

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Petróleo

Hidráulica de la Perforación en el Bloque "X"  
en el nor - oeste del Perú

T E S I S   D E   G R A D O

PEDRO HECTOR PORTUGAL MENDOZA

LIMA - PERU

1 9 6 4

HIDRAULICA DE LA PERFORACION EN EL BLOQUE "X"  
DEL NOROESTE DEL PERU

- I - INTRODUCCION
- II - REQUERIMIENTOS DE LA HIDRAULICA EN LA PERFORACION.
- III - FACTORES QUE AFECTAN A LA HIDRAULICA.
  - A) Lodo de Perforación.
    - a- Efectos del Peso
      - 1- Caída de presión y hph. en la columna de perforación.
      - 2- Regimen relativo de penetración.
    - b- Efectos de la Viscosidad.
      - 1- Sobre la remoción de cortes.
      - 2- Sobre la presión diferencial.
    - c- Efectos del filtrado.
    - d- Efectos del contenido de Diesel.
  - B) Presión de Descarga de las bombas de lodo.
  - C) Limitación de Presión en Superficie.
  - D) Regimen de Circulación.
  - E) Velocidad de Retorno por el Espacio Anular.
  - F) Velocidad en las Aberturas de la Broca.
  - G) HPH a la Broca.
- IV - METODO ANALITICO PARA DETERMINAR EL MAXIMO HPH. NECESARIO PARA LIMPIAR EL FONDO, DEBAJO LA BROCA.
- V - ASPECTO ECONOMICO.
- VI - CONCLUSIONES.
- VII - BIBLIOGRAFIA.

\* \* \*

## I - INTRODUCCION

Las nuevas técnicas de la perforación requieren una mejor comprensión para eficientes utilizaciones de cada una de las diferentes operaciones que se realizan al perforar un pozo. Dentro de éstos, la planificación de un programa hidráulico se considera como la más importante. Numerosas pruebas de campo y de laboratorio se han efectuado para la evaluación de cada una de las características que componen la circulación del fluido dentro del sistema hidráulico de un equipo de perforación, así como se han formulado varias teorías para la mejor utilización de la energía disponible dentro del sistema hidráulico. Pruebas y teorías que ayuden a resolver las diferentes variaciones de los problemas que se presentan al perforar un pozo.

El presente trabajo constituye la planificación de un programa hidráulico aplicable a un bloque determinado, basado, en una de esas teorías porque, el equipo disponible, las características del sistema hidráulico y de las formaciones penetradas del bloque donde va a ser usado, creemos es el más eficiente.

Trabajo que ha sido posible realizar gracias a la ayuda de mis superiores y directivos de la Empresa Petrolera Fiscal, a quienes expreso mi más profundo agradecimiento así como a los compañeros de trabajo que día a día están laborando para formar una Empresa Petrolera netamente Nacional.

A las autoridades y profesores de la Facultad de Petróleo de la Universidad Nacional de Ingenieros, agradezco por la formación profesio

nal e intelectual que imprimieron en mf, y a su abnegada misi3n de formar profesionales capaces de dirigir industrias nacionales, que ya se ven florecer.

Finalmente agradezco a los dibujantes y empleados de la Empresa por su colaboraci3n para hacer realidad este trabajo.

## II - REQUERIMIENTOS DE LA HIDRAULICA EN LA PERFORACION.

---

Una perforación rotaria emplea dos herramientas básicas para poder penetrar en las diferentes formaciones de la tierra y éstas son :

- a - Broca, y
- b - La circulación de un fluido especial.

Todos los demás elementos y operaciones del equipo de perforación son dirigidas a operar y promover una apropiada eficiencia en el funcionamiento de estas dos herramientas. Si una es más esencial que la otra, ésta es la circulación del fluido o, pues en ciertas formaciones blandas la circulación del fluido puede por si sola abrir hueco, pero en ningún caso la broca por sí misma puede abrir hoyo.

El fluido especial en la industria del petróleo en perforación, se denomina comunmente lodo de perforación, la circulación de este lodo no destruye la roca, se limita a limpiar los cortes producidos por dientes de la broca, por consiguiente una eficiente circulación del lodo cumple con:

- a) Remover los cortes del fondo del hueco, debajo la broca, lo más rápidamente posible a fin de evitar la reperforación de cortes.
- b) Limpiar los conos y dientes de la broca de modo que se minimice las probabilidades de empaquetamiento.
- c) Llevar los cortes lo más lejos posible de la broca a fin de que no interfieran con el desgaste de la misma.

Entonces, bajo un grupo de condiciones de perforación (peso,

velocidad, de rotación, propiedades del lodo, tipo de formación penetrada), el régimen de penetración de una broca, será mucho mayor si los cortes producidos por la broca se remueven antes de ser perforados, en paqueteros o intervengan en su desgaste, y sean llevados lo más rápidamente posible a la superficie.

En las brocas tipo "Yet", en uso actual en la perforación rotaria, las corrientes de lodo van dirigidas hacia el fondo del pozo y hacen saltar los cortes producidos. La eficacia de tal acción va a depender de la cantidad de fuerza disponible en ese punto (en la broca). Si la fuerza disponible en ese punto es la suficiente, la turbulencia creada alrededor de la broca mantendrá los conos y dientes completamente limpios. La cantidad de fuerza disponible en la broca en términos hidráulicos está dada en valores de caballos de fuerza hidráulicos (hph).

Por consiguiente, la hidráulica como aplicada al sistema de circulación de un equipo de perforación tiende a maximizar el hph, sobre la broca en condiciones de circulación máximas obtenidos de la capacidad real de la bomba. Puesto que el régimen de penetración varía linealmente con el hph. de la bomba y el hph a la broca se incrementa proporcionalmente al incremento del hph. de la bomba, figuras 1 y 2, entonces el régimen de penetración varía linealmente con el incremento del hph. a la broca.

