta 2000 m.
- Es importante realizar un estudio previo del material a perforar así como las conducciones afectadas para realizar una perforación exitosa.

### MÉTODO

- [Perforación horizontal dirigida:](#)
- Los pasos fundamentales para la ejecución de la PHD son:
  1. **Diseño de la obra:** Es el paso de mayor importancia para la correcta ejecución, es necesario un levantamiento topográfico y una ejecución de sondeos de reconocimiento a lo largo de la traza. Una vez interpretados los resultados, se procede al diseño del trazado y maquinaria optima para el trabajo a desarrollar.
  2. **Perforación guía:** Con el constante control desde superficie con los sistemas de detección específicos para cada caso, el cabezal direccionable y un varillaje especial. Se realiza la perforación guía siguiendo en todo momento la traza definida, perforando con los distintos útiles marcados por la geología y realizando el sostenimiento mediante lodos en caso necesario.



### MÉTODO

- [Perforación horizontal dirigida:](#)
3. **Recrecido y soldadura de la tubería:** Una vez realizada la perforación guía con éxito y en sentido contrario, se realiza la operación de recrecimiento de la perforación en las distintas fases necesarias para el diámetro objetivo final, asistido por un perfecto control de los lodos de perforación.
- Previamente al recrecido final, se dispondrá de toda la longitud de tubería necesaria para la instalación procediéndose en caso necesario a la soldadura de cada uno de sus tramos.



### MÉTODO

- [Perforación horizontal dirigida:](#)

**4. Instalación final de la tubería:** En la última fase se acopla la tubería justo detrás del ensanchador con un sistema especial anti-giro que permite que, al tirar suavemente de la tubería, esta se deslice protegida y sin torsiones sobre la suspensión de lodos que envuelve la perforación. De esta forma queda la tubería instalada sin ningún tipo de rozamiento ni fricción sobre las paredes.



### CARACTERÍSTICAS

- [Perforación horizontal en yacimientos de petróleo y gas:](#)
- La mayoría de yacimientos de petróleo y gas son mucho más amplios en sus dimensiones horizontales que en su vertical.
- La perforación horizontal necesita perforar una mayor longitud que una perforación vertical convencional.
- Un pozo horizontal puede llegar a costar hasta 300 por ciento más para perforarlo y comenzar la extracción que un pozo vertical convencional.
- Debido a su alto costo, la perforación horizontal se limita actualmente a situaciones en las que los pozos verticales no serían tan rentables por otros costes independientes de la perforación.
- En un depósito de petróleo que tiene una buena permeabilidad de matriz en todas las direcciones, sin peligros por bolsas de gas o agua, la perforación de pozos horizontales es poco rentable, puesto que una buena extracción vertical podría lograr aprovechar mejor el pozo con un coste menor.
- Si la permeabilidad de matriz de roca encajante es baja (especialmente en el plano horizontal), o si existe peligro de gas o agua que puedan interferir con la extracción, la perforación horizontal es la opción más viable desde el punto de vista económico.

### MÉTODO

- [Hinca de tubería:](#)
- En este tipo de perforación, se utiliza el tubo como elemento definitivo del túnel y al mismo tiempo como elemento de empuje sobre la tuneladora (Hidroescudo, Escudo abierto o EPB).
- El avance se realiza gracias al empuje efectuado por un conjunto de cilindros de empuje instalados en el pozo de ataque sobre el tubo de hinca, fabricado con una normativa estricta, con el objeto de poder soportar grandes esfuerzos longitudinales y transversales sin deteriorarse.
- El tubo situado sobre el bastidor formara parte del túnel una vez concluida la hinca, cada tubo lleva instalada una junta en la boquilla, que debe garantizar la estanqueidad así como de una "sufridera" en la cola para absorber las posibles irregularidades del tubo y que permite que este no sufra al unir dos tubos.
- Es necesario construir un pozo de ataque con un muro de reacción que soportara las presiones de empuje de toda la tubería y un pozo de llegada donde se rescatara la maquina.
- Si las hincas tienen longitudes grandes se deben instalar "estaciones intermedias", que consisten en unos elementos entre los tubos que permiten distribuir los esfuerzos entre varios tramos.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)
- Sondeos de agua subterráneas: perforaciones ejecutadas para realizar captaciones de agua del subsuelo y/o a la investigación hidrogeológica.
- El agua de una instalación de captación de agua para abastecimiento debe cumplir lo establecido en la legislación vigente sobre el agua para consumo humano.
- Los materiales que se utilicen en la construcción de la instalación deben cumplir:
  1. No producir concentraciones de sustancias nocivas que excedan los valores permitidos por la normativa (R.D. 140/2003 de 7 de febrero).
  2. No modificar las características organolépticas ni la salubridad del agua suministrada.
  3. Ser resistentes a la corrosión interior.
  4. Ser capaces de funcionar eficazmente en las condiciones de servicios previstas.
  5. No presentar incompatibilidad geoquímica entre sí.
  6. Resistentes a temperaturas de hasta 40°C.
  7. Compatibles con el agua suministrada.
  8. Su envejecimiento, fatiga, durabilidad y restantes características mecánicas deben disminuir la vida útil prevista de la instalación.

Fuente: Herrera Herbert, Castilla  
Gómez. (2012)

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)
- **Pozos:** excavaciones de gran diámetro y escasa profundidad ejecutadas en terrenos blandos, principalmente de manera manual para la extracción de agua subterránea.
- **Sondeos:** perforaciones realizadas con maquinaria, de menor diámetro y más profundas, independientemente de que se traten de sondeos de explotación o de investigación.
- Hoy en día los sondeos cuyo objetivo es la captación de agua subterránea se denominan también pozos de agua utilizando el término sondeo únicamente para el sondeo de investigación hidrogeológica.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

- Se realizan en 4 fases, de las cuales las dos primeras son comunes a proyectos de explotación y de investigación, mientras que las dos últimas son exclusivas de los sondeos de captación de agua.

#### 1. Estudio hidrogeológico:

- Es una etapa fundamental ya que la calidad de los estudios previos condiciona el éxito del conjunto del proyecto.
- Los resultados de este estudio son el punto de partida para el diseño de la captación (ubicación, diseño geometría, niveles piezométricos, caudales esperados...) y la justificación de la construcción de pozos y sondeos.
- Un mal estudio puede repercutir en la realización de costosas inversiones en construcción de pozos con resultados negativos.

#### 2. Etapa constructiva:

- Para obtener un rendimiento óptimo de la captación es imprescindible garantizar la calidad en la ejecución de la obra.
- El control de calidad deberá ser exacto garantizando que la obra se ejecute según el diseño previsto y correctamente.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

#### 3. Instalación del equipamiento electromecánico:

- El equipamiento permite la extracción del agua subterránea hasta la superficie para su aprovechamiento.
- Actualmente la mayoría de las captaciones están equipadas con suministro eléctrico y bombas sumergibles, aunque también pueden utilizarse motores de combustión interna y bombas de eje horizontal y vertical.
- Al utilizarse bombas para la impulsión del agua, se debe diseñar el pozo con el diámetro suficiente para la correcta instalación de las mismas.

