

LA PERFORACION DE ROCAS

Por FRANCISCO BARCELÓ,
Ingeniero de Caminos.

Se hace en el presente artículo un minucioso análisis de todos los elementos que concurren en el trabajo de perforación de rocas y se examinan metódicamente las repercusiones de cada uno en el rendimiento a obtener, recomendándose los ensayos y el acopio de datos estadísticos para llegar a obtener el óptimo.

I. La boca y la barrena.

1. *Introducción.*— En otro artículo anterior (1) hemos hablado ya de las indudables ventajas que reporta el empleo de la widia (carburo de tungsteno) en la perforación de rocas duras.

El rendimiento de la perforación se ha acrecentado extraordinariamente, ya que con la widia no sólo ha aumentado la velocidad de barrenado, sino que a la par han disminuido los tiempos "muertos" originados por los constantes cambios de barrenas, necesarios cuando se usa acero ordinario.

En general, las herramientas usadas en la construcción se compran ya terminadas y listas para su empleo. Excepción a esta regla era el caso de las bocas de las barrenas, que debían fabricarse en el propio tajo, con todos los inconvenientes a ello inherentes; falta de calidad, uniformidad, etc. Con la widia, las barrenas ya no son producto de una artesanía "localizada" en el tajo, sino una prefabricación perfectamente controlada. Es un paso más en la tendencia moderna de fabricación previa en la construcción.

En el salto Moncabril, hemos perforado con diversos tipos de widia 80 000 metros lineales de barrenos. Una estadística y control cuidadosos, nos ha permitido deducir algunas conclusiones, que estimamos puedan ser útiles a los usuarios.

Todos los datos de perforación citados a continuación se refieren al granito y al gneis que forman el macizo Noroeste de la provincia de Zamora, lugar de emplazamiento de nuestro salto.

2. *La boca.*— Existen dos sistemas perfectamente diferenciados de unión de la boca con la barrena: la boca destacable o móvil y la fija o solidaria a la barrena. A su vez, la boca destacable se une a la barrena, bien por ajuste cónico, bien por rosca o bien por algún otro sistema, combinación de ambos.

3. *La boca destacable.*— Tiene como principal ventaja la simplificación del transporte de barrenas por reducción del peso a transportar.

Frente a ello, presenta una serie de inconvenientes:

Se pierde el 10 y hasta el 25 por 100 de potencia con respecto a la boca fija (debido a la unión no rígida).

El diámetro de corte tiene que ser mayor, lo que reduce la velocidad de perforación.

Pero sobre todo, la discontinuidad y el debilitamiento de la sección de unión, provoca un número de roturas mucho mayor que en las bocas fijas.

4. *Bocas con ajuste cónico.*— Este tipo de boca, empleado por algunas casas extranjeras, es el que han adoptado los diversos fabricantes españoles. Fue el primer tipo que utilizamos en nuestra obra; en un principio obtuvimos un porcentaje de roturas que llegó al 60 por 100. Cada boca no llegó a perforar, en promedio, más que 63 m., pero no a causa de la

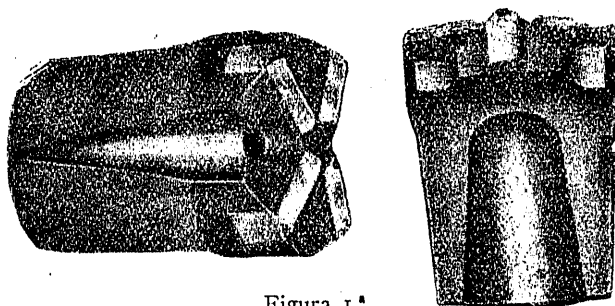


Figura 1.ª

widia, que aún conservaba gran parte de su capacidad de perforación, sino a causa de las roturas de barrenas.

La rotura se verifica, casi siempre, en la unión de la barrena y la boca, quedando metida parte del cono de la barrena en el hueco de la boca. Precisamente en este lugar (fig. 1.ª) hay un cambio brusco de sección, en la que, como es sabido, hay una concentración de tensiones, las cuales pueden exceder varias veces a la normal y especialmente, bajo la acción de cargas variables, pueden llegar a producirse fisuras en dicha sección.