De modo que, bajo un grupo de condiciones de perforación y características del equipo hidráulico, el régimen de penetración será máximo cuando se obtienen máximos hph. como caída de presión en la broca en condiciones de máximos hph. permisibles de la bomba como

### III - FACTORES QUE AFECTAN A LA HIDRAULICA DE LA PERFORACION

---

#### A - Lodo de Perforación:

En la perforación de pozos por petróleo empleando el sistema rotario, se requiere la circulación del lodo a fin de remover los cortes de terreno y sacarlos fuera del pozo, a fin de que éste permanezca siempre limpio. Este lodo, impulsado por la bomba, va a través de las conexiones de superficie, interior de la tubería de perforación, y a través de las aberturas de la broca, hasta el fondo del pozo, retornando por el espacio anular, hasta la superficie, donde los cortes del terreno se eliminan, empleando cedazos cernideros y el lodo retorna a las cantinas teniendo siempre un ciclo continuo, como se observa en la figura 3.

Las propiedades físicas del lodo, afectan indirectamente al régimen de penetración de un determinado pozo, pues ellas influyen en las variaciones de la cantidad de hidráulica disponibles en la broca que se desarrolla en el sistema, por consiguiente la valuación de cada una de ellas se considera en función del incremento o decrecimiento del régimen de penetración.

Las propiedades del lodo que tienen efectos sobre el régimen de penetración son:

- a- P e s o
- b- V i s c o s i d a d
- c- F i l t r a d o
- d- C o n t e n i d o d e d i e s e l .

a- Efectos del Peso: - El peso del lodo es una propiedad que afecta directamente a: 1) La caída de presión y hph en la columna de per

foración, y 2) Al regimen relativo de perforación.

1) La caída de presión y hph. en la Columna de Perforación. -

Se ha observado que cuando se incrementa el peso del lodo, la caída de presión y hph. se incrementan, para un mismo sistema hidráulico, este incremento está en proporción directa al incremento del peso y al volumen del regimen de circulación del lodo. En la figura 5 podemos observar que cuando se incrementa el peso del lodo de 9 ppg. a 19 ppg. la caída de presión y por consiguiente las pérdidas de hph. se incrementan en dos veces y cuando se aumenta el peso del lodo de 10 ppg. a 18 ppg. este incremento es de 1.8 veces. Al mismo tiempo la caída de presión y hph. es mayor conforme se incrementa el volumen de circulación de 200 gpm. a 700 gpm.

Por consiguiente, si la fuerza disponible en el equipo, es consumida en la columna de perforación por incrementos del peso del lodo y del volumen de circulación, no va a quedar nada disponible para la caída de presión a través de las aberturas de la broca y lógicamente causará decrecimientos en el regimen de penetración.

Sin embargo podemos decir, que pesos de 9.5 a 11 ppg. y regimenes de circulación de 300 a 400 gpm. determina acertables incrementos en la caída de presión en el sistema hidráulico de nuestro equipo.

En la perforación de 7 pozos, en el bloque "X", como se observa de las tablas número 1 hasta la tabla 7, los pesos se han mantenido entre 10 ppg. y 11 ppg. con un volumen de circulación de 350 - gpm. Estos valores tanto de peso como de volumen de circulación no influyen mayormente en la caída de presión a través del siste-



ma y podemos comenzar a hacer todos nuestros cálculos sobre la base de un peso 10 ppg. y de un volumen de circulación de 350 gpm. para una máxima profundidad de 6,500 pies.

## 2) Regimen Relativo de Perforación. -

En pozos que requieren pesos superiores a 10 ppg. el regimen relativo de perforación bajo condiciones de presión y hp de superficie, es reducida en proporción inversa al incremento del peso del lodo. El efecto es que la presión y el hp. de superficie se reduce conforme se incrementa el peso del lodo. Por ejemplo en un hueco de 7-7/8" en óptimas con condiciones de circulación de 400 gpm., para un lodo de 14 ppg. a 2,000 psi y 470 hp., como condiciones en superficie, puede ser la misma que cuando se circulan 400 gpm. con un lodo de peso 10 ppg. a 1,400 psi. y 330 hp. como condiciones en superficie.

Los diámetros de las aberturas de la broca también se vuelven grandes cuando hay incrementos del peso del lodo en condiciones de presión y hp. de superficie. Esta condición puede producirse cuando incrementos del peso del lodo se requieren y es necesario reducciones en el hph. para mantener óptimas condiciones de circulación.

El segundo efecto del peso del lodo y que tiene relación con la perforabilidad de las rocas es la Presión Hidrostática.

La presión hidrostática ejercida por la columna de lodo para una profundidad particular es función del peso del lodo (Fig. 6). Esta presión ejerce una compresión sobre el fondo del pozo, la cantidad de compresión va a depender de la cantidad de presión diferencial existen te entre la presión hidrostática y la presión de la formación. Por con-

siguiente el efecto de la presión hidrostática sobre la perforabilidad de una roca va a depender de :

- a- El volumen poroso de la roca, esto limita la cantidad de compactación que puede ocurrir.
- b- La permeabilidad de la roca, que determina la medida del tiempo necesario para igualizar la presión sobre la superficie de la roca que se está fracturando, si hay una presión diferencial inicial.
- c- Peso del lodo, que es el que determina la cantidad de presión hidrostática ejercida contra la formación.
- d- Presión del fluido dentro de los poros de la formación, la cual va a determinar la presión efectiva diferencial.