#### 4. Puesta en servicio:

- Una vez realizadas las etapas anteriores se dispone de un pozo de captación para suministro de agua subterránea, con la optimización de los recursos utilizados.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)
  - **Elección del método:**
    - Va a depender de:
      1. Profundidad a alcanzar.
      2. Diámetro necesario.
      3. Factores geográficos: relieve del terreno, condiciones de transporte, alejamiento del sondeo de la base de abastecimiento...
      4. Volumen de obra.
      5. Naturaleza del terreno atravesado.
    - Los distintos métodos utilizados en pozos abiertos se clasifican en:
      1. **Discontinuos:** Métodos tradicionales (pozos manuales, totalmente en desuso), hélice discontinua, método de hincado con cuchara bivalva.
      2. **Continuos:** hélice continua.
    - Los métodos de perforación utilizados para pozos verticales se clasifican en:
      1. **Rotopercusión con martillo en fondo.**
      2. **Percusión.**
      3. **Rotación:** con circulación directa, con circulación inversa.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)
- **Excavación de pozos abiertos:**
- Los sistemas continuos para pozos abiertos están basados en el uso de medios mecánicos para para la extracción del terreno perforado.
- Los sistemas utilizados para los sondeos de explotación (o investigación) se basan en el empleo de fluidos de perforación que transportan las partículas sólidas.
- Todos los métodos de perforación para captaciones de agua son métodos destructivos del terreno atravesado.
- Durante su realización se pueden tomar muestras del detritus extraído para el control de la columna litológica atravesada.
- Por lo tanto se deben realizar registros de testificación geofísica previos a la entubación para un correcto diseño de los tramos filtrantes de la tubería de revestimiento.

#### 1. Método de hélice:

- Se efectúa comunicando a la herramienta una velocidad de giro, una presión en cabeza y un par de rotación.
- La necesidad de parar o no la perforación para extraer el terreno atravesado supone la diferencia entre la continua y la discontinua.
- Los equipos van montados sobre camión y se pueden utilizar también como método auxiliar en la perforación de sondeos profundos para atravesar formaciones superficiales inestables poco consolidadas.



### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

- **Excavación de pozos abiertos:**

#### 1. Método de hélice:

- Sistema de hélice continua: utilizado en obra civil y minería pero poca aplicación en obras de captación de aguas subterráneas.
- Sistema de hélice discontinua: el más utilizado para la perforación de pozos abiertos, al permitir un mayor diámetro de perforación puesto que aplica todo el par motor en una menor longitud de la herramienta de corte.
- Se emplea el método de hincado con entubación del pozo simultáneamente con la perforación mediante anillos de hormigón.

#### 2. Cuchara bivalva:

- La entubación se realiza con anillos de hormigón por el método de hincado de tubos.
- Ventaja: rapidez en la ejecución.
- Inconveniente: desde el punto de vista hidrogeológico su construcción no es muy conveniente al quedar el anillo de hormigón muy próximo a la superficie del terreno, no disponiendo la captación de un macizo de grava filtrante del espesor adecuado.
- Solo es aplicable en casos de obras de emergencia (por su rapidez) o en abastecimientos de carácter local en el caso de acuíferos pobres (por su capacidad de almacenamiento).

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

- **Excavación de pozos con técnicas de sondeos:**

#### 1. Métodos de rotación:

- **Con circulación directa:** el más utilizado en sondeos petrolíferos por su capacidad de alcanzar grandes profundidades y ser el método de perforación que presenta más versatilidad en la realización de sondeos.
- Es un método muy tecnificado y que se usa frecuentemente en investigación minera.
- El detritus sale a la superficie por el espacio comprendido entre la pared del sondeo y el varillaje.
- Se utilizan lodos artificiales (arcillas del tipo bentonita) que aumentan la densidad y viscosidad arrastrando más cantidad de sólidos y utilizando velocidades más bajas de circulación del fluido de perforación.
- **Con circulación inversa:** se basa en la utilización de un compresor que inyecta aire en el interior de la sarta por medio de un varillaje de doble pared.
- La inyección de este aire aligera la columna de lodo creando una depresión en el interior del varillaje que fuerza la circulación desde el espacio anular entre la pared exterior y el varillaje hacia el interior del mismo.
- El detritus asciende por el interior del varillaje.
- Ventajas: permite perforar con un diámetro de perforación mayor sin utilizar lodos bentoníticos, se obtienen muestras más representativas del terreno, las paredes del sondeo sufren menor erosión pues las partículas se extraen por el interior del varillaje, menor coste energético al emplear menor potencia.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

- **Excavación de pozos con técnicas de sondeos:**

#### 2. Métodos de rotopercusión:

- **Con martillo en fondo:** es el sistema más utilizado. Puede ser directa o indirecta pudiendo ser utilizado para la perforación de captaciones hidrogeológicas.
- Se suele utilizar más la directa aunque está muy condicionada por el diámetro de perforación pues el espacio anular entre el varillaje y la pared del sondeo limita los compresores empleados dado requerimiento del caudal de aire.
- La rotopercusión inversa de mayor diámetro tiene las siguientes ventajas:
  - Obtener muestras del terreno y de agua más representativas evitando contaminaciones con la pared del sondeo al extraerse el detritus por el interior del varillaje.
  - Las paredes del sondeo sufren menor erosión que en directa evitando la erosión y hundimiento de los estratos más blandos.
  - Se evitan las pérdidas de aire que puede suponer la caída de materiales pudiendo atrapar el martillo de perforación.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)
- La construcción se compone de una serie de etapas secuenciadas:

#### 1. Situación de los sondeos:

- Sirve para determinar la posición exacta.
- Se determina a través de:
  - Métodos topográficos clásicos.
  - Sistemas por satélite GPS.

#### 2. Preparación de accesos y emplazamiento de los equipos:

- Una vez obtenidos los permisos y autorizaciones necesarias, se procede a la preparación del acceso para maquinaria y vehículos de servicio y aprovisionamiento.
- Construcción de una pista adaptada a la circulación de los mismos con seguridad.
- Acondicionamiento del emplazamiento de la maquinaria principal y auxiliar, casetas de obra y servicios que sean necesarias y las zonas de acopio.

Fuente: Herrera Herbert, Castilla  
Gómez. (2012)

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

### 3. Vigilancia y control de la perforación:

- Es necesario realizar una serie de labores de vigilancia y control de la operación como parte del programa de calidad de la obra.
  - Trabajos de inspección.
  - Trabajos sistemáticos de control.
- Se debe recoger el detritus producido al perforar para realizar la columna litológica del terreno atravesado.
- Se llevará un control de los lodos de perforación y los valores de los parámetros mecánicos de la perforación (peso, rotación, par...).

### 4. Ensayos in situ y toma de muestras:

- **Testificación geofísica:** doble finalidad:
  - Diseño definitivo de la columna de entubación de los pozos.
  - Verificación de la calidad constructiva (verticalidad de la perforación).

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

#### 4. Ensayos in situ y toma de muestras:

- **Toma de muestras y análisis químicos:**
- **Ensayos de bombeo:** se deben realizar al menos 3 ó 4 ensayos para determinar caudales, permeabilidad, transmisividad y coeficientes de almacenamiento.

#### 5. Acondicionamiento:

- **Entubación:** con tubería de emboquillado (diámetro superior al resto de la perforación) los primeros metros de perforación y se retirará una vez que haya sido entubado el resto del sondeo. Se debe cementar el espacio anular entre la columna de entubado definitiva y las paredes del sondeo para estabilizar la zona superior del terreno más inestable.
- El entubado definitivo sostiene las paredes de perforación y sirve de conducción hidráulica.

