

SISTEMAS DE PERFORACION RAPIDA SIN ENTUBADO PARA SONDEOS DE OBRAS PUBLICAS (*)

APLICACIONES DE TECNICAS EMPLEADAS EN PROSPECCIONES PETROLIFERAS

Por JESUS L. PRESA SANTOS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director Técnico de KRONSA

ADOLFO ERASO ROMERO

Licenciado en Ciencias Químicas
Asesor Técnico de Dirección de KRONSA

En este artículo se han estudiado comparativamente los diferentes sistemas de perforación rápida sin entubado, que pueden ser aplicables a sondeos para trabajos de obras públicas. Los procedimientos estudiados principalmente han sido los de perforación a rotación con brocas multialetas de widia, triconos y perforación con tallantes y martillos de fondo. Se ha analizado comparativamente la perforación con los distintos sistemas de agua, lodo y aire comprimido, para lograr la adecuada limpieza de detritus de sondeo. Se dan asimismo unas tablas prácticas sobre la selección del tipo de tricono adecuado en función del aspecto del anterior, revoluciones y peso adecuado de los mismos, caudal máximo necesario de limpieza con los tres fluidos utilizados (lodo, agua, aire comprimido) para varias combinaciones de diámetros de pozo y varillaje, así como indicación de la región de utilización de cada una de las técnicas consideradas en función del diámetro del pozo y de la profundidad alcanzada. Como quiera que el carácter complementario de dichas técnicas se halla dentro de las normalmente utilizadas en obras públicas, recomendamos finalmente standarizar los diámetros a utilizar en el sentido de poder seleccionar sobre el mismo sondeo, en caso de necesidad cualquiera de los tres procedimientos descritos, sacando el máximo partido al carácter complementario de los mismos.

Las técnicas utilizadas en la ejecución de sondeos comprenden una extensa gama en función, tanto de los objetivos perseguidos como de las características de los terrenos a perforar.

Sin embargo, adoptando un criterio comparativo, los numerosos procedimientos utilizados pueden englobarse en dos grandes grupos, que se basan, respectivamente, en principios físicos diferentes.

La perforación a percusión en la que el trabajo es producido por una herramienta de golpeo que fragmenta la roca del fondo del pozo al caer, bien por su propio peso, bien por accionamiento neumático, principalmente. Este procedimiento engloba, tanto las primitivas técnicas de percusión a cable, como los martillos que combinan la percusión con la rotación que impide el tallante golpear sobre el mismo lugar,

lo que redundaría en una merma de efectividad en el avance.

Existen numerosas variantes dentro de dicho procedimiento. Sin embargo, podemos considerar como más importantes los dos tipos que se definen como de martillo en cabeza y martillo en el fondo del sondeo, ambas con accionamiento neumático.

Nosotros nos vamos a remitir a la variante de martillos de fondo, por ser la técnica de sondeos profundos mayores de 30 m., a la que nos referiremos, principalmente, en este artículo.

Perforación por rotación que engloba las técnicas que utilizan herramientas que fragmentan la formación *por corte*, mediante diferentes diseños en los que tienen un importantísimo papel las cuchillas sinterizadas de widia; *por desgaste*: aprovechando la abrasión producida por útiles también de widia o de alta dureza a base de inserción o concreción de diamante; *por aplastamiento* o *punzonamiento*, mediante

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a esta Redacción hasta el día 28 de febrero de 1970.

la técnica muy matizada en las perforaciones petrolíferas, a base de barrenas de rodillos (sustancialmente triconos) cuyo diseño de dientes y calidad de los mismos, es función de la dureza de la formación a atravesar.

Como la técnica de perforación a rotación por desgaste emplea herramientas caras y se usa predominantemente para la extracción de testigos continuos, no representa a nuestros ojos un procedimiento de perforación rápida, por lo que nos vamos a remitir a la descripción de los otros dos procedimientos.

Procedimientos utilizados. Parámetros de perforación.

De todas las variantes expuestas nos vamos a remitir aquí, exclusivamente, a tres, dos de ellas de perforación a rotación, según se utilice como herramienta de corte multialetas con inserción de pastillas de widia, o triconos (es decir, por corte y punzonamiento, respectivamente) y la tercera de perforación a percusión a base de las modernas técnicas de martillos de fondo.

Los parámetros fundamentales que afectan

(para las técnicas de percusión); el tercer parámetro es la adecuada *limpieza del pozo* y su importancia es tal, que lo trataremos, especialmente, en un apartado, suponiendo sencillamente mientras tanto, que las condiciones de limpieza son suficientes.

A) *Perforación a rotación con herramientas de aletas cuyo filo cortante está compuesto por pastillas de widia.*

Los diseños de herramientas de corte a utilizar son variados, dependiendo, principalmente, de las características de la roca a cortar. Los tipos fundamentales utilizados en Obras Públicas son (ver figura 1):

GDT: para roca blanda (carbón, evaporita, terrenos recientes, etc.).

GDE: para rocas semiduras (margas, arenas consistentes, etc.).

GDM: para rocas más duras (caliza, dolomías, areniscas, etc.).

GDU o GDD: para rocas duras (granito, cuarcita ígneas, etc.).

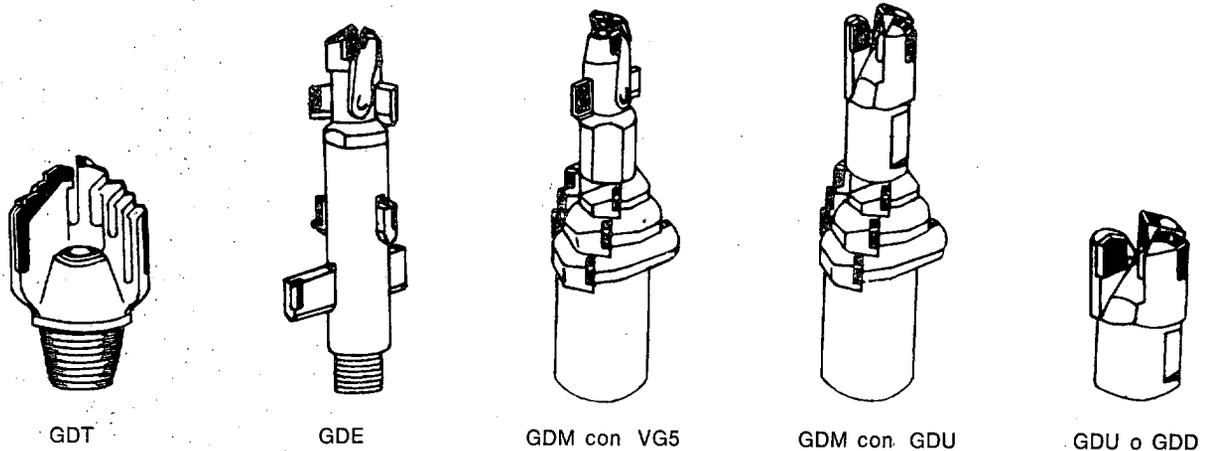


Fig. 1. — Tipos más frecuentes de herramientas de perforación a rotación con inserción de pastillas de widia.

a la perforación son, principalmente, tres: *el peso apoyado y la velocidad de rotación* imprimida a la herramienta de corte (para las técnicas de rotación), que tienen su equivalente en cuanto al trabajo producido por golpeo aprovechando su impulso mecánico en los martillos de fondo

A pesar de la diversidad de aspectos entre los diferentes tipos de diseño de herramientas, todas ellas se basan en un principio común, cuya aplicación nos define los ángulos característicos que son función, tanto de la calidad de la herramienta y de los materiales a