Para reducir el número de roturas, intercalamos entre ambos conos una chapa fina de cobre (o de latón). Así se eliminan las desigualdades de un ajuste imperfecto, permitiendo que la boca se adapte al cono de la barrena en toda su superficie. De esta forma, el promedio de perforación efectuado por boca llegó a los 200 m.; pero el número de roturas seguía siendo importante: el 40 por 100.

5. *Bocas roscadas.*— Estas bocas parecen, generalmente, por desgaste de la rosca, ya que el incesante golpeteo del martillo, al transmitirse al fileteado,

(1) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, octubre 1951. "Perforación de túneles en roca".

acaba desgastándolo por completo. Anulado el ajuste, la boca queda inservible, cuando, en general, la widia todavía conserva gran parte de su capacidad de perforación (fig. 2.^a).

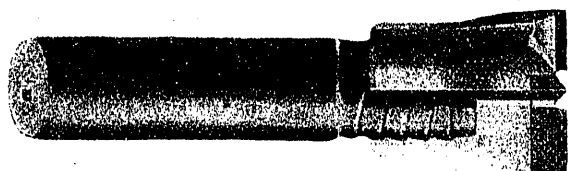


Figura 2.^a

El 50 por 100 de las bocas roscadas utilizadas sufrió el desgaste de su rosca.

6. *Bocas fijas.* — Las que nosotros hemos empleado (fig. 3.^a), de procedencia sueca, han dado un resultado excelente. El porcentaje de roturas de barrenas no pasa del 5 por 100 y se ha alcanzado una media de perforación de 415 metros lineales de barreno por boca.

7. *Análisis de los esfuerzos a que están sometidas las barrenas.* — Un estudio teórico de las cargas a que se someten las barrenas, nos permitirá conocer las probables causas de las roturas y, en consecuencia, los posibles remedios.

Evidentemente, un problema tan complejo requiere para su estudio una esquematización, con lo cual lo que ganemos en claridad lo habremos perdido en precisión. Es por ello por lo que no tendremos en cuenta los rozamientos del martillo con la barrena y otros fenómenos secundarios.

Durante su funcionamiento, la barrena está sometida a dos esfuerzos dinámicos sucesivos:

a) Un choque debido al golpe del pistón sobre la enmangadura de la barrena.

b) E inmediatamente después, un choque entre la boca y la roca.

Aplicamos en ambos casos la teoría del choque entre cuerpos imperfectamente elásticos (fig. 4.^a).

Estudiemos primero el caso a). Sea m_1 y m_2 la masa del pistón y la barrena, respectivamente; n_1 y n_2 , las velocidades de ambos antes del choque. Pero

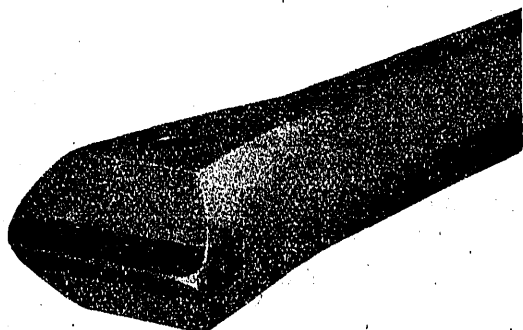


Figura 3.^a

como la velocidad de la barrena antes del choque es nula, $n_2 = 0$.