### MÉTODO

- [Sondeos para captaciones de agua:](#)

#### 5. Acondicionamiento:

- **Rejilla:** colocada en la zona de admisión de agua. Se debe tener en cuenta la longitud el tamaño de ranura, el diámetro, la resistencia mecánica y el comportamiento de la rejilla frente a aguas corrosivas o incrustantes.
- **Engravillado:** cuando no es suficiente con la colocación de la rejilla se debe rellenar de grava el espacio anular entre la pared del terreno perforado y la rejilla, para estabilizar el terreno, evitar el bombeo de arenas y aumentar la permeabilidad en el entorno de las rejillas.

#### 6. Limpieza y desarrollo:

- Tras la finalización de la perforación del sondeo se extraen los restos de lodos y detritus de perforación, se corrigen los daños y obstrucciones provocados durante las operaciones de perforación, se estabilizan las arenas, se eliminan los finos y se intenta obtener el mayor caudal posible.

### INTRODUCCIÓN

- Hoy en día debido al aprovechamiento del subsuelo, tanto en obra pública como en minería, es necesaria la ejecución de túneles y galerías cada vez en mayor medida.
- Con la introducción de tuneladoras y minadores se ha podido llegar a atravesar rocas con una resistencia a compresión de hasta 250 Mpa.
- El uso de tuneladoras en macizos rocosos con predominio de rocas duras tiene las siguientes ventajas: perforación sin daños a la roca alrededor del túnel, superficie de corte regular que reduce las necesidades de sostenimiento y/o revestimiento, menos necesidades de personal, etc. (López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez, 2017).
- Por el contrario, los inconvenientes son: sistema de trabajo muy rígido (secciones circulares), los terrenos atravesados deben presentar pocas variaciones geológicas, curvas con radio superior a 300 m, excavación inicial de preparación elevada y personal altamente especializado.
- Por todo ello la excavación con explosivos sigue aplicándose, ya que el arranque con perforación y voladura soluciona gran parte de estos inconvenientes.



### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- Las partes de que consta el ciclo de trabajo característico de las excavaciones mediante perforación y voladura son las siguientes:
  - 1.- Replanteo en el frente del esquema de tiro.
  - 2.- Perforación de los barrenos.
  - 3.- Carga de los barrenos con explosivo.
  - 4.- Disparo de la voladura.
  - 5.- Evacuación de los humos y ventilación.
  - 6.- Retirada del escombros y saneo del frente, bóveda y hastiales.
  - 7.- Carga y transporte del escombros.
  - 8.- Gunitado y sostenimiento.
  - 9.- Replanteo de la nueva pega.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- La forma de ataque de la sección de túneles y galerías depende de:
  - 1.- Equipo de perforación empleado.
  - 2.- Tiempo disponible para la ejecución.
  - 3.- Tipo de roca.
  - 4.- Tipo de sostenimiento.
  - 5.- Sistema de ventilación.
- Cuando el macizo está formado por rocas competentes y la sección del túnel es inferior a 100 m<sup>2</sup> se puede realizar la perforación y voladura a sección completa o en solo paso.
- La excavación por fases debe ser utilizada en grandes túneles donde la sección es demasiado grande para ser cubierta por el equipo de perforación o cuando las características geomecánicas de las rocas no permiten la excavación a plena sección.

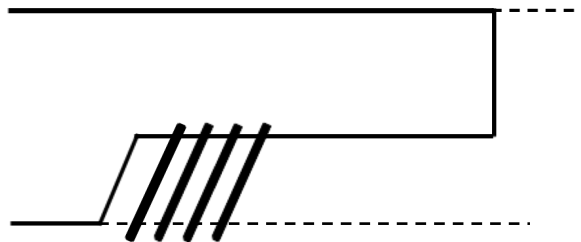
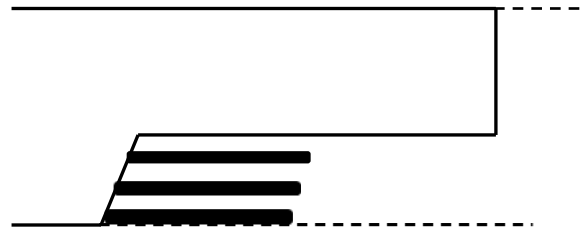
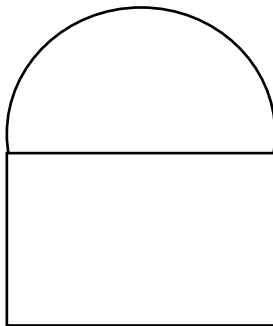
### DEFINICIONES

- Túneles en roca:
- El sistema habitual trata de dividir el túnel en dos partes: una superior o bóveda y otra inferior o destroza.
- La forma de excavar la bóveda es considerándola como una galería y la destroza, que se excava con cierto retraso respecto al avance de la bóveda, se lleva a cabo por banqueo.
- El banqueo puede ser vertical y para ello es necesario disponer de carro de perforación con deslizadora no demasiado grande para no tener problemas en puntos cercanos a los hastiales.
- Ventaja: el banco completo puede ser perforado y volado de forma continua y simultáneamente con la bóveda.
- El banqueo horizontal permite el uso del mismo equipo de perforación que para la bóveda y además el mismo procedimiento de carga de explosivos y desescombro.
- Inconveniente: Discontinuidad de ejecución.

### INTRODUCCIÓN

- Banqueo horizontal o vertical en túnel con avance en dos secciones.

Adaptado de: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)



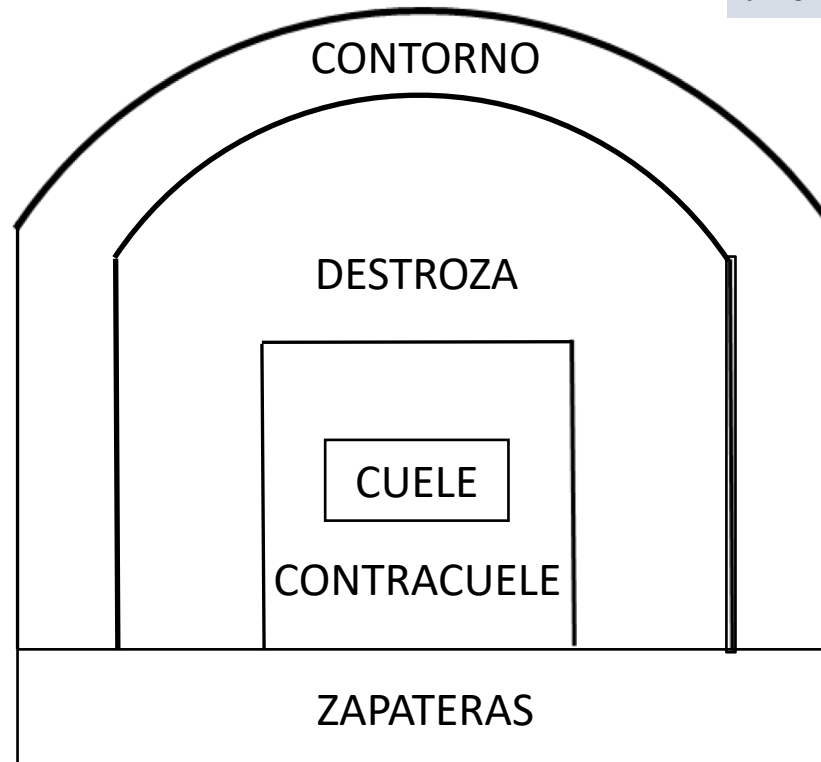
### DEFINICIONES

- Túneles en roca:
- Inicialmente en las voladuras en túneles y galerías no existe ninguna superficie libre de salida excepto el propio frente de ataque.
- La ejecución está basada en la creación de un hueco libre con los barrenos del cuele y contracuele hacia el cual rompen las cargas restantes de la sección.
- El hueco creado tiene generalmente una superficie de 1 a 2 m<sup>2</sup> aunque con diámetros de perforación grandes se alcanzan hasta los 4 m<sup>2</sup>.
- Para volar la destroza es necesario un consumo específico de explosivo entre 4 y 10 veces superiores que la bóveda, debido a que se pueden producir errores de perforación, existe un menor hueco de esponjamiento e inclinación con respecto al avance, menor cooperación entre zanjas adyacentes y en algunas zonas existe la acción negativa de la gravedad, como en los barrenos de zapatera.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- Zonas de voladura en túnel.