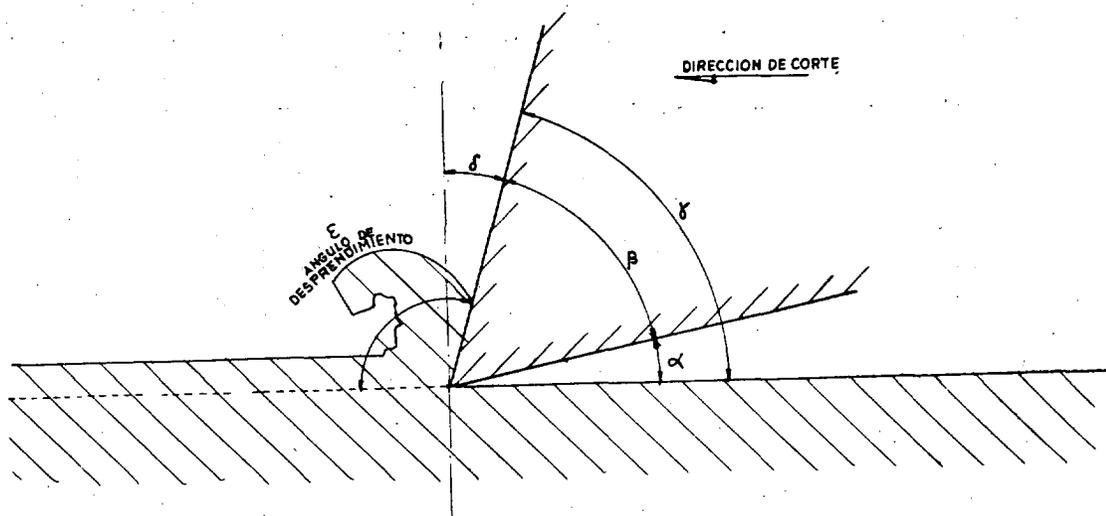


Fig. 2. — Ángulos característicos de una herramienta de corte.

arrancar, como de la clase y condición de trabajo, de manera que el rendimiento de la perforación se halla íntimamente ligado a ellos.

Los ángulos característicos son, principalmente:

Angulo de incidencia	α
Angulo de cuña cortante	β
Angulo de trabajo	γ
Angulo de ataque	δ
Angulo de desprendimiento	ϵ

Relacionados entre sí mediante la figura 2, que lleva implícita las siguientes equivalencias:

$$\alpha + \beta + \delta = 90^\circ,$$

$$\gamma = \alpha + \beta,$$

$$\epsilon = 90 + \delta = 180 - \gamma.$$

El ángulo de incidencia α , tiene la exclusiva función de permitir el trabajo de corte de la herramienta, de manera que si éste es pequeño no puede penetrar en el material.

Es recomendable que α sea tan pequeño como sea posible, para evitar las pérdidas de resistencia de la herramienta.

El ángulo de cuña cortante β , viene condicionado por la dureza del material a arrancar. Para valores bajos de β , es evidente que la penetración sería más fácil y el esfuerzo mínimo; no obstante, esto presentaría importantes inconvenientes ya que el filo cortante al ser excesivamente agudo se achataría al no poder so-

portar, ni la excesiva presión de corte, ni las altas temperaturas liberadas por fricción, que desembocarían en la rotura de la punta de la herramienta.

El ángulo β es, pues, directamente proporcional al esfuerzo realizado en el corte, para una calidad dada de herramienta de corte.

El ángulo de trabajo γ , que como sabemos, es la suma del de incidencia α y del de cuña cortante β , está sujeto a todas las consideraciones que hemos expuesto sobre este último, siempre que α sea lo suficientemente grande como para permitir que el corte se realice.

El ángulo de ataque δ , está relacionado exclusivamente con la dureza del material a arrancar.

Aunque es evidente que al aumentar δ disminuirá la fuerza de deformación y aumentará la de rozamiento, no es conveniente dar a δ valores altos, pues caeríamos en los mismos inconvenientes derivados de dar a β valores bajos.

En la práctica δ tiende a cero para materiales duros, y crece paulatinamente, llegando a ser máximo para materiales muy blandos.

El ángulo de desprendimiento ϵ determina fundamentalmente la dificultad que entraña el desprendimiento del material cortado.

Es evidente que cuanto más pequeño sea ϵ la herramienta absorbe menos potencia de corte, pero si éste llega a ser menor que 90° la herramienta deja de trabajar a compresión, siendo nulo el rendimiento.

El ángulo de desprendimiento deberá ser mayor que 90° , pero lo menor posible dentro de dicha condición para no caer en los inconvenientes expuestos al hablar del ángulo β .

Es fácil de entender que el diseño de los ángulos característicos está condicionado por la circunstancia de que el metal duro (widia) con el que están fabricados los filos de las herramientas de corte, viene condicionado por la circunstancia fundamental de que dicho material soporta muy bien los esfuerzos de compresión y muy mal los de flexión. Además, la dilatación diferencial entre el acero de la herramienta y la widia de los filos (notablemente menor éste último) obliga a no perder nunca de vista

la imposibilidad de consecución de grandes diámetros con dicha técnica, con la que en contadas excepciones pueden perforarse pozos con un diámetro superior a seis pulgadas (152 milímetros). (Excepcionalmente la firma HUGHES ha puesto a punto un tipo de herramienta, "Blue Demon", serie SH-800, con la que puede llegar bastante bien hasta diámetros de 8,5" (216 milímetros).

A la hora de estimar el apoyo necesario sobre la barrena, han de considerarse de una manera acumulativa la suma de las longitudes de todos los filos cortantes en disposición de trabajo.

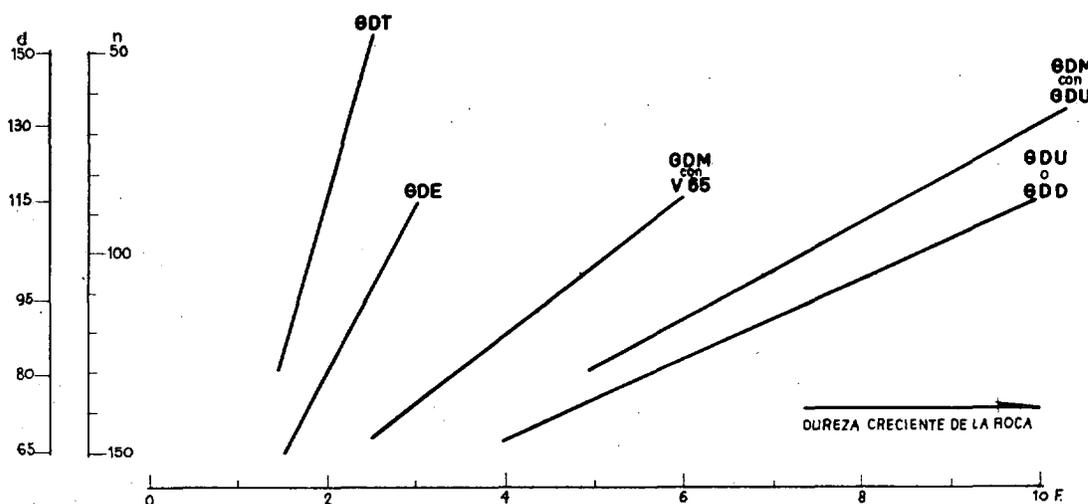


Fig. 3. — Selección de parámetros de perforación (a rotación) para las herramientas de inserción de widia.

en los diseños de favorecer al máximo la disipación de calor generado en el trabajo, al objeto de impedir la creación de tensiones internas que afectasen al rendimiento de la herramienta.