Podemos concluir que las mejores condiciones de perforabilidad de una roca determinada serán cuando no hay presión diferencial existente através de la superficie de la roca que se está fracturando. Si la presión de confinamiento es igual a la presión hidrostática tampoco habrá ningún efecto sobre el regimen de penetración. Pero si hay presiones diferenciales grandes, el grado de compactación será mucho mayor si la presión hidrostática es más grande y por consiguiente el regimen de penetración disminuirá. Se ha llegado a comprobar que la presión hidrostática es la principal causante del comportamiento plástico de las formaciones que están siendo penetradas bajo condiciones de altas presiones hidrostáticas, que el carácter quebradizo que evidencian cuando son perforadas a presión atmosférica. Por eso es necesario - siempre mantener bajos los pesos de lodo.

En la planificación de los programas hidráulicos más atención se da a las pérdidas de presión creadas por la fricción, cuando el lodo de perforación fluye a través de la columna de perforación. Y muy poca atención ha sido dada a la pérdida de presión en el espacio anular causado por el lodo cuando retorna a superficie.

Esta falta de atención es debido indudablemente a que en las perforaciones actuales con diámetros de 7-7/8" ó 8-5/8", a profundidades de 6,000 a 8,000 pies, con relativas bajas densidades de lodos, la pérdida de presión en el anillo es pequeña comparada con la pérdida de presión en el diámetro interno de la tubería, para un mismo flujo. Pero - donde la perforación se profundiza con diámetros de hueco reducidos de 6-3/4" o menos y con lodos pesados, se hace evidente que las velocidades de retorno son más grandes y las pérdidas de presión creadas en el espacio anular pueden causar problemas.

Bajo condiciones estáticas, la presión ejercida por la columna de lodo es determinada solamente por la densidad del lodo. Esta presión se considera como la presión estática del pozo. En una circulación normal del lodo, una presión por fricción es creada en el espacio anular, la cual incrementa la presión existente producida por la columna de lodo. Entonces podemos describir esta presión sintética, como la presión ejercida contra las paredes del pozo mientras se realiza la circulación del lodo y puede ser expresada como la suma de la presión estática y la caída de presión en el anillo a una profundidad determinada.

$$PK = P_s + P_f.$$

donde :

$P_k$  presión cinética a la profundidad investigada, psi.

$P_s$  — presión estática a la profundidad investigada, psi.

$P_f$  — presión de fricción creada en el anillo por la circulación de lodo,

Para poder calcular el valor de  $P_f$ , primero se debe determinar el tipo de flujo de lodo: laminar o turbulento. A bajar velocidades el flujo es laminar, conforme la velocidad se incrementa el valor límite inferior es alcanzado y el flujo se vuelve turbulento. Si en embargo comenzando de este valor crítico inferior hay un rango transicional donde el tipo de flujo no puede ser predicho con certeza. Existen diversas formas de calcular la presión de fricción creada en el anillo, tanto para flujos laminares como para flujos turbulentos, No entramos más en detalles de esta presión, por cuanto en la perforación del bloque 'X', los diámetros de los pozos y la profundidad hacen que no sea necesario prestarle atención, pero hacemos mención de ella por que descuidos de ella en la planificación de un programa hidráulico a grandes profundidades y con huecos de diámetro reducido, pueden causar fácilmente reventones y pérdidas de circulación o pegamientos de tubería.

b - Efectos de la Viscosidad: - Otra de las propiedades que tiene significativo efecto sobre el regimen de penetración es la viscosidad, sus efectos se pueden apreciar por dos manifestaciones sobre: 1- la remoción de cortes, y 2- la presión diferencial.

1 - Efectos sobre la remoción de cortes. - Observaciones hechas en el campo nos permiten apreciar que solamente cambios de agua con lodo, como fluidos de perforación, decrecen el regimen de perforación en un

25 por ciento. Esto, es un efecto directo de la viscosidad. Pues incrementos continuos de ella dan decrecimientos en el regimen de perforación. Este efecto depende de la cantidad de sólidos en suspensión en el lodo, pues la adición de sólidos coloidales al lodo tiende a disminuir el regimen de penetración, no así los sólidos neutros que tienen un efecto menor. Por consiguiente podemos decir que existe un porcentaje de sólidos que incrementa el regimen de penetración para una viscosidad dada.

Cualquier flujo de un fluido Newtoniano puede ser turbulento y el límite de velocidad es una tubería de diámetro pequeño es cero, habiendo cerca de él una capa de flujo laminar, figura 7. La velocidad a la distancia X sería proporcional al promedio de velocidades del sistema de flujo e inversamente proporcional a la viscosidad. La acción de un fluido no Newtoniano, como lo es en realidad un lodo de perforación, puede seguir el mismo desarrollo. Asumiendo que el fondo es el límite de velocidades, está visto que un incremento en la viscosidad puede tener el efecto de reducir la velocidad del fluido adyacente al fondo. Esta reducción de la velocidad reduce la efectividad de la remoción de cortes.

Por consiguiente, cualquier incremento de la viscosidad del lodo va a disminuir el regimen de penetración. La razón fundamental de esto puede ser explicada por dos razones lógicas: a- la remoción de cortes tiende a ser inversamente proporcional a la viscosidad, y b- a mayor viscosidad la penetración de lodo en las pequeñas fracturas generadas por la broca sobre la superficie que está cortando es mucho más lenta que si fuera agua.

Podemos concluir entonces que, desde el punto de vista del

regimen de penetraci3n de flúidos con viscosidades menores del agua de berá ser empleados, pero como en la práctica esto es difícil o imposible de conseguir, debe tratarse de todas maneras de que los aditivos que se agregan al lodo, deben de incrementar lo menos posible la viscosidad del lodo.