Adaptado de: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)



### DEFINICIONES

- Túneles en roca:
- Esquema de tiro: disposición en el frente del túnel de los barrenos que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a introducir en cada uno y el orden en que se va a hacer detonar cada barreno.
- El esquema de tiro se diseña al principio de la obra basándose a la experiencia y a una serie de reglas empíricas recogidas en los manuales sobre explosivos.
- Los barrenos deben de tener una longitud de un 5 a 10 % superior a la distancia que se quiera avanzar con la pega (longitud de avance), puesto que siempre se producen pérdidas que impiden aprovechar al máximo la longitud de los taladros.
- Las longitudes de avance típicas están comprendidas entre 1 y 4 metros y se fijan en función de la calidad de la roca, cuanto mejor es la calidad del terreno, mayores serán los avances posibles.
- Con una roca de calidad media es habitual perforar barrenos de 3 a 3,50 metros para avanzar entre 2,80 y 3,20 metros en cada voladura.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Cuele:**
- Zona de la voladura que dispara en primer lugar.
- Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que puede escapar la roca con lo cual se posibilita y facilita su arranque.
- El cuele es sin duda la más importante de todas las fases de la voladura de un túnel en relación con el avance de la voladura.
- Existen distintos tipos de cuele: los cueles en V y en abanico, que facilitan la salida de la roca hacia el exterior, pero tienen el inconveniente de que los taladros forman un ángulo con respecto al eje del túnel, por lo que su correcta perforación tiene una mayor dificultad y exige variar el esquema de perforación para cada longitud de avance.



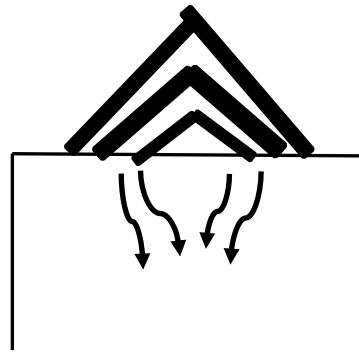
### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Cuele:**
- El cuele más usado por su simplicidad es el cuele paralelo.
- Consiste en un barreno vacío (barreno de expansión), sin explosivo, de mayor diámetro que el resto y, a su alrededor, tres o cuatro secciones de taladros cargados que explotan sucesivamente siguiendo una secuencia preestablecida.
- La misión del barreno de expansión es la de ofrecer una superficie libre que evite el confinamiento de la roca de modo que facilite su arranque. Su diámetro varía entre 100 y 300 milímetros.
- En ocasiones puede sustituirse por dos taladros vacíos de diámetro menor (2 x 75 mm).

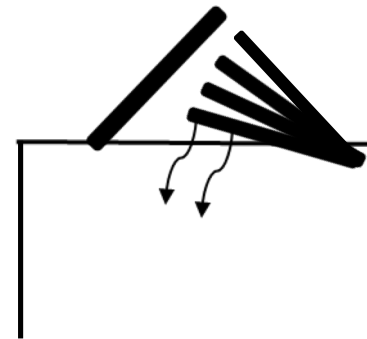
### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Cuele:**

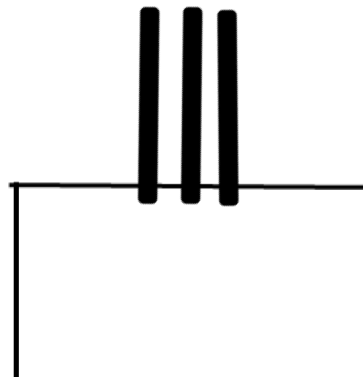
CUELE EN V



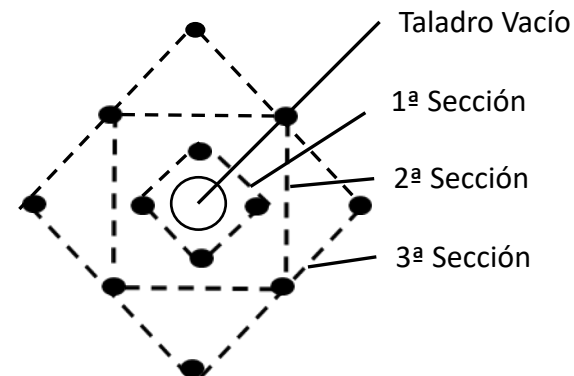
CUELE EN ABANICO



CUELE EN PARALELO



Adaptado de: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)



### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Destroza:**
  - Parte central y más amplia de la voladura, cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona del cuele y contracuele, que es la zona crítica de la voladura.
- **Zapatera:**
  - Zona de la voladura situada en la base del frente, a ras del suelo.
  - Los taladros extremos suelen ir un poco abiertos “pinchados” hacia fuera con objeto de dejar sitio suficiente para la perforación del siguiente avance.
  - Los barrenos de las zapateras son los que más carga explosiva contienen ya que, aparte de romper la roca han de levantar ésta hacia arriba.
  - Para evitar repiés, van ligeramente “pinchados” hacia abajo y son disparados en último lugar.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Contorno**
- Los taladros perimetrales o de contorno son importantes pues de ellos dependerá la forma perimetral de la excavación resultante.
- Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica, aunque las irregularidades y discontinuidades de la roca dificultan dicho objetivo.
- Existen dos técnicas de efectuar los tiros perimetrales: el recorte y el precorte.
- El recorte, que es la técnica más empleada, consiste en perforar un número importante de taladros paralelos al eje del túnel en el contorno, a la distancia conveniente (entre 45 cm y 100 cm) y con una concentración de explosivo pequeña o incluso nula.
- En la secuencia de encendido son los últimos barrenos en detonar.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Contorno**
- Por otro lado, la técnica del precorte se perfora un mayor número de taladros perimetrales, paralelos entre sí, a una distancia entre 25 cm y 50 cm, con una concentración de carga explosiva entre 0,1 y 0,3 kg/m.
- Esta técnica exige una perforación muy precisa que asegure un buen paralelismo y una homogénea separación entre los taladros.
- En la secuencia de encendido, son los primeros en detonar, con lo que se crea una fisura perimetral que aísla y protege la roca de las vibraciones del resto de la voladura.
- La técnica del precorte, por su esmerada ejecución y costo elevado, es de uso poco frecuente en túneles, excepto en casos muy especiales.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- La perforación de los barrenos se puede hacer por dos procedimientos: el primero es mediante el uso de martillos manuales accionados por aire comprimido, y el segundo es mediante martillos hidráulicos montados sobre una maquina automóvil denominada jumbo.
- **Martillo picador:**
- Los martillos manuales de aire comprimido funcionan a percusión, es decir, la barrena golpea contra la roca y gira de forma discontinua entre cada percusión, separándose del fondo del taladro.
- El detritus es arrastrado hasta el exterior del taladro mediante agua, que tiene también la finalidad de refrigerar la barrena.
- Los martillos manuales son actualmente de uso poco frecuente, sólo se usan, obviamente, en túneles muy pequeños o de forma accidental, pues tienen rendimientos muy inferiores a los jumbos y requieren mucha mano de obra.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Martillo picador:**