La elección de los adecuados parámetros de perforación (revoluciones por minuto y peso sobre barrena) ha de seleccionarse en virtud de cuanto hemos considerado hasta ahora, ya que existen algunas limitaciones al método que son importantísimas. Por ejemplo, la necesaria disipación del calor de que antes hablamos, nos obliga a reducir las revoluciones por minuto de una manera directamente proporcional al aumento de diámetro. Esto entraña naturalmente

Para facilitar la selección de parámetros adecuados de perforación al personal destacado a pie de tajo, adjuntamos en la figura 3 el procedimiento que nos ha dado excelentes resultados, y que está fundamentalmente tomado de la Fried Krupp G.M.B.-H. Widia-Fabrik.

Entramos en ordenadas con el diámetro a perforar, el cual nos condiciona automáticamente las revoluciones óptimas de perforación; después, en virtud del tipo de herramienta a utilizar, en la que interviene la experiencia de campo, encontramos mediante la intersección con su recta de operación característica, el valor en las abscisas en toneladas que nos define el peso a apoyar sobre dicha barrera.

TABLA I

Dureza	Hughes	Reed	Security	Litología
Blandas	OSC-3 OSC-1G OSC	YT-3 YT-1 YT	S-3 S-4 S-6	Formaciones sin consolidar. Evaporitas. Arenas, sal, anhidrita.
Medias	OWV OW OWC	YS-1 YS YM	M4N M4 M4L	Margas, pizarras, arenas consolidadas, etc. Calizas, pizarras, etc. Dolomitas, calizas abrasivas, areniscas, etc.
Duras	W7 W7R-2	YH YHW	H7 H7L	Areniscas, silíceas dolomitas compactas. Areniscas, silíceas compactas, cuarcitas.
Extremadamente duras	R-1 RG-1	YC	H9	Granito azul, rocas ígneas, etc.

Los diámetros más recomendables para perforar con dicha técnica son entre 2 7/8" y 5 7/8", pudiendo alcanzarse fácilmente profundidades superiores a los 200 m., estando todo ello estrechamente ligado a la capacidad de elevación y de empuje del equipo de perforar en cuestión.

Las características del terreno afectan mucho más, de manera que si se dispone de otras técnicas de perforación, éstas comienzan a dar mejores rendimientos para formaciones de dureza superior a las calizas compactas.

El avance de perforación o la velocidad de penetración *penetration rate* es inversamente proporcional a la dureza de la roca atravesada; de todas maneras, en una roca semidura pueden conseguirse avances medios de 8 a 12 metros/hora.

B) Perforación a rotación con barrenas de rodillos dentados (triconos).

Este tipo de barrena de perforación se halla estudiadísimo, quizá por ser el normalmente utilizado en las perforaciones petrolíferas; se ha llegado a matizar tanto en el diseño de estas herramientas que prácticamente puede decirse que existe para cada terreno una barrena adecuada; si a esto añadimos la circunstancia de que cada fabricante emplea su propia nomenclatura al definir cada tipo, el resultado es una abrumadora cantidad de siglas que desorientan al neófito.

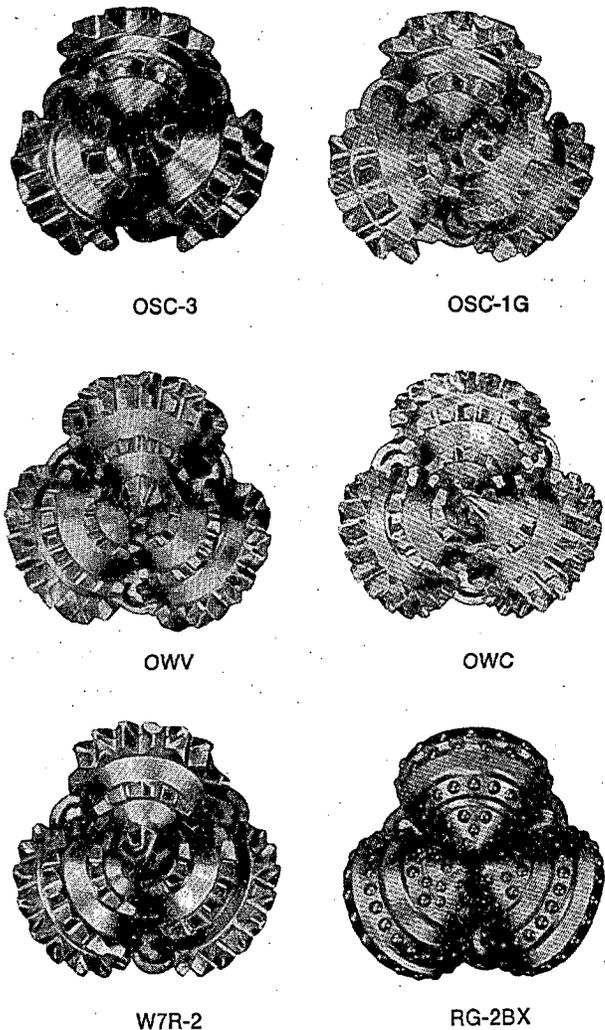


Figura 4.

Entre los fabricantes más conocidos podemos destacar a Hughes, Reed y Security, por lo que creemos conveniente adjuntar la tabla I de equivalencias de tipos de barrenas más fundamentales entre las gamas que dichas casas fabrican para facilitar su selección.

En dicha tabla nos referimos concretamente a los triconos convencionales, por ser los que estimamos deberán ser utilizados en trabajos de Obras Públicas.

Los triconos del tipo Jet, que conservan el mismo diseño que los anteriores en cuanto a características de corte, pero que varían en cuanto a disposición de las toberas de salida del lodo, con las que se consigue una mejor limpieza de fondo, y con ello, un mayor rendimiento; tienen otros inconvenientes, tales como requerir mucho mayores presiones de bombeo, por lo que aunque esta técnica da muy buenos resultados en prospecciones petrolíferas, donde se perfora a grandes profundidades, creemos restaría la necesaria movilidad a los equipos en nuestro caso concreto, haciéndola a nuestro juicio antieconómica.

Aunque su uso no se ha extendido todavía lo suficiente, merece destacarse las nuevas patentes en la construcción de diseños de triconos que se orientan fundamentalmente en innovaciones relativas a dar una mayor vida a los cojinetes. Estas son entre otras la "Heel Pac", en la que los cojinetes de los conos van protegidos con una empaquetadura especial en su tacón, y la "X Line", provista además de un ingenioso dispositivo autolubricante que funciona gracias a la presión de columna que actúa sobre el tricono; llamamos la atención del usuario sobre este punto, ya que los petroleros consiguen rendimientos en cuanto a horas totales de perforación con dichos triconos superiores en un 45 por 100 sobre los convencionales. Esto, sin duda, se debe al envejecimiento rápido que experimentan los rodillos a partir de un número determinado de horas de trabajo, pues, en cuanto aparecen pequeñas holguras las arenas se introducen en los rodamientos produciendo su destrucción.