2 - Efectos sobre la presi3n diferencial. - La presi3n diferencial como sabemos es desarrollada por la presi3n hidrostática que generalmente es mayor que la presi3n de la formaci3n. Conforme el fracturamiento de la roca está ocurriendo, el regimen al cual los cortes producidos pueden ser removidos del fondo, va a depender sobre cuán rápidamente esta presi3n diferencial se igualiza. La transmisi3n de presi3n en este caso va a depender sobre el regimen al cual el lodo va a penetrar en las fracturas que la broca va generando sobre la superficie de corte. Este regimen de penetraci3n depende de la viscosidad. Altas viscosidades retardará el ingreso del lodo en las fracturas y mayor será el tiempo de igualizaci3n, por lo tanto mayor será el tiempo que la presi3n diferencial exista a través de la superficie de la roca. Este efecto retardará el regimen de penetraci3n y, incrementará la tendencia a la penetraci3n de cortes.

Si observamos las tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 del comportamiento del lodo en 7 pozos perforados en el bloque "X" a profundidades de 6,000 a 6,500 pies, vemos que la viscosidad promedio de trabajo no disminuye de 60 segundos. Y que las viscosidades máximas alcanzadas, se comienzan a incrementar en cada pozo a partir de las formaciones Rica, Ñuro y Quemada.

La viscosidad mínima de trabajo alcanzada de 60 segundos, se debe exclusivamente al hecho de que en la perforación de pozos por la Empresa Petrolera Fiscal se da mayor preferencia a la reducción de los regímenes de filtrado con sacrificio de la viscosidad, no obstante podemos decir que los regímenes de pérdida de filtrado de trabajo no disminuyen nunca de 4 ó 5 cc. , en 30 minutos, con una presión de 100 psi. , por que tampoco pasan de 6.2 cc.

En cuanto a lo segundo, podemos observar que en comparación con la perforación de la zona de Hualtaca donde se perforan las formaciones Talara Superior y Medio, no se encuentran problemas de lodo en cuanto a la viscosidad, de ahí que suponemos que estas formaciones son limpias y que a partir de las formaciones Rica, hasta Quemada presentan en sus formaciones sulfatos o carbonatos de calcio, los cuales van a contaminar el lodo. También podemos mencionar que estos yacimientos se encuentran en forma de mantos y lentes de modo que sólo han afectado el lodo de unos pozos y a otros no.

c - Efectos del Filtrado. - El regimen de pérdida de filtrado incrementa el regimen de penetración, esto se puede observar en el campo fácilmente, puesto que a altos regímenes de pérdida de filtrado, las viscosidades serán bajas. Por consiguiente los aditivos que se agregan al lodo para disminuir el regimen de filtrado incrementan las viscosidades, luego el regimen de penetración disminuye.

d - Efectos del Contenido de diesel. - En la prácticas actuales de la perforación rotaria, se acostumbra a usar lodos emulsionados, usando para ello diesel industrial. De las observaciones en el campo podemos -

mencionar algunas de las ventajas derivadas de su uso sobre los lodos convencionales y que tiene influencia directa con la cantidad de hidráulica des arrollada en el sistema :

- 1) Reducen la fricción
- 2) Buena estabilidad a grandes presiones y temperaturas.
- 3) Buena tolerancia a las contaminaciones.
- 4) Facil de mantenimiento y control de viscosidad, filtrado y peso. Y como ventajas generales podemos mencionar: 1- excelente propiedades de lubricación, de toda la columna de perforación y en especial de los rodamientos de las brocas, reducen el torque, de modo que las lecturas en los indicadores de peso, indiquen un control más real de los pesos aplicados a la broca.

Las observaciones de campo nos indican que estas ventajas se acentúan cuando se están perforando lutitas pegajosas, pues el humedecimiento de los dientes de la broca con el aceite, evita que las lutitas se adhieran a los conos y dientes de la broca y se evita así, el enpaquetamiento de la broca. Pero también se ha observado que al igual que en lodos convencionales hay formaciones en que el contenido de diesel tiende a decrecer la formación instantánea de cortes por los dientes de la broca, las observaciones nos permiten apreciar que este efecto es mucho mayor con lodos emulsionados cuando se perforan arenas.

Pruebas de laboratorio han sido hechas por el suscrito a fin de determinar las variaciones de las características de un lodo convencional con incrementos de porcentajes de lodo. Tres muestras de lodo fueron preparadas con diferentes características a fin de ver las variacio-



nes sobre todas las propiedades del lodo.

Muestra N°. 1. -   Peso           9.5 ppg.  
                           Viscosidad 11.0 cp.  
                           Filtrado     21.8 cc.  
                           Ph             7.5

Muestra N°. 2. -   Peso           13.2 ppg.  
                           Viscosidad 31.0 cp.  
                           Filtrado     31.5 cc.  
                           Ph             7.5

Muestra N°. 3. -   Peso           10.2 ppg.  
                           Viscosidad  8.0 cp.  
                           Filtrado     14.9 cc.  
                           Ph             9.0

A cada una de estas muestras se les fue añadiendo sucesivamente, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 por ciento de diesel. Las dos primeras muestras son lodos neutros y la segunda tiene un valor de Ph. Las medidas fueron hechas usando, un viscosímetro Stermer, una Filtro-Prensa, una Balanza y papel Phydrien, todas ellas de manufactura Baroid.

El diesel que se empleó tiene las siguientes características de gravedad específica de 26 a 28 API, punto de inflamación de 190° F. y un número de anilina entre 152 y 172 grados F.

Las pruebas en cada una de las muestras están graficadas en las figuras 8, 9 y 10, respectivamente. De estas figuras podemos deducir lo siguiente en cuanto a las variaciones de las propiedades del lodo convencional cuando se vuelve emulsionado.

Peso: De un modo general el incremento del porcentaje de diesel en

lodo convencional disminuye proporcionalmente el peso, como se observa en las figuras 8 y 9. Sin embargo podemos observar en la figura 10 que esta disminución es menor cuando el lodo convencional tiene un valor de Ph de 9 o más.