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

Tipo	T-8000
Golpes / minuto	1.650
Ø Pistón (mm)	37
Enmangadura(mm)	Ø 23x12
Peso	8 Kg.
Consumo a 5 Kgr/cm <sup>2</sup> (L/min)	1.200
Carrera (mm)	100
Manguera	19 mm - 3/4"

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Martillo picador:**
  - Energía de Impacto Martillo picador:
  - Energía cinética del pistón al golpear la herramienta:  
$$E = 1/2(m \cdot v^2) \text{ (julios)}$$
  - Siendo:
    - m: masa del pistón (Kg)
    - v: velocidad del pistón (m/s)
    - E en Julios



### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Jumbos:**
  - La máquina habitual de perforación es el jumbo. Son unidades de perforación dotadas con uno o varios martillos perforadores.
  - Están formados por una carrocería de automóvil provista de dos o tres brazos articulados.
  - En cada brazo puede montarse un martillo de perforación (perforadora) y una cesta donde pueden alojarse uno o dos operarios y que permite el acceso a cualquier parte del frente.
  - El accionamiento de los jumbos es eléctrico cuando están estacionados en situación de trabajo y pueden disponer también de un motor Diésel para el desplazamiento.
  - Los martillos funcionan a rotopercusión, es decir, la barrena gira continuamente ejerciendo simultáneamente un impacto sobre el fondo del taladro.
  - El accionamiento es hidráulico, por lo tanto se consiguen potencias mucho más elevadas que con el sistema neumático.
  - Para realizar tanto el barrido del detritus como la refrigeración de la boca se utiliza agua.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Jumbos:**
- Principales aplicaciones en trabajos subterráneos:
  - Avance de túneles y galerías.
  - Banqueo con barrenos horizontales y verticales, aunque para estos últimos es más infrecuente su uso.
  - Perforación transversal.
  - Bulonaje e instalación de cables de anclaje.
  - Perforación de paraguas de sostenimiento, taladros para exploración e inyecciones.
- El número de fabricantes de este tipo de maquinaria es escaso, pudiendo destacar principalmente los europeos, en particular, los nórdicos.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Jumbos:**
  - Hoy en día se pueden alcanzar unos rendimientos de perforación con jumbos hidráulicos que pueden superar los 3,5 m/min de velocidad de perforación.
  - Los jumbos actuales tienen sistemas electrónicos para controlar la dirección de los barrenos, el impacto y la velocidad de rotación de los martillos e incluso pueden memorizar el esquema de tiro y perforar todos los taladros automáticamente.
  - En este caso un único maquinista puede perforar una pega completa en unas pocas horas.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno,  
García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
  - **Maquinaria de perforación:**
  - **Jumbos:**
  - Los componentes básicos están muy estandarizados: tren de rodaje y bastidor, sistema de accionamiento, cabina, brazos, deslizaderas, martillos...
  - El equipo elegido debe poder ejecutar eficientemente las tareas de perforación y ser capaz de adaptarse a las condiciones cambiantes de los frentes, distintos tipos de rocas y variadas longitudes de barrenos durante las pegas.
1. Tren de rodaje: equipos de perforación actuales son autopropulsados disponiendo de un tren de rodaje sobre:
    - Carriles (en desuso, usados en trabajos de gran longitud y pequeña sección con problemas de ventilación).
    - Orugas (en túneles o galerías de pequeña sección con pendientes de 15° a 20°, pocas curvas y suelos en condiciones malas).
    - Neumáticos (el más utilizado, con velocidades entre 10 y 15 km en pisos horizontales, menos resistencia a aguas corrosivas y menores desgastes en pisos irregulares).

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Jumbos:**
    2. Chásis o bastidor: equipos de perforación actuales disponen de un bastidor articulado o rígido.
      - Articulado: central, trasero con equipos de accionamiento y transmisión, bombas hidráulicas, frenos, depósito combustible...y delantero con cabina, anclajes y articulaciones de los brazos y deslizaderas, martillos o cesta auxiliar.
      - Rígido: en unidades de mayor tamaño. Condiciona los radios de giro y los trazados en curva.
    - Sistema eléctrico (a tensión baja) con luces de desplazamiento, de trabajo y de freno, bocina y dispositivo de marcha atrás.
    - El equipo dispone de estante para las bocas de perforación, herramientas, extintor y sistemas de detección de incendios.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Jumbos:**
    3. Accionamiento y componentes auxiliares: fuentes de energía diésel y eléctrica, aunque la mayoría vienen equipados con ambas.
      - Diésel: accionamiento del tren de rodadura, perforación, bombas hidráulicas, de agua, compresor. Más habitualmente usado para el desplazamiento del equipo del exterior al frente. Debe cumplir con la normativa vigente en emisiones y contar con catalizador de escape, silenciador y filtro de partículas.
      - Eléctrico: cuenta con conjunto de elementos de control automático (presión de agua de barrido, presión del aire de lubricación, temperatura del hidráulico, nivel hidráulico)
    4. Cabina del operador: con paneles de control. Pueden ser abiertas con marco de protección o cerradas, insonorizadas y climatizadas.
      - Son confortables, con asiento fijo para el trabajo y opcional para desplazamiento, panel de control, sistema de presurización y aire acondicionado.
      - Nivel de insonorización elevado.
      - En las de gran envergadura son elevables hidráulicamente.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Jumbos:**
    5. Gatos hidráulicos: situados en la parte delantera y posterior del bastidor, consiguen un posicionamiento preciso de la máquina y se evita transmitir esfuerzos de fatiga innecesarios.
    6. Carrete del cable de alimentación: se debe contar en el túnel con infraestructura eléctrica, prolongable cada cierta distancia avanzada por el frente.
      - Para la alimentación de energía, cuentan con un carrete de cable interior o exterior de hasta 1800 m y con capacidad para almacenar 100-200 m de tensiones 380, 690 y 1000 V.
      - En equipo pequeños el accionamiento del carrete es manual, en jumbos medianos es automático.
      - Alimentación en alta tensión, conectándose a red de distribución existente en proximidades llegando hasta el transformador en interior o exterior.
      - Se deben contemplar puestas a tierra, dispositivos contra sobretensiones para proteger a perforistas y evitar daños a equipos por deterioro de cables.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Jumbos:**
  7. Brazos de perforación: accionados hidráulicamente, son de tres tipos (giro en la base, en línea y tipo trípode).
    - El número y dimensiones de los brazos es en función del avance requerido, la sección del túnel y el control de la perforación para evitar sobreexcavaciones.
    - Un aumento del número de brazos da lugar a un incremento proporcional en la capacidad de perforación, pero en la práctica depende de que se haga un uso óptimo.
    - En perforación manual se reducen los tiempos de espera si la superficie de cobertura es suficiente para cubrir la superficie del frente y la experiencia de los perforistas.
    - El modo perforación computerizada es la mejor forma de disminuir el periodo de espera, al disponer de un esquema de perforación preprogramado y realizarse los movimientos de brazos automáticamente, mejorando los rendimientos.
    - El número de barrenos perforados con cada brazo debe ser el mismo, superposición entre brazos no superior al 30% y orden de ejecución que permita tiempo de desplazamiento menor.



### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Jumbos:**
    8. Brazo con cesta auxiliar: en equipos de gran tamaño, utilizada para distintas labores (pequeños saneos manuales, carga de explosivo de los barrenos, instalación de bulones...)
    9. Consideraciones operativas:
      - Cobertura: forma geométrica y superficie del área de cobertura específica de cada máquina.
      - Automatización: mejora la exactitud del proceso optimizando el coste de perforación y voladura. La instrumentación se clasifica en tres niveles tecnológicos (indicadores de ángulo, indicadores de ángulo y posición y sistemas de informatización total).
      - Guiado: el plan del túnel combina el trazado, los perfiles, planes de tiro, bulonaje, perfiles láser y recogida de datos.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Jumbos:**
- Los accesorios de perforación comúnmente usados son las varillas o barrenas y las bocas de perforación.
- Además se emplean manguitos y otros adaptadores para el ensamblaje de las piezas.
- Las barrenas de perforación son barras de acero con un conducto interior para el paso del agua de refrigeración y unas roscas en los extremos donde se acoplan las bocas o los manguitos.
- La herramienta de corte es la boca de perforación, fabricada de metal endurecido (carburo de tungsteno), dispuesto en distintas formas (cruz, en X o botones) con unos diámetros comprendidos entre 45 y 102 milímetros.
- La elección de un tipo u otro de boca, así como de sus diámetros, depende del tipo de maquinaria de perforación, de las características de la roca y del diámetro de los cartuchos del explosivo a introducir.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Carros perforadores (jumbos):**
- Los carros perforadores surgen de una experiencia de décadas en todo el mundo en la explotación subterránea y la construcción de galerías y túneles.
- Se trata de una serie constructiva de carros perforadores fabricados a medida que, en forma modular, se componen de elementos individuales de gran eficacia que forman unidades.
- El sistema utilizado es el constituido por carros sobre orugas, aunque según el tipo de energía utilizada durante la perforación puede ser neumáticos (más antiguos) e hidráulicos.
- Los carros perforadores son apropiados para la perforación de barrenos de todo tipo en la explotación minera y en la construcción de túneles, para la perforación mecánica y la colocación de bulones de anclaje, así como, para efectuar perforaciones de prolongación a fin de realizar reconocimientos de la roca.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Carros perforadores (jumbos):**
- Su estructura modular garantiza el montaje y desmontaje sencillos así como el mantenimiento óptimo.
- La robustez, alta durabilidad y rentabilidad de los carros perforadores han quedado demostradas en todo el mundo bajo condiciones durísimas.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
- **Carros perforadores (jumbos):**
- Normalmente los carros perforadores se equipan con mecanismos de traslación sobre orugas, aunque también pueden estar dotados con mecanismos de traslación sobre ruedas o carriles.
- Los mecanismos de traslación se realizan en función de la cantidad de brazos perforadores, de los dispositivos de montaje adicionales (plataformas hidráulicas de trabajo) y de los requisitos geométricos.
- Los mecanismos de traslación sobre orugas garantizan una estabilidad excelente en todos los estados de servicio así como una capacidad de maniobra fácil y sencilla.
- Los accionamientos de traslación hidráulicos, con sistema de frenado integrado, facilitan el empleo incluso en excavaciones subterráneas fuertemente inclinadas.
- Velocidad de desplazamiento elevada y de gran maniobrabilidad.
- Gama amplia de diámetros (64 a 152 mm, aunque también existen entre 200 y 278 mm).
- Posibilidad de colocar un cambiador automático de varillas de perforación.

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Carros perforadores (jumbos):**
    - Los brazos perforadores telescópicos presentan longitudes telescópicas de 0,8 m y 1,1 m y con sistema hidráulico de sujeción paralela y son apropiados para equipos ligeros sobre ruedas u orugas.
    - Están dotados de una consola receptora integrada para la introducción del pupitre de mando de perforación en su conjunto.
    - Este concepto facilita el transporte en el conjunto de galerías y el montaje del carro perforador en el lugar en que se ha de utilizar.
    - Velocidades de perforación de un 50 a 100% más altas con unidades neumáticas.
    - Menores costes ambientales y de perforación.

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)

### DEFINICIONES

- [Túneles en roca:](#)
- **Maquinaria de perforación:**
  - **Carros perforadores (jumbos):**
  - **Inconvenientes:**
  - Mayor precio de adquisición.
  - Mantenimiento más cuidadoso y cualificado.
  - Reparaciones complicadas.

### DEFINICIONES

- La perforación horizontal con tornillo helicoidal (*horizontal auger boring*) es una tecnología sin zanja que se utiliza para instalar tuberías metálicas o de hormigón de diámetros entre 100 y 1500 mm en terrenos blandos sin bloques.
- La perforación se realiza mediante el corte de un eje broca equipado con bordes de corte tipo cincel.
- Los escombros se evacuan del tornillo sin fin a través de la tubería y son conducidos hasta el inicio de la perforación.
- Esta tecnología permite instalaciones hasta de 240 m de longitud con control de dirección en los 360° vertical y horizontal).
- Es un procedimiento muy útil en instalaciones bajo estructuras como vías de cualquier tipo, cuerpos de agua, edificaciones etc.



### TIPOS A CONSIDERAR EN FUNCIÓN DEL TIPO DE PERFORACIÓN

- **En perforación manual y/o mecanizada de túneles**: barrenas integrales (con boca de cincel, plaquitas o botones) o varillaje extensible y bocas (de insertos o botones)
- **En perforación con martillo en cabeza en labores de exterior**: varillaje extensible (adaptador, varillas y manguitos) y bocas (de pastillas o de botones)
- **En perforación con martillo en fondo (labores de exterior o interior)**: barras con rosca cónica y bocas (de pastillas o botones)
- **Nota.-** Hay accesorios para casos especiales y/o variantes de los fungibles citados anteriormente.

### ELEMENTOS DE LA SARTA DE PERFORACIÓN

- Consta de los siguientes elementos:
  1. Adaptadores de culata.
  2. Manguitos.
  3. Varillas de extensión.
  4. Bocas.
- Es necesario tener en cuenta las siguientes características:
  1. El diámetro y longitud del barreno.
  2. Las características de la roca y el macizo.
  3. La potencia de la perforadora.
  4. La calidad (se requieren elementos de acero resistentes a la fatiga, flexión, impactos, y al desgaste en las roscas y culatas) y facilidad de suministro.
  5. Las experiencias anteriores si las hay.

### ROSCAS

- Los elementos deben estar bien unidos para permitir una buena transmisión de la energía de percusión y rotación, un buen circuito de barrido, y una adecuada conexión entre piezas. :
- La conexión ha de ser rápida y segura.
- Tipos de roscas:
  1. **R (soga).** Para barrenos pequeños. Varillas de 22 a 38 mm.
  2. **T. La más habitual.** Adecuada para cualquier condición de perforación. Paso mayor y ángulo de perfil menor, fácil enrosque y gran duración. De 38 a 51 mm.
  3. **C.** Equipos de 51 a 57 mm y varillas grandes.
  4. **GD o HI.** Intermedias entre la R y la T. Diseño de perfil asimétrico (diente de sierra) y diámetros de 25 a 57 mm.