Poco podemos decir en realidad sobre las características de corte de este tipo de barrenas, pues las numerosas publicaciones sobre ellas se proyectan preferentemente en dar al usuario parámetros de perforación destinados a darle la adecuada utilidad. Las pocas veces que hablan

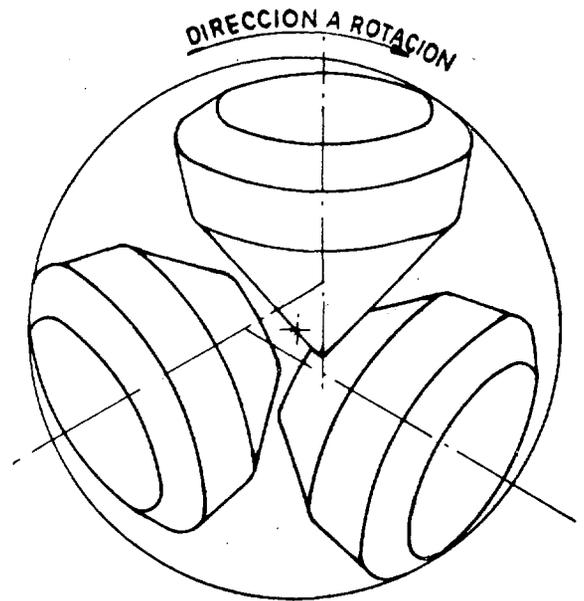


Fig. 5. — Disposición del off-set en los rodillos de un tricono para terrenos blandos.

sobre las características de diseño no pasan de ser consideraciones generales. Suponemos que la causa será debida a la competencia entre las casas fabricantes.

No obstante, citaremos dichas consideraciones, pues aunque incompletas nos han resultado de gran utilidad.

a) El espaciado de los dientes de la herramienta es tanto mayor cuanto más blando es el terreno a perforar.

b) La longitud de los dientes es tanto mayor cuanto más blando sea el terreno a perforar.

c) El "Off-set" o desfase de la alineación de los tres ejes de cada cono con relación al centro del círculo que representa la proyección del área que barre el tricono al girar, es tanto mayor cuanto más blando sea el terreno a perforar. Dicho "off-set" produce un efecto adicional de cizalladura que favorece extraordinariamente la penetración. No se diseña, sin embargo, cuando la barrena está destinada a perforar terrenos abrasivos.

El sentido del "off-set", en relación al giro de la barrena en el pozo, viene indicado en la figura 5.

d) La penetración se produce por aplastamiento, o más exactamente por punzonamiento.

Los ensayos en planta piloto han demostrado que cuando el peso que bascula sobre el diente que se clava en el terreno es mayor que la carga de rotura de la roca, se produce la rotura de ésta de una manera violenta, casi explosiva. Como ésta ocurre antes de que el diente se halle exactamente en posición vertical, resulta que el trabajo del mismo presenta más desgaste en el flanco de ataque que en el resistente. Por esta razón, en los diseños de barrenas para terrenos abrasivos el flanco de ataque de los dientes presenta un tratamiento es-

pecial con electrodo duro (hard-facing), destinado a compensar aquel fenómeno.

e) Cuando la barrena está pensada para soportar grandes pesos, lo que se produce al perforar terrenos duros y abrasivos, es frecuente que los dientes de la periferia de los conos terminen en forma de T, llegando incluso a agrupar parejas de dientes, lo que es de gran utilidad en la conservación del diámetro original de la herramienta; el tipo W 7 R, por ejemplo, presenta dicha particularidad.

TABLA II. — Selección del tipo adecuado de tricono en función de las características de usura que presenta el mismo recién extraído del pozo.

Condición del desgaste	Causas posibles	Recomendaciones en la próxima barrena
Excesivo desgaste de cojinetes.	Excesivas r.p.m. Excesivo tiempo de perforación. Excesivo peso sobre el tricono. Excesivo contenido de arena en el lodo. Barras de carga sin estabilizadores. Tipo tricono inadecuado.	Utilizar menos r.p.m. Reducir el tiempo de perforación. Reducir el peso sobre tricono. Eliminar el exceso de arena del lodo. Estabilizar las barras de carga. Utilizar el tipo inmediato más duro de barrena.
Excesivas roturas en los dientes.	Tipo de tricono inadecuado. Inadecuada "iniciación" de la perforación. Excesivo peso sobre el tricono.	Utilizar tipo inmediato de tricono más duro. Iniciar la perforación adecuadamente (1). Aligerar el peso sobre el tricono.
Desgaste descompensado de dientes.	Inadecuado tipo de tricono. Iniciación inadecuada de la perforación.	Elegir tricono de tipo inmediatamente más duro. Iniciar la perforación adecuadamente (1).
Excesivo desgaste de los dientes.	Excesivas r.p.m. impropio tipo del tricono. Tipo de tricono sin recubrimiento de metal duro.	Relantizar las r.p.m. Seleccionar tipo de dureza inmediatamente superior. Seleccionar tipo con recubrimiento duro.
Excesivo corte de las crestas de los dientes.	Tipo con doble recubrimiento duro. Insuficiente peso sobre el tricono.	Usar con recubrimiento sencillo. Aumentar el peso sobre el tricono.
Dientes picados y aplastados.	Excesivo peso sobre el tricono. Formación demasiado dura.	Reducir el tiempo de perforación. Seleccionar tricono de tipo más duro.
Erosión excesiva en dientes y conos.	Demasiado caudal de circulación. Excesiva arena en el lodo.	Reducir el caudal. Eliminar la arena o usar barrena de Jet.
Pérdida de diámetro original.	Inadecuado tipo de barrena. Excesivo tiempo de perforación.	Usar tipo más duro. Reducir el tiempo de perforación.
Estrías debido al agarrotamiento de los conos.	Excesivo peso sobre el tricono. Inadecuado tipo de tricono. Insuficiente caudal de lodo.	Reducir el peso sobre el tricono. Utilizar un tricono de tipo más blando. Aumentar el caudal de circulación.

(1) Para iniciar adecuadamente la perforación se debe dar al tricono las revoluciones por minuto elegidas (r.p.m.) antes de apoyar sobre el fondo, e ir cargando el peso sobre el tricono paulatinamente, hasta llegar al valor de régimen, para dar tiempo a que el nuevo tricono se fabrique su adecuada huella en el fondo del pozo, que no tiene por qué coincidir con la impronta de la anterior.

La limitación fundamental en la fabricación de los triconos es la falta de espacio para incluir la totalidad de los componentes que intervienen, condicionados naturalmente por el tamaño de pozo a perforar. El adecuado dimensionamiento de los pies donde se insertan los conos, el tamaño y número de los cojinetes de rodadura, el necesario espesor de los conos para soportar los esfuerzos necesarios para la perforación y, sobre todo, el posicionado exacto de los dientes de cada cono, de manera que el barrio del área del fondo del pozo sea total, condicionan que la limitación fundamental de dicho tipo de herramientas sea hacia los diámetros pequeños.

Por esta razón no es frecuente encontrar en el mercado triconos de diámetros menores que 4 3/4", mientras que hacia los grandes diámetros existen triconos hasta de 30", recurriéndose para diámetros mayores al sistema de policonos con rodillos recambiables, con los que en España hemos perforado hasta diámetros de 2 metros en sondeos destinados a captación de aguas.

Es evidente que la técnica de perforación con triconos se complementa muy bien con la de aletas de inserción de widia, ya descritas, y con los martillos de fondo, pues su limitación es, por el contrario, hacia los grandes diámetros, como ya vimos.

Nosotros recomendamos la utilización de los triconos para diámetros a partir de 5 5/8", pues en tamaños menores el desgaste de la herramienta se producen fundamentalmente en los cojinetes, lo que puede traducirse en la pérdida de alguno de los conos, con las consiguientes perturbaciones que ello implica.