La energía transmitida a la barrena será:

$$E_a = \frac{1}{2} m_2 V_2^2.$$

En donde V_2 es la velocidad de la barrena después del choque, cuyo valor es:

$$V_2 = \frac{m_1 n_1 (1 + K_a)}{m + m_2}, \quad [1]$$

y sustituyendo:

$$E_a = \frac{1}{2} \frac{m_2 m_1^2}{(m_1 + m_2)^2} (1 + K_a)^2 n_1^2. \quad [2]$$

K_a es el coeficiente de restitución de la energía del choque pistón-barrena. Sería igual a la unidad si el choque fuera entre cuerpos perfectamente elásticos, y nulo si se tratase de cuerpos perfectamente plásticos. Su valor está dado por la relación:

$$K_a = \frac{V_1 - V_2}{n_1 - n_2}; \quad 0 < K_a < 1.$$

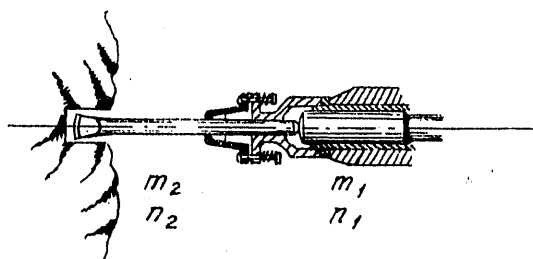


Figura 4.^a

Para el acero se puede tomar $K_a = \frac{5}{9}$.

En el choque entre la barrena y la roca, volvemos a aplicar las fórmulas anteriores, teniendo en cuenta que m_2 es la masa de la barrena, y m_1 , la masa de la roca, es infinita y su velocidad, 0. La velocidad de la barrena antes y después del choque será, respectivamente, V_1 y V_3 .

De las fórmulas de la teoría del choque se deduce que:

$$V_3 = -V_2 = K_b V_1.$$

K_b es un coeficiente análogo a K_a , pero que en este caso sólo depende de la elasticidad de la boca y de la roca.

La energía transmitida a la barrena será:

$$E_b = \frac{1}{2} m_2 V_3^2.$$

y sustituyendo V_3 y V_2 por su valor [1], resulta:

$$E_b = \frac{1}{2} \frac{m_1^2 m_2}{(m_1 + m_2)^2} n_1^2 (1 + K_a)^2 \times K_b^2.$$

Para que la barrena sea capaz de transmitir la energía recibida, es necesario que tenga una resistencia suficiente para soportar las cargas provocadas por el golpe, sin romperse. Suponemos que la carga que soporta la barrena es igual a la suma de las energías del choque E_a y E_b :

$$E = E_a + E_b = \frac{1}{2} \frac{m_1^2 m_2}{(m_1 + m_2)^2} n_1^2 (1 + K_a)^2 (1 + K_b^2). \quad [3]$$

La resistencia de un material al choque se determina mediante el ensayo de resiliencia, que se efectúa sobre probetas prismáticas apoyadas en sus extremos; sobre ellas actúa un peso pendular que cae de una determinada altura (probetas Charpy o Izod). La resistencia viene dada por el trabajo en Kgm., dividido por la sección en cm.².

Para darnos una idea del valor de la energía de choque sobre la barrena, vamos a aplicar la fórmula que hemos deducido [3] a un caso corriente:

Supongamos un martillo con las siguientes características:

Masa del pistón: $m_1 = 4$ Kg.
Masa de la barrena: $m_2 = 2$ Kg.
Velocidad del pistón: $n_1 = 4$ m./seg. (1).

$K_a = \frac{5}{9}$ y $K_b < 1$, que depende del tipo de roca, lo despreciamos en este caso por ser pequeño y tener poca influencia sobre el resultado.

$$E = \frac{1}{2} \frac{2 \times 4^2}{(2 + 4)^2} 4^2 \left(1 + \frac{5}{9}\right)^2 = 15,9 \text{ Kgm.}$$

Como la sección de la barrena exagonal de 22 milímetros es de 2,8 cm.², la resiliencia será de 5,5 kilogrametros/cm.².