### ADAPTADORES

- Son los elementos que, fijados a las perforadoras, sirven para transmitir la energía del impacto (gracias a la culata) y la rotación del varillaje (mediante las estrías longitudinales).
- Se sujetan al varillaje por medio de rosca.
- Pueden llevar:
  1. Una empaquetadura central donde encaja la aguja de soplado.
  2. Un sistema de barrido lateral. Hay un orificio entre las estrías y la rosca.

### ELEMENTOS DE EXTENSIÓN

- Varillas (EXTENSION ROD): Barras cilíndricas de acero de alta resistencia unidas por manguitos. (extension rod)
- Tubos (DRILL TUBE): Barras que se diferencian de las varillas en:
  1. Menor espesor de pared.
  2. Mayor sección interior para el paso del aire.
  3. En sus extremos tienen roscas macho-hembra protegidas con grasas especiales; no usan manguitos.
  4. Son más caras pero ofrecen mayor duración, por lo que el coste por metro de perforación es un 50% menor.
    - Ventajas respecto al varillaje:
      1. Mayor rigidez (se reducen las desviaciones e irregularidades en las paredes del sondeo).
      2. Mejor transmisión de la energía al no llevar manguitos.
      3. Velocidad del aire por el espacio anular mayor, por lo que se puede aumentar el caudal bombeado.

### TIPOS DE VARILLAS O VARILLAJES

- Con martillo en cabeza, unidas por manguitos. En base a la sección, puede distinguirse entre:
  - 1.- Sección hexagonal: hexagonal, ligera, con acoplamiento integrado, varilla para túneles y galerías, barrena integral roscada, roscada con culata, cónica con culata, integral con boca de tres insertos.
  - 2.- Sección redonda: redonda, rosca doble, redonda continua.
  - 3.- Sección ligera, para túneles y galerías: ligera, varilla para túneles y galerías.
  - 4.- Con roscas machos, acopladas por manguitos. Algunas presentan ya acoplado el manguito.
  - 5.- Con boca de perforación (integrales).
  - 6.- Con culata.
  - 7.- Con boca y culata.

### MANGUITOS O ACOPLAMIENTOS

- Unen las varillas.
- Pueden presentar un tope central que evita deslizamiento del manguito sobre el varillaje.
- Exteriormente pueden ser:
  1. Lisos
  2. Con estrías: Se usan con bocas retráctiles si el sondeo tiende a atascar.
  3. Con aletas: Estabilizan las varillas en caso de sondeos profundos.

### BOCAS

- Tipos:
- De pastillas
- De botones.
- Bocas especiales:
  1. Retráctiles
  2. De escariar
- De martillo en fondo
- Excéntricas.
  
- Generalidades:
- Roscadas al varillaje a tope para recibir toda la energía del impacto.
- Presentan orificios centrales o laterales para dejar salir el fluido de perforación.
- Cuentan con hendiduras para dejar pasar los detritus.
- Ligeramente cónicas para dejar holgura con las paredes del sondeo y evitar excesivo desgaste.



### BOCAS

- [Bocas de botones:](#)
- Llevan insertos cilíndricos de carburo de tungsteno sobre la superficie de la boca.
- Se fabrican entre 50 y 251 mm.
- El acero sujeta los botones por contracción o presión en frío sobre todo el contorno.
- Son reafilables. Si rompen presentan más superficies de ataque.
- Ese adaptan mejor a la perforación con rotación, obteniendo avances superiores que con las de pastillas.
- Presentan mayor resistencia al desgaste, por la forma de los botones y la sujeción más efectiva del acero.

### BOCAS

- [Bocas de pastillas:](#)
- Pueden ser:
  1. Bocas en bisel. Llevan un inserto de carburo de tungsteno en bisel. Se usan en minería a cielo abierto y de interior en martillos manuales. Van bien en pequeños diámetros pero si son grandes , existe peligro de que queden clavadas.
  2. Bocas en cruz. Con cuatro pastillas de carburo de tungsteno en ángulo recto.
  3. Bocas en X. 4 pastillas en ángulos entre 75 y 105°. Más resistentes al enclavamiento, pero más difíciles de afilar.
- [Bocas de martillo en fondo:](#) vistas anteriormente.

### BOCAS

- Bocas retráctiles:
  - Se usan en sondeos con paredes fácilmente desmoronables.
  - Tienen estrías y dientes por detrás del frente, permitiéndoles perforar cuando retroceden.
  
- Bocas de escariar:
  - Sobre un sondeo piloto se abre otro de mayor sección.
  - Llevan varilla piloto o adaptadores piloto (truncocónicos)

### DURABILIDAD

- En granitos y bancos de 15 mts:
  - boca de 3".....400 mts
  - varilla de 1,5".....500 "
  - manguitos.....400 "
  - adaptador..... 1.200 "
  
- En calizas típicas de Cantabria:
  - aproximadamente duran el doble que en el caso anterior, excepto el adaptador que puede durar solo el 20 o 30 % más.

### CARACTERÍSTICAS

- El sistema de captación se compone de una campana de aspiración, que se coloca en el emboquille del barreno, un sistema de separación y filtrado (ciclonado del polvo grueso y partículas grandes, y seguidamente filtrado reteniendo los tamaños inferiores a 5 micras), y sistema de depresión o vacío parcial, con ventilador en la etapa final.

### CARACTERÍSTICAS

- La eliminación de polvo mejora las condiciones de trabajo (elimina o reduce el riesgo de contraer neumoconiosis, e incrementa la productividad).
- En interior el polvo se reduce mediante agua o suspensiones bentoníticas como fluidos de barrido, que deben dejarse decantar.
- A cielo abierto es común el empleo de aire, que posteriormente es captado y filtrado.
- [¿Cómo aumenta la productividad?](#)
  1. Reducción de costes de mantenimiento.
  2. Mayor velocidad de penetración (evita remolienda de detritos).
  3. Mejor control de la maquinaria.
  4. Reducción de costes de desgaste de bocas.
  5. Posibilidad de recogida de muestras de detritos (planificación dinámica).

### CARACTERÍSTICAS

- Perforación de arcillas, arenas, gravas y piedras o cantos rodados de diversos tamaños.
- Su empleo es creciente.
- Puede utilizarse martillo en cabeza o en fondo, atravesando el recubrimiento a la vez que se coloca la entubación.
- Empleados en perforaciones para voladuras submarinas, macizos con recubrimiento sin retirada previa del mismo, anclajes, cimentaciones, pozos de agua, sondeos de investigación...
- Se distinguen dos tipos fundamentales:
  1. Método OD: la entubación se ejecuta por percusión y rotación.
  2. Método ODEX: la entubación sin rotación, producida por el peso de la tubería y las vibraciones de la máquina.

### MÉTODO OD

- Presenta:
  1. Tubo exterior de revestimiento, con una corona de carburo cementado situada en el extremo inferior.
  2. Un varillaje interno standard y una boca en forma de cruz o de botones.



### MÉTODO OD

- Las operaciones básicas que se ejecutan durante la perforación son las siguientes:
  1. Se atraviesa el recubrimiento con la tubería, que puede o no portar el varillaje interior.
  2. Una vez alcanzada la zona rocosa, se produce el avance de la corona externa unos centímetros.
  3. Se prosigue la perforación con el varillaje interior excepto si se atraviesan estratos descompuestos, donde se debe avanzar con la tubería exterior.
  4. Se produce la extracción del varillaje extensible.
  5. Introducción de una tubería de plástico para alojar el explosivo.
  6. Extracción de la tubería de revestimiento.