Para la selección del tipo de barrena adecuado no cabe duda que se requiere experiencia. No obstante, existen tablas que, basándose en el estado en que salió del pozo la barrena anterior, dan recomendaciones para la selección de la próxima barrena, supuestos constantes o similares las características de la formación.

De todas las tablas consultadas al respecto adjuntamos la de Bentson, por parecernos francamente atinada. (Ver tabla II.).

Los parámetros adecuados de perforación para estas herramientas permiten un amplio margen de utilidad claramente definido por las casas fabricantes, orientándose la tendencia general a reducir las revoluciones por minuto y

aumentar el peso sobre la barrena a tenor de diseño de herramienta para terrenos de dureza creciente.

Los márgenes de oscilación de dichos parámetros son los siguientes:

TIPO	Peso sobre tricono (1)		Revoluciones por minuto	
	MAX.	MIN.	MAX.	MIN.
OSC-3	2,7	1,4	250	100
OSC-1	3,2	1,4	180	60
OSC	3,2	1,4	180	60
OWV	3,6	1,8	90	40
OWC	4,1	1,8	90	40
W7	4,5	2,3	70	35
W7R-2	4,5	2,3	70	35

(1) La cifra en peso sobre tricono se refiere concretamente a toneladas de apoyo específicas, referidas a cada pulgada-diámetro.

Es evidente que los equipos pequeños usados en obras públicas difícilmente podrán alcanzar valores tan elevados de peso sobre barrena.

Quizá por esta razón hayamos encontrado en nuestros trabajos avances (penetración-rate) ligeramente menor con los triconos que con las trialetas.

La ventaja fundamental de este tipo de herramienta es quizá la posibilidad de perforar cualquier tipo de terreno con ellas, desde el más blando hasta el más duro, desde el más compacto al más suelto, tanto de que sea plástico como que no lo sea, pues existen diseños para todos los casos, como lo demuestra claramente la circunstancia de que siga siendo la herramienta de perforación fundamental en las prospecciones petrolíferas.

C) Perforación a percusión con martillos de fondo mediante el uso de tallantes como herramientas percusoras.

El fundamento del procedimiento es por impacto mecánico de accionamiento neumático que produce la fragmentación de la roca en el fondo del sondeo. La rotación asociada, como

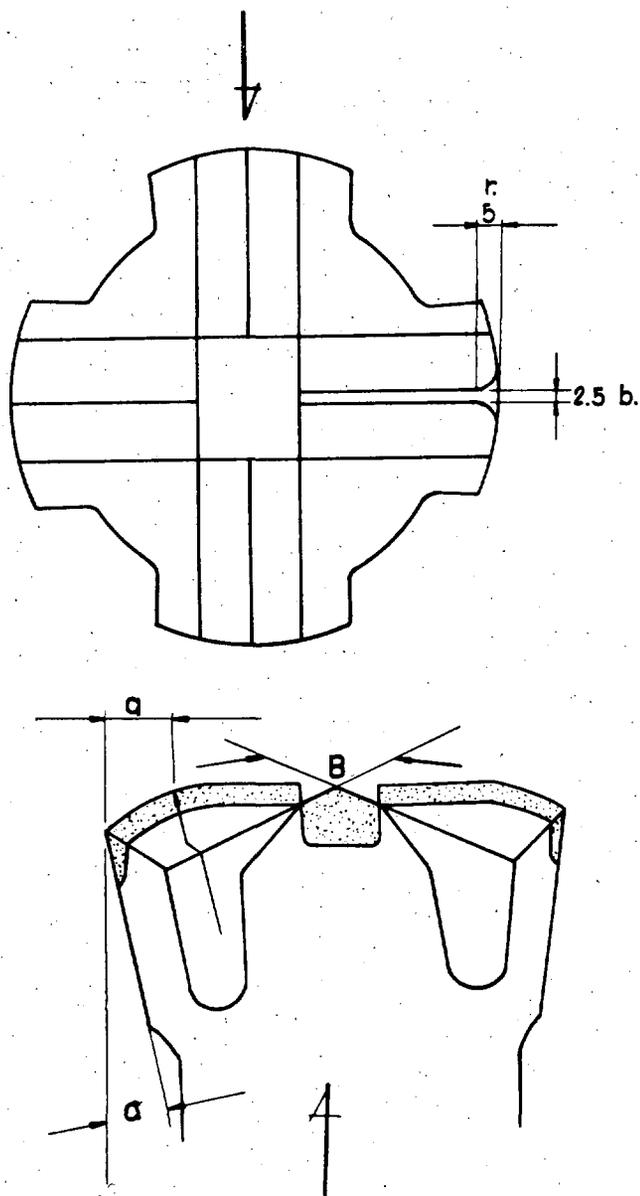


Fig. 6. — Aspecto de un tallante de percusión.

ya vimos, no tiene otra misión que la de variar la posición del tallante, de manera que el impacto sea más efectivo al repartirse en la mínima área posible, que es la correspondiente al filo del material duro.

Los tallantes tienen forma de doble cilindro en la que la parte más ancha, que es la inferior, corresponde al frente de perforación, en él van engastadas las pastillas de widia en forma de cruz, X o puntas (según los fabricantes). En los dos primeros casos, uno de los brazos de la X es continuo o no, según esté diseñado para terrenos muy duros o medianamente duros.

Las pastillas de widia poseen las siguientes características.

El ángulo de incidencia α de este tipo de herramienta es de 3° , prácticamente constante para todos los fabricantes.

El ángulo de filo cortante β es también bastante constante, oscilando muy poco sobre 115° , por encima para terrenos muy duros (hasta 120°) y por debajo mediante duros (hasta 105°).

Otras características importantes son: el ancho del filo cortante b (que suele ser de 2 a 3 décimas de milímetro) y el radio del mismo (que suele ser diez veces el ancho b) (fig. 6).

La perforación con este tipo de herramientas, a la hora de seleccionar los parámetros adecuados, no posee los grados de libertad de las técnicas anteriormente descritas.

Accionados, generalmente, por aire comprimido, el martillo de fondo trabaja adecuadamente una vez que se sobrepasan la presión de régimen y el caudal mínimo necesario, que a su vez está predeterminado para producir la necesaria limpieza del pozo.

Los motores de rotación y avance (que regula el peso sobre el tallante) van en superficie y son regulables a mano; como la fuente suele ser también a base de aire comprimido, en la práctica se usa un compresor único para todas las funciones, lo que nos enfrenta ya con la primera limitación seria de esta técnica, que es *la profundidad* a alcanzar al ser directamente proporcional a ésta, tanto la pérdida de carga del flujo de aire como la energía demandada por la rotación. Por esta razón, en los martillos modernos se tiende a accionar hidráulicamente los motores de avance y rotación.

Sin embargo, como esta técnica está pensada para romper la formación mediante golpeo por choque gracias al impulso mecánico que el aire comprimido imprime al martillo, *la limitación fundamental* se pone de manifiesto *frente a terrenos blandos*, fácilmente deformables, en los que la referida deformación es el solo efecto conseguido, *no produciéndose avance alguno al no romperse la formación*.

Por esta causa, este procedimiento se complementa perfectamente en pequeños diámetros con el descrito de las multialetas de widia, ya que aquéllas cubren perfectamente la efectividad de la perforación en terrenos blandos, para los que los tallantes se muestran ineficaces, mientras que las dificultades de penetrabili-

dad. de aquellos. en los terrenos muy duros se ven francamente superados por la técnica que estamos describiendo.