En los aceros ordinarios al carbono, el valor de la resiliencia suele estar comprendido entre los 4 y los 8 Kgm./cm.². Para comprender este amplio margen de variación, hay que tener en cuenta que aceros del mismo tipo, pero obtenidos mediante procesos de fabricación diferentes, se comportan de modo distinto en ensayos de choque. En los aceros al níquel, al cromo y cromomolibdeno, la resiliencia oscila entre 7 y 10 Kgm./cm.², y en ciertos tipos de acero al manganeso se llega a los 14. Estas cifras se refieren a ensayos con probetas Charpy, las cuales trabajan en condiciones algo diferentes que las barrenas, golpeadas en sus extremos y no en el centro, como en la probeta citada. Por ello, sólo una experimentación

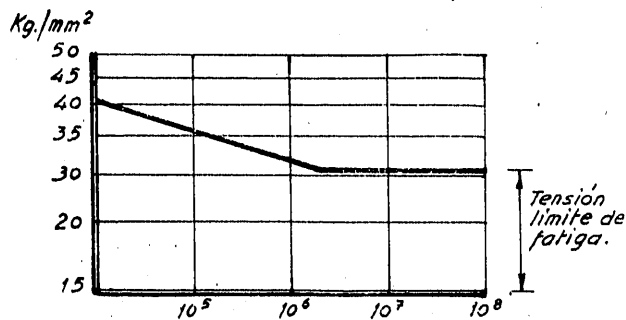
en condiciones análogas nos permitiría conocer los valores exactos del valor de la resiliencia en rotura de barrenas; pero de todas formas, la cifra obtenida en nuestro ejemplo, 5,5 Kgm./cm.², y su comparación con las cargas de rotura, ya nos indican la conveniencia de usar aceros de alta resiliencia o aumentar la sección de las barrenas.

8. *Fatiga repetida.*— Pero, además, hay que tener en cuenta que no se trata de un sólo choque, sino que la barrena suele sufrir 2 000 golpes por minuto; o sea, que una barrena con widia, que perfora unos 100 m. l. de barreno, recibe en este lapso de tiempo unos 10 ó 20 millones de golpes.

Esta repetición del choque produce el conocido fenómeno de la fatiga, por lo cual el material se rompe con cargas inferiores a la carga normal de rotura. Existe una tensión límite de fatiga, la cual, aunque se repita indefinidamente, no produce la rotura del material (fig. 5.^a).

Esta tensión suele alcanzar un valor, en los metales ferrosos, del 50 % de la resistencia normal a rotura. Pero hacemos la misma salvedad que anteriormente, o sea que los ensayos efectuados se refieren a probetas Charpy, que difieren de las barrenas, con las cuales no conocemos se hayan hecho ensayos. Pero lo que sí es un hecho general es que la tensión límite de fatiga es siempre menor que la carga normal de rotura; por lo tanto, si usamos un acero con una resiliencia de 6 Kgm./cm.², es seguro que su límite de fatiga al choque no pasará de los 4 kilogrametros/cm.². Hay que tener en cuenta que los defectos de la superficie hacen bajar mucho el límite de fatiga; en los aceros, una simple raya producida por un diamante rebaja dicho límite en un 40 %, y a la inversa, mediante un pulimento de la superficie, se obtienen incrementos del 20 %. Mediante cementación o nitrógenación, se puede conseguir aumentos en el límite de fatiga hasta del 300 % (1).

En una palabra: para que las barrenas que se usan con la widia tengan una vida prolongada, es



Variación de la resistencia a la rotura con el n.º de ciclos en fatiga.

Figura 5.^a

(1) Corresponde a un martillo de 2 000 golpes por minuto y 6 cm. de carrera de pistón.

(1) Fernández Casado: Estado actual del problema de la rotura de los metales.

preciso elegir aceros de alta resiliencia y con una tensión límite de fatiga adecuada para resistir un número elevado de choques. Esta condición no la cumplen los aceros corrientes y es preciso recurrir a los aceros aleados, en especial al cromo y cromo-molibdeno.

9. *Efecto entalladura.* — Además de las tensiones provocadas por las cargas de choque repetidas, en las bocas destacables hay que tener en cuenta el efecto de entalladura producido por la discontinuidad y cambio brusco de sección entre la barrena y la boca. Se produce en esta sección una concentración de tensiones que puede exceder la tensión admisible en el material, provocando la rotura de la pieza en dicha unión. En los elementos que tienen que resistir cargas de choque, esta discontinuidad es particularmente peligrosa, ya que el límite de fatiga disminuye extraordinariamente. En ciertos ensayos a rotura por choque, se ha producido la rotura con carga cuatro veces menor en una pieza con una entalladura con respecto a la misma pieza sin ella.