Viscosidad. - La viscosidad se incrementa con el incremento del porcentaje de diesel en el lodo. De la figura 8, podemos ver que este incremento es mucho mayor cuando el porcentaje de diesel fue de 10 por ciento y posteriores incrementos afectan menos el valor de la viscosidad. En la figura 9, ocurre un fenómeno especial, al agregar 2 por ciento al diesel, la viscosidad disminuye, pero en realidad lo que disminuye es el torque puesto que se trata de un lodo pesado, de allí que los sucesivos incrementos de diesel den viscosidades caprichosas, puesto que están afectadas por el torque del aparato. La figura 10, nos indica que incrementos del diesel en el lodo pueden tener influencia mínima en la viscosidad cuando el lodo tiene valores de Ph de 9 o mayores, hasta un contenido de diesel del 10 por ciento.

Filtrado. - En lodos emulsionados el contenido de diesel disminuye el régimen de filtrado, pero esta disminución es de acuerdo a las pruebas realizadas mucho más grande cuando se incrementa el diesel en 4 o 6 por ciento, más allá de estos porcentajes la disminución del régimen de filtrado es menor. Sin embargo de las figuras 8 y 9 podemos ver que la disminución es menor cuando el lodo es neutro.

El mayor filtrado de la figura 9, aparentemente está en relación con el alto contenido de sólidos de esa muestra.

Ph. - Observando la figura 10, podemos concluir que el Ph disminuye conforme se incrementa el porcentaje de diesel.

De los resultados de las pruebas de laboratorio de los contenidos de diesel en un lodo convencional de base agua-bentonita y de las de campo, podemos decir que cuando se usan lodos emulsionados, para convertir el lodo convencional en emulsionado, es necesario seguir el siguiente procedimiento:

Primero hay que disminuir la tensión superficial con la adición de un detergente o jabón, o con cualquiera de los productos que venden las diferentes compañías como el Drilling Detergent, para esto, luego agregar un porcentaje de diesel digamos 8 a 10 por ciento, luego emplear un dispersante como la soda cástica, el mismo tiempo que subirá el Ph. a los valores adecuados, o en su defecto utilizar el tanato de sodio en soluciones concentradas, agregar nuevamente porcentajes de diesel de acuerdo a las necesidades, y emplear un estabilizador, como son algunos de los productos CMC. Este procedimiento hay que seguirlo cada vez que sea necesario, y tratar de que los porcentajes cuando se perforan arenas o areniscas sean de 4 a 6 por ciento y de 6 a 10 por ciento cuando se están penetrando formaciones de lutitas, para evitar grandes descensos en el peso y Ph. del lodo, al mismo tiempo de obtener buenos regímenes de pérdida de filtrado y mantener viscosidades aceptables, con valores de Ph. siempre mayores de 9.

POZO PB-258

Fecha días	Peso lb./p <sup>3</sup> .	Vis. g. g	V. Măx. S. g.	Arena %	Profund. Pies.	Bomba			Swivel	Obs.
						Val.	Cab.	Liner		
14	77	55	60	4.	1025					
15	80	55	68	3.	1565				-	circuldo. 714
16	83	50	65	2.5	2102	1	1	1	-	vălvulas.
17	82	52	60	4.	2391					
18	83	65	70	3.	2810					
19	82	60	70	4.	3184					
20	81	60	80	3.	3491				-	se quedõ 1 rol
21	80	50	60	2.	3680					
22	80	55	70	3.	3957					
23	79	50	80	2.5	4220				-	circuldo. 3733
24	81	55	65	2.	4588					
25	83	55	70	2.	4800					
26	80	55	65	2.5	3781					
27	84	60	110	2.5	5037	1	1			
28	83	60	90	3.0	5257				1	
29	83	60	120	3.0	5466					
30	83	55	60	1.5	5700					
31	84	55	80	2.5	5879					
1	85	60	80	1.5	6039					
2	83	70	75	2.5	6199					
3	84	65	65	2.	6275		1		-	quedõ 1 bola.
4	83	60	75	3.	6413					
5	83	70	72	2.0	6500				-	rompiõ

P O Z O P B 1 2 5 5

Fecha dias	Peso lb/pie <sup>3</sup>	Vis. S .	V.Max. Sg.	Arena %	Profund. Pies	Bomba Val. Cab.Lin.	Swivel	Obs.
19	75	45	45	1.5	213			
20	75	65	70	1.5	879			
21	76	70	82	3.5	1611			Rim.
22	77	65	110	3.0	1975		1	
23	78	55	62	3.5	2241			Cir.219
24	79	55	70	2.5	2779		1	Cir.2301
25	83	65	78	2.5	3108			
26	83	70	90	2.5	3352			ir.329
27	84	56	95	1.5	3629		1	Pesca
28	83	65	90	3.0	3677	1		
29	84	60	70	2.5	3711			
30	83	60	70	2.0	3842			Rimando.
31	82	65	70	2.0	3985			
1	82	60	70	3.0	4274			Cir.405
2	82	65	70	2.0	4631			
3	83	58	90	2.0	4952			Cir.432
4	84	60	75	2.0	5199			
5	84	65	85	3.0	5445			
6	84	55	74	3.0	5680			
7	83	65	95	3.0	5862			
8	83	55	60	2.5	6044			Cir.564
9	83	70	95	2.0	6109	1	1	Cir.562
10	84	55		2.0	6170			