Los diámetros que hemos utilizado son: 65, 80 y 100 mm. (por ser los más apropiados en

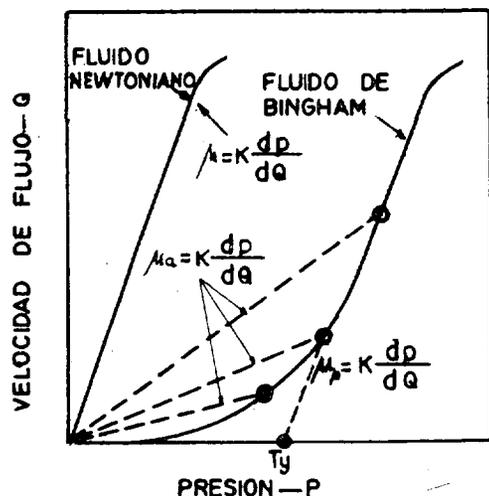


Fig. 7. — Diferencias reológicas entre los fluidos newtonianos (agua) y los Bingham (lodo).

Obras Públicas, ya que los grandes "Hammer Drill" precisan de grandes presiones y caudales de régimen), para los que la presión de régimen es en todos los casos de 5 Kg./cm.², siempre que no aparezca agua, y los caudales mínimos de aire necesarios son, respectivamente: 2 400, 2 800 y 3 600 l./minuto. En el caso de que se encuentre agua durante la perforación es necesario vencer la presión hidrostática de la misma, debiendo, por tanto, recurrirse a compresores que den mayor presión inicial hasta limpiar el taladro y conseguir la presión de régimen. Deberán para ello también utilizarse válvulas que impidan la entrada de agua en la barrena. (En el próximo apartado se verá, por la tabla VI, que aquí existe también otra limitación hacia los grandes diámetros por el volumen necesario de limpieza, que es función de la sección del espacio anular y del avance de la perforación.)

La profundidad alcanzable con esta técnica podría ser teóricamente muy grande, pero dadas las dificultades de limpieza y pérdidas de carga del aire comprimido, consideramos como útil la inferior a 150 m., es decir, francamente menor que con las otras técnicas, pero el ritmo de penetración puede ser, sin embargo, mayor que con los otros sistemas, sobre todo en terrenos

muy duros, ya que fácilmente pueden conseguirse valores medios de 12 a 15 m. a la hora en terrenos medianamente duros.

Fluidos empleados. Condiciones de limpieza.

Hasta ahora, hemos supuesto en todos los casos que el tercer parámetro de perforación, es decir, las necesarias condiciones de limpieza del pozo, eran suficientes en todos los casos.

Para saber cuales son las condiciones de limpieza, hemos de tratar primero someramente las diferencias entre los tres fluidos utilizados: lodo, agua y aire. La diferencia fundamental del último, con relación a los otros, es que se trata de un fluido compresible, requiriendo un tratamiento matemático complejo; sin embargo los otros, lodo y agua, poseen propiedades más sencillas, por lo que los trataremos en primer lugar comparativamente.

El agua se asemeja a un fluido newtoniano, mientras que el lodo se comporta como un fluido tixotrópico o de Bingham. La diferencia fundamental entre ambos se observa claramente en el diagrama presión-velocidad de flujo (P-Q) representado en la figura 7, que relaciona los diferentes valores de viscosidad, que para los fluidos newtonianos basta con la expresión

$$\mu = K \frac{dP}{dQ};$$

mientras que para los de Bingham es preciso matizar si se trata de la viscosidad aparente μ_a o plástica μ_p en los que la primera de ellas es el valor de la viscosidad medida como si se tratase de un fluido newtoniano, de ahí su apelativo de aparente, ya que carece de sentido real. La viscosidad plástica μ_p tiene un sentido físico muy claro y representa la pendiente del tramo recto de la curva de los fluidos tipo Bingham, la cual, extrapolada, corta al eje de las presiones, según un cierto valor T_y denominado "yield point", con dimensiones de una presión, que representa la diferencia reológica fundamental entre el lodo y el agua.

Como no nos interesa introducirnos excesivamente en los diferentes tratamientos de flujo de ambos tipos de fluido, indicaremos exclusivamente que existe un tipo de aparato (viscosímetro FANN) que lee directamente todos los parámetros citados, en centipoises, las viscosi-

dades y en libras/100 pies cuadrados, el "yield point", que intervienen en las ecuaciones de pérdida de carga del sistema de circulación en el pozo, cuando nos hallamos en condiciones de régimen laminar:

En condiciones estáticas sucede algo semejante, ya que si bien la velocidad de decantación de partículas es en el seno del lodo menor que en el agua (a igualdad de densidades de ambos fluidos) dicha velocidad constante en el

TABLA IV

	Fluidos newtonianos (agua)	Fluidos de Bingham (lodo)
Pérdida de carga por circulación ...	$P = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \mu V L}{S}$	$P = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \mu_p V \cdot L + \frac{T_y \cdot L}{225 D}}{S}$

en la que:

- P = Presión en libras por pulgada cuadrada.
- μ = Viscosidad newtoniana en centipoises.
- μ_p = Viscosidad plástica en centipoises.
- V = Velocidad del fluido en pies al segundo.
- L = Longitud del sistema de circulación en pies.
- D = Diámetro equivalente del conducto en pulgadas.
- S = Area del conducto en pulgadas cuadradas.
- T_y = "Yield point" en libras por 100 pies cuadrados.

(Conservamos a sabiendas las unidades inglesas, pues todos los calculadores hidráulicos de las casas fabricantes de triconos utilizan dichas unidades).

Se aprecia a primera vista que el lodo precisa de una presión adicional para hacerle fluir, lo que lleva implícito un consumo adicional de potencia motriz. En la realidad esto no es comparable, puesto que el "yield point" tiene la propiedad de dar al lodo una mejor cualidad de extracción de detritus que el agua, de manera que en definitiva el lodo produce la limpieza adecuada del pozo con menor caudal que el agua en igualdad de condiciones.

En definitiva, y basándose en multitud de datos prácticos, la velocidad mínima en el espacio anular (en la sección más desfavorable) que asegura la limpieza adecuada del pozo es: para el agua, 120 pies/minuto; para el lodo 90-100 pies/minuto, dependiente este último valor, entre otras cosas, del "yield point". En la tabla V, damos los caudales mínimos, tanto con lodo, como con agua, de limpieza para diámetros variables de pozo y varillaje.

agua, es decreciente en función del tiempo en el seno del lodo, llegando incluso a anularse. Esto es debido al aumento del grado de gel del lodo en función del tiempo motivado por el establecimiento de enlaces de tipo Van der Waals entre las moléculas de montmorillonita (arcilla fundamental de las bentonitas) y el agua propiedad conocida con el nombre de tixotropía, que produce una cierta cohesión de carácter reversible, pues desaparece nuevamente, bajo condiciones dinámicas.

Además, el lodo produce en el pozo una extraordinaria estabilidad adicional difícilmente estimable salvo por experiencia, pero real. En las formaciones permeables, la columna de lodo del pozo, se comporta como un filtro prensa formándose sobre la pared un entarquinado sellante (cake) sobre cuyas características mecánicas se puede influir fácilmente tratando adecuadamente el lodo.