Cuando se usan barrenas largas (de 1,80 m. en adelante), hay que tener en cuenta el efecto de pandeo, para dimensionar apropiadamente la sección con respecto a la longitud.

10. *Widia engastada en obra.* — A los hechos experimentales sobre rotura de bocas destacables, reseñados anteriormente, queremos añadir finalmente un nuevo resultado, que nos confirma en nuestra opinión.

Dado el mal resultado que obteníamos con las bocas destacables y ante las dificultades de importación de barrenas con widia, adquirimos pastillas de carburo de tungsteno, de fabricación española, y las engastamos, en nuestro taller de obra, en barrenas de acero ordinario. Con ellas no llegamos a pasar de los 50 m. de perforación por unidad: se rompían las barrenas, no la widia. Estudiado el problema a fondo, llegamos a la conclusión, expuesta en este artículo, de la necesidad de aceros especiales.

Un material de desecho, que creíamos había agotado ya su vida útil, nos dió la solución del problema. Las barrenas suecas Hellefors, con widia engastada directamente en la barrena, nos habían dado un resultado magnífico en la perforación, pero reducida la longitud de corte de la widia hasta 25 mm., no eran ya útiles para perforar. Pues bien: en estas barrenas de acero especial volvimos a insertar en nuestro taller las pastillas de widia española, con los resultados positivos que a continuación indicamos:

Hasta ahora hemos fabricado 68, de las cuales se han roto 11. De estas roturas, 3 lo han sido por la pastilla de widia, lo cual implica una imperfección de engaste muy explicable en un taller de obra; las otras 8 se han roto por la barrena, lo que representa sólo un 11 % (antes el 5 % en las barrenas con widia sueca).

Las 57 barrenas que no se han roto llevan ya

perforados, casi todas, más de 100 m. cada una, habiendo llegado varias a los 300 m. Todavía estamos en plena experimentación, pero los resultados obtenidos hasta ahora son alentadores.

11. *Conclusiones.* — El análisis de la fórmula [3], así como los hechos experimentales reseñados, nos permite deducir las siguientes conclusiones:

1.^a La reducción de la potencia de los martillos prolonga la vida de las barrenas. Entendemos por potencia del martillo el producto de la masa m_1 por la velocidad v_1 del pistón. El valor de la energía de choque disminuirá al disminuir $m_1 v_1$; pero no debemos olvidar que ello irá en detrimento de la velocidad de avance; por tanto, hay que conseguir un compromiso entre la velocidad y la resistencia a la rotura de las barrenas.

Además, a cada tipo de martillo debe corresponder una barrena de resistencia conveniente. Así, por ejemplo, para los martillos de 16 a 18 Kg. es suficiente barrenas exagonales de acero dulce de 22 mm., en caso de no usar widia. Con widia y martillos de 20 a 25 Kg. — que son los adecuados — debe usarse acero especialmente aleado, sin lo cual las barrenas es difícil duren más de 70 m. Con martillos más pesados conviene usar barrenas de 25 mm. Los americanos, con los Drifters D.A.-35, utilizan barrenas redondas de 32 mm.

2.^a El valor de K_a aumenta con la dureza de las superficies de contacto entre pistón y barrena, lo cual demuestra la conveniencia de un buen tratamiento térmico de las espigas o enmangaduras y de la base del pistón, o aún mejor el uso de aceros especiales.

También conviene que el choque entre pistón y barrena sea normal a su superficie de contacto; esto puede mejorarse con el alargamiento de la enmangadura, lo cual indica la ventaja de usar longitudes de espiga de 108 mm. en lugar de 82 mm. medida hoy normal en España.

3.^a K_b es un coeficiente que depende de la calidad de la boca y de la roca. Su valor aumenta con la dureza de la boca, lo que nos demuestra la ventaja de usar widia en rocas duras.