P O Z O 2 5 9

echa dias	Peso Vis.		V. Max.		Arena Profund. Pies	Bomba Swivel		Observ.
	lb/pie	Sg.	Sg.	%		Val.	Cab.Li.	
<b>11</b>	75	55	75	2.0	483			
12	75	55	70	2.5	1171			
13	75	55	65	3.0	1800			
14	78	55	60	2.5	2103			Rodamien.
15	77	55	60	3.0	2461			Cir.
16	77	65	130	2.0	3056		1	
17	77	60	68	3.5	3502			
18	76	60	67	2.5	3974			
19	78	60	70	3.0	4271			
20	78	60	75	2.5	4693	1	1	
21	82	78	90	3.0	5024			Cir.
22	82	65	78	2.5	5310			
23	82	60	75	2.5	5610			Cir.
24	82	65	80	2.5	5848			
25	82	65	125	3.0	6070			
26	82	65	80	2.0	6130			

P O Z O P B 2 6 1

Fecha	Peso	Vis.	V. Max.	Arena	Profund.	Bomba	Swivel	Observ.
dias	lb/pie <sup>3</sup>	Sg	g.	%	Pies	Val.Cab.Li		
30	73	75	75	3.0	472			
1	73	94	94	4.0	1416			
2	77	65	80	3.5	2057			Circulando
3	76	76	75	2.5	2277			
4	80	60	75	3.0	2763			1
5	80	53	75	2.5	3321			Se rompió cardán
	81	55	75	2.5	3591	1	1	
7	82	60	67	2.5	3706			
8	80	55	67	3.0	3771			
9	81	56	65	2.0	4223			Perd.Circul. lenta 4260
10	80	75	110	2.0	4583			
11	79	65	80	2.5	4901	1	1	
12	80	70	80	2.0	5139			Circulando
13	81	65	75	2.0	5359	2	1	1
14	81	60	75	1.5	5604			Circulando
15	82	62	68	1.5	5787			
16	82	65	75	2.0	5927	2		irculando
17	80	65	72	1.5	6158			
18	80	65	80	2.0	6339	2		
19	81	60	80	2.0	6475			
20	81	65	75	2.0	6500			

P O Z O B 262

Fecha	Peso	3 <sup>o</sup> Vis.	V. Max.	Arena	Profund.	Bomba	Swl.	Observ.
dias	lb/pie	Sg.	Sg.	%	Pies	Val. Cab. Li		
25	72	55	65	2.0	1210			Cardan
26	77	60	75	2.0	1801			Cir.
27	80	65	122	2.5	2116			
28	79	70	120	3.0	2742			
29	80	70	130	2.0	3167			Cardan.
30	80	60	70	3.5	3553			
31	79	75	90	3.0	3668	1	1	
1	79	60	75	2.5	4038			
2	80	65	75	2.5	4388		1 1 1	<b>Cir.</b>
3	80	75	120	2.0	4630			Cir.
4	80	65	120	2.0	<del>4934</del>			Cardan.
5	80	60	95	2.0	5052		1	Cir.
6	83	70	100	2.0	5331			
7	83	70	85	2.	5542			Cir.
8	83	55	70	2.5	5735			Cir.
9	83	60	65	2.0	5923		1 1	Cir.
10	82	70	95	2.0	6144			
11	83	65	80	2.0	6323			Cir.
12	83	80	94	2.0	6456			
13	83	85	80	2.0	6504		2	



O Z O B 263

Fecha dias	Peso Lb/pie <sup>3</sup>	Vis. Sg.	Vis.Max. Sg.	Arena %	Profund. Pies	Bomba Val.Cab.Li	Swl.	Observ.
16	78	60	60	3.0	402			
17	79	68	82	2.0	1128			
18	78	65	75	3.0	1780			
19	79	60	65	4.0	2183		1	Perd.Cir.
30	78	68	75	2.0	2668			Perd.Cir.
1	78	65	95	3.5	3106			
2	78	62	90	3.0	3335		1	Rimando
3	79	60	79	2.0	3723			Rimando
4	79	65	75	2.0	4208			Rodam.
5	80	60	70	3.0	4504			
6	80	60	70	3.0	4831			
7	80	60	75	2.0	5530			
8	80	60	70	2.0	5439	1		Cir.
9	80	65	85	2.0	5688		1 1 1	
10	80	60	75	2.0	5974			
11	81	60	85	2.0	6183		1	
12	80	60	90	2.0	6385		1	
13	80	65	95	3.0	6500		2	Cir.

P O Z O P B 264

Fecha dias	Peso lb/pie <sup>3</sup>	Vis. Sg.	Vis.Max. Sg.	Arena %	rofund. Pies	Bomba Val.Cab.Li	Swl.	Observ.
20	75	55	65		540			
21	75	50	60		1270			
22	75	60	67		1995		1	
23	79	65	90		2518			
24	79	65	75		2918			
26	79	60	60		3331			
27	79	55	58		3494			
28	79	55	75		3802			
29	80	65	68		4092			
30	79	60	65		4476	1	1 1	
31	80	65	85		4670			Cir.
2	79	70	85		4935	1		
3	78	75	85		5328	2		
4	78	65	68		5529			
5	78	65	90		5746	3		
6	78	65	70		5966	1		
7	80	68	90		6127			
8	80	70	75		6257	1		
9	83	85	105		6397	1		
10	80	90	110		6411	1		

T A B L A 8

DISTRIBUCION DE LAS FORMACIONES

Pozo	Verdum	P.B.A.T.	T.Medio	Rica	Nuro	Quemada	Patria Salina
255	130	1155	2405	2830		3950	6170
258	150	1055	2470	2690	4000	4220	6500
259		1130	2310	2705	3450	3680	6130
261	140	1250	1400	2780	3900	4100	6500
262		970	2180	2590	3810	3695	6500
263		1150	2300	2650	3650	3850	6500
264		800	2050	2450	3650	3850	6411

P.B.A.T. - Pozo Brecha, Areniscas Talara.