### MÉTODO ODEX

- Introducción simultánea de la tubería de perforación y de revestimiento.
- Equipo:
  1. Broca piloto
  2. Escariador excéntrico (pieza básica)
  3. Guía roscada para la broca y culata para el martillo en fondo.
  4. Zapata del tubo de revestimiento.

### MÉTODO ODEX

- El proceso de trabajo consiste en:
  1. Ejecución de un taladro de calibre mayor que el del tubo exterior con la boca escariadora.
  2. Descenso de tubo exterior con el avance de la perforación.
  3. Al llegar a la profundidad deseada, la sarta realiza un giro en sentido contrario, disminuyendo el diámetro al volverse la boca escariadora concéntrica, de forma que se puede extraer por el interior de la tubería de revestimiento.
  4. Introducción del varillaje convencional y para continuar con la perforación.

*El equipo se recupera al final, por un giro del varillaje que hace que el escariador se centre. Se retira el conjunto perforador y se perfora con martillo normal.*

### GENERALIDADES

- La perforación dependerá de aspectos como:
  1. Organización.
  2. Profundidad.
  3. Tiempos de maniobra.

### EXPRESIONES

- Su cálculo se basa en la expresión siguiente:

$$C_T = \frac{C_A + C_I + C_M + C_O + C_E + C_L}{VM} + C_B$$

- Distinguiéndose los siguientes costes:
- **Costes indirectos:**
  1.  $C_A$ : Amortización (€/h)
  2.  $C_I$ : Interese y seguros (€/h)
- **Costes Directos:**
  1.  $C_M$ : Mantenimiento y reparaciones (€/h)
  2.  $C_O$ : Mano de obra (€/h)
  3.  $C_E$ : Combustible o energía (€/h)
  4.  $C_L$ : Aceites, grasas y filtros (€/h)
  5.  $C_B$ : Bocas, varillas, manguitos y adaptadores (€/m)
  6. VM: Velocidad media de perforación (m/h)

Fuente: López Jimeno, López Jimeno, García Bermúdez. (2017)



### DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN (VP)

1.- Obtención del índice "I<sub>p</sub>" de la roca en laboratorio.

2.- Definición de las características del martillo perforador.

E<sub>g</sub> = Energía por golpe

n<sub>g</sub> = número de golpes por minuto

3.- Determinación de la longitud de filo "L<sub>f</sub>" de la herramienta de perforación. Para bocas de pastillas se cumple:

$L_f = 1,7 D - 0,7$       donde D es el diámetro de la boca.

Si se utilizan bocas de botones, la velocidad de penetración obtenida para el diámetro estudiado se multiplica por 1,15 y con bocas de bisel por 0,85.

4.- Cálculo de la velocidad de penetración mediante la fórmula:

$$VP = \frac{E_g \times n_g}{D \times L_f^{1/2}} \times 10^{-6} (51 \times I_p + 90)$$

### DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE PENETRACIÓN (VP)

- La velocidad media alcanzada por una perforadora en un periodo de trabajo largo depende de:
  - 1.- Profundidad del barreno.
  - 2.- Tiempos de maniobra.
- El número de varillas y empalmes de los que consta la sarta de perforación depende de la longitud de los barrenos, afectando significativamente al ritmo de avance, puesto que se producen pérdidas de energía por los siguientes motivos:
  - 1.- Ausencia de rigidez en los acoples que provocan unas pérdidas del 3% de la energía transmitida por las reflexiones y del 5,5% por fricciones que producen calor.
  - 2.- Aumentos de temperatura en el varillaje producidos por rozamiento internos, que provocan pérdidas de entre 0,2 a 0,4 % por varilla.
- Con una caída media del rendimiento de un 9% equivalente a la pérdida de energía producida, se calcula la velocidad de penetración utilizando la fórmula siguiente:

$$VP_m = \frac{VP}{N_v} \times \frac{1 - 0,9 N_v}{0,09}$$

- Donde
  - $N_v$  = número de varillas utilizado
  - VP = velocidad de penetración conseguida con la primera varilla

## 1.12. Cálculo de coste de perforación

### AMORTIZACIÓN

- La amortización depende de dos factores: la pérdida de valor por el uso y la pérdida por el paso del tiempo.
- El coste de amortización, al considerarse lineal, se calcula con la fórmula siguiente:

$$C_A = \frac{\textit{Precio de adquisición} - \textit{Valor residual}}{\textit{Horas de vida}}$$



### INTERESES, SEGUROS E IMPUESTOS

- Para calcular el coste de esta partida se utiliza la fórmula siguiente:

$$C_I = \frac{N + 1}{2N} \times \frac{\text{Precio de adquisición} \times (\text{interés} + \text{seguros} + \text{impuestos})}{\text{Horas de trabajo al año}}$$

- Donde:

N= número de años de vida

### MANTENIMIENTO Y REPARACIONES

- Se incluye en esta partida los costes de mantenimiento preventivo y las averías.

$$C_M = \frac{\text{Precio del equipo}}{1000} \times FR (\%)$$

- Donde:

FR = factor de reparación

EQUIPOS NEUMÁTICOS	FACTOR DE REPARACIÓN	
	REPUESTOS	REPUESTOS + M.O.
<b>Carro sin perforadora:</b>		
- Martillo en cabeza	4 – 6%	8 – 12%
- Martillo en fondo	3 – 5%	6 – 10%
<b>Perforadora:</b>		
- Martillo en cabeza	6 – 10%	12 – 20%
- Martillo en fondo	8 – 12%	16 – 24%
Martillo Manual	6 – 10%	12 – 20%
Compresor portátil	2 – 3%	4 – 6%

### MANO DE OBRA

- Corresponde al coste por hora del perforista, incluyendo en esta partida los gastos sociales correspondientes, vacaciones... y el ayudante del perforista cuando sea necesario.

### COMBUSTIBLE O ENERGÍA

- Calculado a partir de las especificaciones del motor de la máquina y del compresor (diésel o eléctrico).
- Compresor diésel:

$$C_e = 0,3 \times potencia (kW) \times FC \times Precio combustible$$
$$C_e = 0,22 \times potencia (HP) \times FC \times Precio combustible$$

- Donde:

FC = factor de combustible (entre 0,65 y 0,85)

### ACEITES, GRASAS Y FILTROS

- Se estima como un porcentaje del consumo de energía.
- Oscila generalmente entre el 10 y el 20%, según las máquinas.

### BOCAS, VARILLAS, MANGUITOS Y ADAPTADORES

- Es una de las partidas más importantes.
- Se calcula a partir de los datos indicados en el cuadro de Accesorios de perforación Rotopercutiva.

- Castilla Gómez, J. y Herrera Herbert, J. (2012). *El proceso de exploración minera mediante sondeos*. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Laboratorio de Tecnologías Mineras. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.
- Bernaola Alonso, J., Castilla Gómez, J y Herrera Herbert, J. (2013). *Perforación y Voladura de rocas en minería*. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Laboratorio de Tecnologías Mineras. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.
- Castilla Gómez, J. y Herrera Herbert, J. (2012). *Utilización de Técnicas de sondeos en captaciones de agua*. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Laboratorio de Tecnologías Mineras. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.
- López Jimeno, C., López Jimeno, E. y García Bermúdez, P. (2017). *Manual de perforación, Explosivos y Voladuras*. Madrid: Gráficas Arias Comunicación.