4.^a En el estado actual de la técnica, las bocas destacables ofrecen pocas garantías de duración, por lo cual creemos que es más ventajoso el empleo de las bocas fijas.

5.^a Para sacar a la widia todo el partido posible, es necesario el empleo de barrenas de acero especial de alta resiliencia.

II. Las rocas.

1. *Determinación objetiva de las cualidades de la roca.* — La comparación de los resultados económicos de la perforación entre distintos lugares de trabajo suele ofrecer grandes dificultades, originadas por carencia de una calificación objetiva de la dureza de la piedra.

Los conceptos duro, semiduro y blando son completamente relativos e indeterminados.

Sucede, con frecuencia, que si se obtiene una velocidad de perforación escasa, un avance reducido, o, en definitiva, un escaso rendimiento, se afirma apriorísticamente que la roca es muy dura; pero todo ello puede ser debido a mal empleo del material, mala calidad de éste, etc.; en suma, a defectos de organización técnica.

Una adecuada y objetiva calificación de las rocas permitiría, entre otras cosas, poner al descubierto estos defectos y en cada caso utilizar los procedimientos técnicos más adecuados a cada tipo de roca.

También podrían obtenerse curvas que nos dieran, en función de la calidad de la roca, la velocidad de perforación, el tipo de boca a emplear, el consumo de explosivos e incluso el coste de la perforación (expresado en horas-hombre y kilos de materiales, para hacerlo independiente de las fluctuaciones monetarias y distancias de transporte).

Desde el punto de vista de la construcción de túneles y de la explotación de canteras, son tres cualidades de la roca las que interesa considerar y definir: dureza, perforabilidad y resistencia a la voladura.

2. *Dureza*.—La escala de Mohs tiene un valor muy escaso, pues sólo se trata de una dureza al rayado y para rocas homogéneas.

Los ensayos de dureza que se aplican en los metales (dureza Brinell, Vickers o Shore) no se han aplicado a las rocas; solamente en época bien reciente se ha empleado el ensayo con el escleroscopio (1). Se trata de un ensayo de dureza por rebote, consistente en dejar caer un martillo desde una determinada altura, H , sobre el cuerpo a ensayar; la altura de rebote, h , nos determina la dureza:

$$d = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

En la tabla adjunta damos una relación de la dureza Shore, de algunos tipos de roca:

CLASE DE PIEDRA	Dureza Shore
Piedra yesosa	18
Marga	22 a 28
Arcilla esquistosa (carbón graso)	24 a 40
Pizarra arenosa (carbón graso)	40 a 70
Cuarzo compacto	94 a 97
Cuarzo azul	88 a 101
Pirita	72 a 87
Gres rojo	75 a 85
Pizarra	51 a 62
Granito (de profundidad)	78 a 85
Granito con mezcla fuerte de cuarzo ...	89 a 103
Gneis	80 a 94

(1) Ha sido usado por primera vez por los alemanes (Wolanski), en 1940, para efectuar ensayos con widia.

Comprobamos que la Petrografía y la Geología tan sólo nos dan una idea aproximada acerca de la dureza de la roca.

La experiencia ha demostrado que en los casos en que la dureza Shore pasa del valor 70, se obtienen mejores resultados con el empleo de la widia. Hasta una dureza de 60 Shore, puede emplearse la perforación rotativa, sin percusión.

Estos ensayos de dureza son ensayos de laboratorio, difíciles de efectuar en obra, y además, sin un interés práctico inmediato, ya que, aunque existe una relación entre la dureza Shore y la velocidad de avance, es difícil precisarla numéricamente. Por ello es preciso buscar otro ensayo que se adapte mejor a las condiciones prácticas de la perforación.

3. *Perforabilidad*.—Una relación entre las propiedades físicas de las rocas y su resistencia a ser perforadas, es difícil de establecer *a priori*. Sólo mediante una experimentación adecuada podría llegarse a resultados concretos.

Prescindiremos de la perforación por rotación, sólo usada en las explotaciones carboníferas y en alguna otra roca blanda, pero casi desconocida en la construcción.