### B. - Presi3n de Descarga de las Bombas:

Para un eficiente empleo de las bombas de lodo de un equipo de perforaci3n, es necesario tener en cuenta lo siguiente: a) Una adecuada idea de la utilizaci3n de las bombas. - b) Las p3rdidas de presi3n en el sistema hidr3ulico.

a) Adecuada utilizaci3n de las bombas. - Como sabemos las bombas de lodo sirven para impulsar el lodo a trav3s del sistema hidr3ulico. Por consiguiente una de las primeras consideraciones que se deben tener en cuenta al formular un programa hidr3ulico son los caballos de fuerza disponibles para la bomba. Una bomba de 600 hp. no puede rendir m3s de lo que sus motores le suministran; un motor calificado con 150 hp. cuando nuevo, despu3s de un uso prolongado puede rendir la mitad o quiz3s la tercera parte de su potencia. Esto hace necesario la investigaci3n previa de la capacidad real de los motores de las bombas, as3 como la calificaci3n de las diferentes camisas que pueden ser usadas por la bomba.

Los diferentes lodos que se usan en perforaci3n, se eligen sin tener en cuenta los efectos que pueden causar sobre las piezas m3viles de las bombas. Si bien es cierto el efecto sobre ellos cuando se usa lodos emulsionados es peque1o, comparado con los beneficios que se obtienen de su uso, continuas reparaciones de la bomba, pueden llegar a ser costosas en t3rminos de repuestos, de modo que cuando se usa lodos emulsionados se debe tener en cuenta lo siguiente:

1) Las arcillas y el diesel son buenos lubricantes de las piezas m3viles de una bomba.

- 2) Las soluciones cáusticas con los valores de Ph. usados en perforación, no tienen ningún efecto sobre la duración de las piezas de una bomba.
- 3) El material fino y resistente, como son las arenas finas, tienden a acortar la vida de los pistones y a rayar las camisas de las bombas.
- 4) Todo material grueso, sólido y granular como el empleado en las pérdidas de circulación, tiende a acortar la vida de las válvulas de una bomba.
- 5) El diesel empleado en la preparación de lodos emulsionados, debe tener un punto de anilina superior a 152 grados F., pues aceites con menos de 150°F. tienden a disminuir la vida de los cauchos de las empaquetaduras, de los pistones y de las válvulas. Este diesel debe ser un producto de destilación primaria.

Por otro lado las dificultades que se van a encontrar cuando se usa una bomba al perforar un pozo, está en relación directa con los incrementos de la presión de trabajo de superficie, con el contenido de arena y el contenido de diesel.

Las nuevas técnicas de perforación requieren el uso de altas presiones de superficie y aun hasta ciertos porcentajes de arena en los lodos para conseguir incrementar el regimen de penetración y el uso de lodos emulsionados. Esto hace que se tenga siempre presente el uso de repuestos con materiales resistentes.

Toda vez que se haga uso de una bomba, debe hacerse uso de las especificaciones que dan los fabricantes para los diferentes tipos de bombas, así como para los motores.

Para el desarrollo de nuestro programa hidráulico, nuestro equipo hidráulico cuenta con una bomba C-350 = National, cuyas características están dadas en la tabla 1, equipada con 4 motores de combustión interna a diesel, General Motors de 150 hp. cada uno; estos motores tienen un uso de 2 a 4 años en conjunto, nosotros consideramos que en las condiciones actuales de trabajo esos motores pueden rendir como máximo de 350 a 400 hp. en grupo, y con un regimen de trabajo máximo de 300 hp. Las características de trabajo de la bomba con 325 hp. como máximo están tabuladas en la Tabla 2.

Tabla 1. - Máxima carrera por minuto 60  
Máximo hp. requerido 600

<u>Diámetro de camisas Pulg.</u>	<u>Presiones psi.</u>	<u>Volúmenes gpm.</u>
5	2,865	295
5-1/4	2,405	330
5-1/2	2,170	365
5-3/4	1,965	405
6	1,790	435
6-1/4	1,640	480
6-1/2	1,510	525
6-3/4	1,390	570
7	1,290	615

Tabla 2. - Máxima carrera por minuto 60  
máximo hp. requerido 325

<u>Diámetro de camisas Pulg.</u>	<u>Presiones psi</u>	<u>Volumen gpm.</u>
5	1,888	295
5-1/4	1,690	330
5-1/2	1,524	365

5-3/4"	1,375	405
6"	1,280	435
6-1/4"	1,160	480
6-1/2"	1,061	525
6-3/4"	977	570
7"	906	615

b) Pérdidas de Presión: - Las presiones de lodo que siendo descargadas sobre el sistema hidráulico tiene un carácter complejo. Esto es el resultado de la interacción del movimiento del pistón y de las características del sistema hidráulico a la cual el lodo está siendo enviado, la figura 11 nos muestra los lugares donde hay pérdidas de presión en el sistema hidráulico de un equipo de perforación rotaria. Un buen entendimiento de este sistema puede mejorar las condiciones de trabajo y vida del equipo hidráulico.

La caída de presión a través de las conexiones de superficie, diámetro interno de la columna, broca y retorno por el espacio anular depende de:

- a) Diámetros y longitudes de la tubería y botellas.
- b) Régimen de circulación.
- c) Peso, contenido de diesel y viscosidad del lodo.
- d) Tipo de broca.
- e) Espacio anular.
- f) Rotación de la columna

Todos estos factores deben considerarse en conjunto cuando se calcula la pérdida de presión en el sistema. Existen varios gráficos

y tablas confeccionadas por las diferentes compañías especializadas en la materia, que por lo general son aceptables para el cálculo de caídas de presiones en el sistema, para flujos turbulentos. Sin embargo muchos problemas pueden solucionarse de un entendimiento general del sistema hidráulico.

Una curva típica de pérdida de presión se muestra en la figura 12, y puede ser fácilmente dibujada por el cálculo de un sólo punto (a), a un flujo (spm), y a una profundidad (pies), dadas.