En resumen, si consideramos que al realizar una perforación variamos el estado de tensiones del terreno creando un cierto desequilibrio en el medio, recomendamos al neófito la utilización de lodos en lugar de otro fluido cualquiera por la sola razón de que el lodo retardará o compensará el necesario reajuste de equilibrio de la formación atravesada, en el sentido de que los clásicos problemas de caídas en las paredes, aumento gradual de la sección del pozo, etc., tardarán mucho más tiempo en manifestarse que si la perforación se ha realizado con otro fluido cualquiera indiferente al medio.

TABLA V.— Caudal mínimo necesario de limpieza de pozo con lodo y agua, en función del diámetro del sondeo y del varillaje empleado.

Diámetro del pozo en pulgadas	Diámetro del varillaje en pulgadas	Caudal mínimo necesario para limpiar el pozo con agua		Caudal mínimo necesario para limpiar el pozo con lodo	
		G P M Galones por minuto	Litros/minuto	G P M Galones por minuto	Litros/minuto
4 1/4	2 3/8	62	234	52	197
	2 7/8	53	200	43	163
4 5/8	2 3/8	75	284	63	238
	2 7/8	66	250	54	204
5	2 3/8	94	356	78	295
	2 7/8	84	318	70	265
	3 1/2	63	238	52	197
5 5/8	2 3/8	125	473	104	394
	2 7/8	116	439	96	363
	3 1/2	94	356	78	295
6 3/4	2 3/8	190	719	162	613
	2 7/8	184	696	154	583
	3 1/2	162	613	135	511
	4 1/2	124	468	103	390
8 1/2	2 3/8	324	1 226	270	1 021
	2 7/8	313	1 185	262	991
	3 1/2	292	1 105	243	920
	4 1/2	254	962	212	802
	5 1/2	204	772	170	643
9 5/8	2 7/8	414	1 568	346	1 309
	3 1/2	391	1 479	326	1 234
	4 1/2	352	1 331	294	1 112
	5 1/2	303	1 146	253	957
	6 5/8	236	893	197	746
12 1/4	3 1/2	669	2 535	557	2 108
	4 1/2	629	2 380	525	1 986
	5 1/2	583	2 210	486	1 835
	6 5/8	518	1 962	430	1 627

Con el lodo, la gama posible de parámetros, bajo la que podemos trabajar, según nuestros deseos, es mucho mayor que para otros casos, de lo que resulta, en definitiva, que prácticamente existe el lodo preciso para la solución de cada problema concreto.

No debe pensarse, sin embargo, en ningún caso, que los lodos constituyen la piedra filosofal de la perforación, ya que poseen numerosos inconvenientes entre los que sobresale el hecho de que la perforación es más lenta en todos los casos con el uso de lodo que con agua, siendo la de penetración más rápida en igualdad de condiciones restantes la de la perforación con aire.

Sin olvidar que el lodo da más seguridad que cualquier otro fluido, queremos dejar patente que nuestro criterio sitúa al aire como el fluido del porvenir en el sentido de conseguir penetraciones mucho más rápidas con él. Lo que pasa sencillamente es que nuestro estado actual de conocimientos no ha podido todavía dominar los numerosos problemas que con dicha técnica se presentan.

En el caso del aire como fluido de perforación no basta una velocidad mínima dada, como condición de limpieza, en la sección anular más desfavorable, ya que el peso de la columna a limpiar es proporcional en un momento dado al ritmo de penetración inmediatamente ante-

rior, que nos define la cantidad adicional de detritus existente en el espacio anular del pozo en un momento dado. Como el aire es un fluido compresible, es evidente que el caudal necesario para limpieza se incrementará proporcionalmente al ritmo de penetración y a la profundidad.

El tratamiento matemático ha sido perfectamente resuelto por R. R. Angel, quien ha llegado a una solución muy cómoda para el usuario que a continuación transcribimos (en las mismas unidades) mediante la fórmula:

$$Q_a = Q_o + ND,$$

en la que:

- Q_a = caudal real necesario de aire para limpiar el pozo en pies cúbicos al minuto.
- Q_o = caudal *standard* equivalente a una velocidad mínima anular de 3 000 pies/minuto (en pies cúbicos al minuto) (ver tabla VI).
- D = profundidad del sondeo en miles de pies.
- N = factor de avance definido en la tabla VI.

extraordinariamente al aparecer agua o sencillamente humedad en las formaciones atravesadas, ya que los detritus se apelotonan en el espacio anular por encima de la barrena, siendo necesario recurrir al empleo de espumantes para rebajarla en virtud de un mecanismo semejante al procedimiento de flotación usado en minería. Dicha técnica extraordinariamente delicada y engorrosa requiere gran experiencia, ya que el tratamiento a seguir ha de modificarse sobre la marcha en función de la respuesta del pozo.

Afortunadamente, en el campo de Obras Públicas los problemas no son severos, ya que a 150 m. de profundidad sólo en casos extremos aumenta la presión de trabajo por encima de los 7 Kg./cm.², es decir, dentro de la capacidad de los compresores corrientes. Generalmente, basta unos minutos de circulación manteniendo la rotación levantando y descendiendo suavemente el varillaje sin apoyarlo en el fondo para limpiar el agujero y poder reanudar nuevamente la perforación.

TABLA VI.— Condición mínima de limpieza de pozo. Caudal de aire necesario, según la fórmula: $Q_a : Q_o + ND$.

Diámetro del pozo (pulgadas)	Diámetro exterior del varillaje (pulgadas)	Q_o pies ³ /minuto	N			
			Avance de 0 pie/h.	Avance de 30 pie/h.	Avance de 60 pie/h.	Avance de 90 pie/h.
8 3/4	5	827	49,0	72,7	93,2	112,0
	4 1/2	903	46,0	67,8	87,3	105,0
	3 1/2	1 032	40,0	60,0	77,3	93,7
7 7/8	4 1/2	670	44,7	65,0	82,7	98,3
	3 1/2	798	39,2	56,7	72,5	86,9
6 1/4	3 1/2	430	37,0	51,5	63,6	74,7
	2 7/8	494	32,8	46,0	57,3	67,7
4 3/4	2 7/8	229	31,6	41,3	49,5	56,5
	2 3/8	271	27,8	37,2	44,8	51,6

con lo que podemos fácilmente hallar el caudal mínimo de limpieza de pozo. Con ello hemos obtenido excelentes resultados.

La presión de trabajo que se equilibra espontáneamente en función de los obstáculos en el recorrido del aire es otro asunto, pues crece

Conclusiones.

A la vista de las limitaciones que hemos puesto de relieve en las diferentes técnicas consideradas, hacia los grandes diámetros para las herramientas de widia, en general, como a la in-

versa para las barrenas de rodillo, es evidente que ellas se complementan perfectamente entre sí, como viene indicado en el gráfico de la figura 8, en el que en abscisas indicamos la profundidad del pozo en metros, y en ordenadas, el diámetro del mismo en pulgadas.

Destaca en él la extensa área de utilización de las herramientas de rodillos dentados, debido a que hemos incluido en la prolongación de las abscisas las zonas de utilización en la investigación de hidrocarburos que se prolongan actualmente hasta profundidades de 8 000 m. y que serán pronto rebasados cuando sea realidad el magno proyecto Mohole; además, en ordenadas hemos también incluido la zona de utilización de grandes diámetros, usuales en captación de agua, de las que en Renania frecuentemente superan los 3 m. de diámetro, estando en curso un nuevo proyecto para Moravia de pozos de 6 m. de diámetro. gracias a la técnica de circulación inversa.