En la perforación por percusión rotativa para cada roca determinada, la velocidad de avance depende de múltiples factores que vamos a analizar ordenadamente:

Boca (de widia)	tipo de boca. diámetro. ángulo de corte. desgaste.
Barrena	sección. longitud.
Martillo	peso del martillo. peso del pistón. golpes por minuto. vueltas por minuto. diámetro del émbolo. carrera del émbolo. engrase. estado de ajuste. soporte del martillo. presión del aire. expulsión del polvo.

Si fijamos todas estas variables, la velocidad de perforación sólo será función de la roca, y así podrá definirse cada tipo de roca según esta velocidad, obtenida en condiciones y con medios exactamente definidos. Este ensayo podrá realizarse fácilmente en obra, y sólo resta que un organismo o laboratorio oficial dé las normas concretas para realizarlo.

Del mismo modo, manteniendo constante el tipo de roca, podemos estudiar la influencia de cada uno de los factores antes enumerados sobre la velocidad de perforación.

De la conjunción de ambos estudios pueden obtenerse las condiciones óptimas de perforación para cada clase de roca.

Vamos a analizar la influencia de alguno de estos factores:

Bocas. — A igualdad de todas las demás condiciones, la velocidad de perforación es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro de la widia:

$$V = \frac{K}{D^2}.$$

K es un parámetro que depende del tipo de roca y varía de 10.000 a 50.000.

Esta condición está limitada por el diámetro de los explosivos y el rendimiento de la voladura; pero éste es un problema independiente de la perforación.

Presión de aire. — Es directamente proporcional a la velocidad de barrenado, hasta un cierto límite, que se presenta hacia los 6 ó 7 Kg. Combinada esta condición con la anterior, podemos escribir:

$$V = K_1 \frac{P}{D^2}.$$

Martillo. — La velocidad de perforación crece, en general, con el peso del pistón y del martillo,

El número de golpes y el número de vueltas del pistón tiene gran influencia sobre el rendimiento de la perforación. En cada percusión del martillo, el filo de la boca penetra en la roca una cierta profundidad. En el golpe siguiente, a causa de la rotación de la barrena, el filo de la boca se encuentra en otra posición, formando un cierto ángulo con la anterior. Este ángulo puede tener, por ejemplo, un valor de 36° , lo cual corresponde a un martillo de 2 000 golpes y 200 vueltas por minuto.

La roca se rompe, en parte, por compresión, por sobrepasar el golpe de impacto la carga de rotura a compresión, y en parte, por esfuerzo cortante en la zona entre dos golpes sucesivos.

Para obtener el rendimiento óptimo debe adoptarse la rotación más amplia posible entre dos percusiones sucesivas, de tal forma, que la roca comprendida entre ambas huellas quede destruída por cizallamiento en el momento de la segunda percusión. Es evidente que con esta rotación, que también llamaremos óptima, se precisa un número mínimo de percusiones para destruir toda la roca. y, en consecuencia, el tamaño de los detritus será el máximo posible. Esto puede tener sus ventajas desde el punto de vista de la silicosis, la cual sólo puede ser producida por polvos menores de 10μ .

Si la rotación efectiva es superior a la óptima, la roca no quedará destruída entre dos golpes sucesivos y será preciso otra vuelta de la barrena para destruir efectivamente toda la profundidad del corte logrado por percusión.

Por el contrario, si la rotación es inferior a la óptima, el martillo efectuará un trabajo de machaqueo inútil, volviendo a triturar la roca ya desgajada.

Todo esto es cierto, si la evacuación de los detritus se verifica rápida y eficazmente, bien sea con aire o con agua.

A cada tipo de roca corresponderá una rotación óptima (que dependerá de su resistencia a compresión y a esfuerzo cortante), y de aquí se sigue la conveniencia de emplear para cada roca martillos con un número de vueltas adecuado.

En resumen: un análisis racional del comportamiento del material empleado en la perforación, mediante ensayos y estadísticas, es el método más eficaz para aumentar el rendimiento del material.