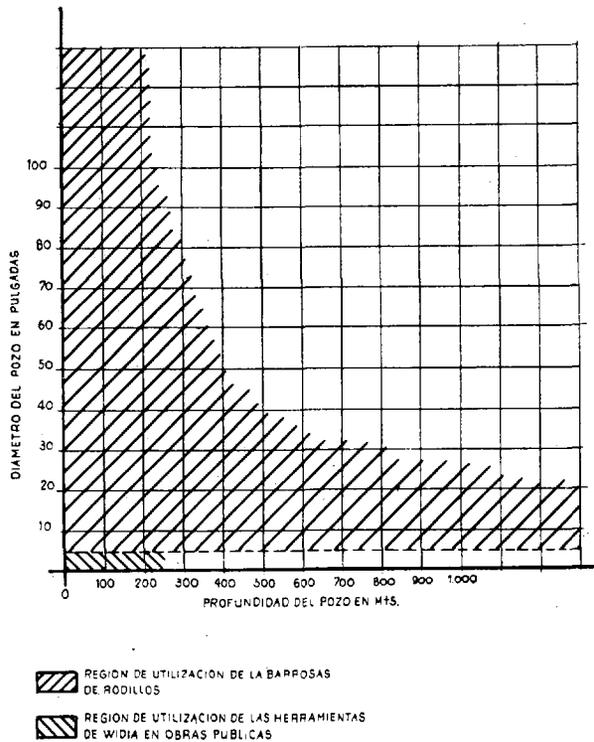


Fig. 8. — Región de utilización de las diferentes técnicas consideradas.

Es evidente que la zona de trabajo para las perforaciones rápidas en Obras Públicas, objeto de este opúsculo, se halla próxima al origen

de coordenadas de dichas figuras, ya que apenas rebasan unos pocos centenares de metros de profundidad, siempre en diámetros pequeños.

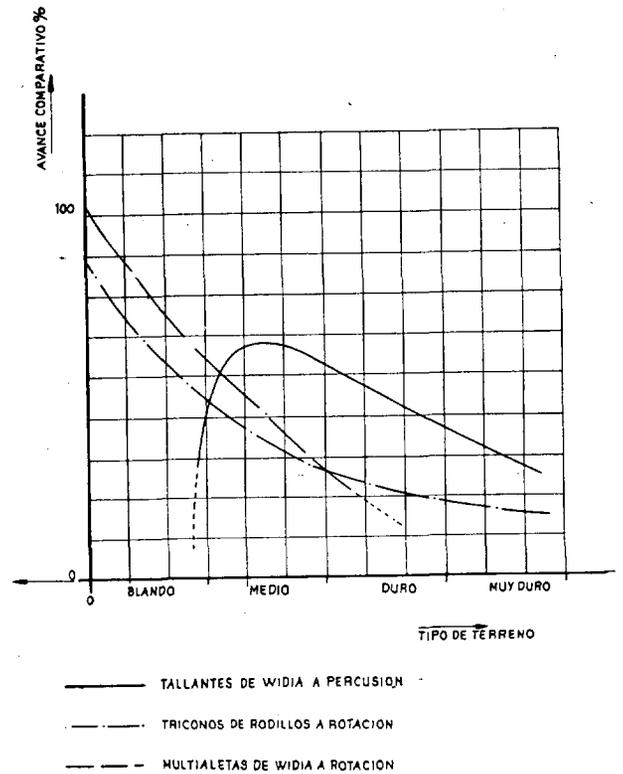


Fig. 9. — Ritmo de penetración comparativo con las diferentes técnicas consideradas

Es en esta región donde se solapan las técnicas estudiadas, para las que recomendamos triconos para diámetros de pozo superiores a 5 pulgadas, y herramientas de widia para valores inferiores.

Dentro de dichos valores bajos de diámetros de sondeo las técnicas de rotación y percusión con herramientas de widia, descritas, se complementan también en el sentido de que las primeras producen bajas penetraciones y grandes desgastes de la herramienta en los terrenos duros, mientras que las últimas, por el contrario, no sirven para terrenos blandos por embotarse el tallante. El paso de una técnica a la otra parece realizarse para terrenos de dureza media del tipo de las calizas compactas no abrasivas.

Para definir más claramente la elección de una u otra técnica, damos en la figura 9 los avances comparativos que nosotros hemos en-

contrado con las diferentes técnicas en los trabajos de campo.

La circunstancia de que los ritmos de penetración para las barrenas de rodillos sean menores que con otras técnicas (concretamente las trialetas de widia a rotación), viene fundamentalmente motivadas al no poderse alcanzar los valores de peso sobre barrena, para la que dichas herramientas se hallan proyectadas, dada la pequeña potencia de las máquinas utilizadas en Obras Públicas. Los valores reales de pene-

tración en las perforaciones petrolíferas son, por lo menos, tan elevadas como los correspondientes a las herramientas de widia a rotación.

Como recomendación final creemos interesante para el futuro usuario de las técnicas descritas que sería conveniente estandarizar los diámetros a perforar; en el sentido de poder utilizar sobre el mismo sondeo, en caso necesario, cualquiera de los procedimientos antes descritos sacando así el máximo partido al carácter complementario de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

- BENTSON, H. G.: "Rock-bit design, selection and evaluation. New tools and procedures for better drilling operations", by *Oil and Gas Journal*. Tulsa.
- BO GISNER: "Tungsten carbide for drill steel bits. Manual on rock blasting", Vol. II, by *Atlas Copco Aktiebolag*. Stockholm, 1958.
- COLE, F. W., and MOORE, P. L.: "Drilling operations manual", by *Petroleum Publishing Company*. Oklahoma, 1965.
- CUNNINGHAM, R. A.: "Laboratory studies of the effect of rotary speed on rock-bit performance". Div. of Prod. A.P.I. Dallas, 1960.
- ECKEL, J. R.: "How mud properties affect drilling rate", Making Hole, by *Oil and Gas Journal*. Tulsa.
- GALLE, E. M., and WOODS, H. B.: "How to calculate bit weight and rotary speed for lowest cost drilling", by *Oil and Gas Journal*. Tulsa, 1960.
- GATLIN, C.: "Petroleum Engineering; Drilling and well completions". *Prentice-Hall Inc.*, 2nd Printing, U.S.A., 1964.
- "Rotary Drilling rate. New tools and procedures for better drilling operations", by *Oil and Gas Journal*. Tulsa.
- HUGHES TOOL COMPANY: "Hydraulics in rotary drillings". Bull. n° 1-B. May 1957.
- JANELID, I.: "Rock drilling methods and their field of use. Manual on rock blasting", Vol. I, by *Atlas Copco Aktiebolag*. Stockholm, 1952.
- KIESTER, D.T.: "Air and percusión drilling in Ireland". *Institute of Petroleum Review*. August 1963.
- KING, G. R.: "Effect of fluid environment on rock-bit bearing performance". A. A. of oilwell Drilling Contractors. Oklahoma, 1959.
- LAUTMANN, K. F.: "Tungsten carbide drill steels for hammer rock drills. Manual on rock blasting", Vol. III, by *Atlas Copco Aktiebolag*. Stockholm, 1960.
- PAYNE, L. L.: "Present and future trends in rotary drilling technology". *Journal of the Institute of Petroleum*, volumen 50, núm. 488. August 1964.
- RUIZ JIMENEZ, J.: "Estudio sobre herramientas de perforación". Sección de Métodos de Agromán E.C.S.A. Madrid, 1966.
- SCOVIL MURRAY, A., and MACKAY, P.: "Water still poses tough problem in drilling with air. New tools and procedures for better drilling operations", by *Oil and Gas Journal*. Tulsa.