La aplicación de dos simples leyes de la hidráulica nos pueden ayudar a completar la curva.

- a - La caída de presión en la curva es cero cuando no hay circulación.
- b Las pérdidas de presión son proporcionales al cuadrado del regi de men circulación.

De modo, que la curva de un sistema de pérdidas de presión por fricción es una parábola.

$$\text{psi} = \text{constante} (\text{spm})^2.$$

La constante es fácilmente obtenida de un simple cálculo del punto ya descrito (a). Por ejemplo si tenemos 1,180 psi como perdida de presión en el sistema, cuando la bomba está operando con camisa de 5-3/4" y 18" de carrera a 55 gpm. El valor de la constante será:

$$\text{Constante} = \frac{\text{psi.}}{(\text{spm})^2} = \frac{1,180 \text{ psi.}}{55 \times 55} = 0.39$$

Si la velocidad de la bomba aumenta a 60 spm. (punto b de la figura 12). La pérdida de presión para ese punto será  $0.39 (60)^2$ . -



1,400 psi. Puntos adicionales pueden ser calculados para completar la curva. Luego podemos concluir que en un sistema hidráulico particular la pérdida de presión va a incrementarse con el cuadrado del régimen de circulación dentro de ese sistema.

Es interesante notar el efecto sobre la potencia. La fuerza desarrollada es proporcional a la presión y al régimen de circulación, de modo que el hp. se incrementará con el cubo del régimen de circulación a través del sistema. Por consiguiente el incremento de la fuerza por el cambio de velocidad de 55 a 60 carreras por minuto es igual a  $\frac{(60)^3}{55^3} = 1.29$ . O sea 29 por ciento más de potencia a 60 spm. que a 55 spm, devolviendo en cambio 19 por ciento en pérdida de presión desarrollada por un incremento en el régimen de circulación de 9.8 por ciento.

Podemos decir entonces que, la corrección de una pobre velocidad anular o la velocidad en las aberturas, por el incremento de la velocidad de la bomba puede ser costosa en términos de fuerza requerida. Este ilustra también la importancia de un programa hidráulico con bajas caídas de presión, en el interior de la columna, y en el espacio anular, de modo que la caída de presión pueda ser controlada por la selección del diámetro de las aberturas de la broca. Resultante así en el más efectivo uso de la fuerza disponible.

Si observamos detenidamente la curva de la figura 12, podemos llegar a una conclusión importante, pues, desde que la pérdida de presión para un mismo sistema hidráulico no varía, a menos que cambie el régimen de circulación: el sistema a través del cual

el lodo es descargado, es el que determina la presión y la fuerza de desarrolladas, mientras que las bombas limitan éste por medio de su capacidad.

Si analizamos éste, vemos que el sistema hidráulico es el que determina la presión y la fuerza desarrollados, porque la pérdida de presión depende del diámetro y forma de la línea de descarga, así como de su longitud. Cuando una bomba no funciona, la pérdida de presión es cero, pero cuando los motores comienzan a mover los pistones, el flujo de lodo comienza a incrementarse y la pérdida de presión se incrementará rápidamente. El flujo puede ser incrementado mientras se alcance la capacidad de la bomba. Cada velocidad de la bomba dará un valor de pérdida de presión creado por un régimen de circulación determinado.

Para un sistema dado de descarga, la misma curva de caída de presión puede ser obtenida si el procedimiento antes indicado se sigue para varios diámetros de camisas. La pérdida de presión para un mismo sistema puede ser la misma, con diferentes diámetros de camisas, sin embargo, esto supone diferentes velocidades de la bomba.

En el ejemplo de la figura 13, una bomba de 5-3/4" y 18" de carrera operando a 65 spm. da un régimen de circulación de 435 gpm. y desarrollará en el sistema 1,400 psi. de pérdida de presión. Mientras que con camisa de 6-1/4" y 18" de carrera, puede causar el mismo régimen de circulación (435 gpm.) y la misma caída de presión 1,400 psi, operando con 50 spm. Por consiguiente, cambios en la -

bomba no pueden afectar la pérdida de presión en el sistema.

En cambio, un incremento en el diámetro de las aberturas de la proca puede producir una caída de presión diferente, punto (d), de la figura 13.

Para producir 290 fps, como velocidad de chorros, con 3 aberturas de 3/8", son necesarios 435 gpm. como regimen de circulación, los que darán una caída de presión total en el sistema de 1,400 psi. con 325 hp.

Si se incrementa el diámetro de las aberturas a 3 de 7/16", para obtener la misma velocidad de aberturas (290 fps), es necesario incrementar el regimen de circulación a 500 gpm., lo que desarrolla una presión total de 1,120 psi y el hph requerido es igual a  $\frac{(1,120 \text{ psi} \times 500 \text{ gpm})}{1,714}$  = 325 hph.

Por consiguiente cambios en el sistema alteran la presión total desarrollada mientras que la bomba y los motores determinan el límite de la curva.

C. - Limitación de Presión en Superficie: - Cuando se incrementa el hph de la bomba, adicionales hph se están desarrollando en la broca, entonces mayores pesos sobre la broca podrán ser usados puesto que hay incrementos en la limpieza del fondo. El factor que limita los incrementos de hph de la bomba es la presión de superficie, pues ella es la que va a limitar los hph. totales desarrollados en el sistema conforme se profundiza el pozo. Por consiguiente para un mismo sistema hidráulico y bajo un grupo de condiciones de perforación, existe u-

na presión de superficie máxima, la cual va a mantener hph constante en la broca, a todo lo largo del pozo con lo que se incrementará el régimen de penetración durante toda la perforación.

La pérdida de presión de acuerdo a las figuras 14 y 15, para un mismo régimen de circulación, es mayor cuando se usan brocas de 7-7/8" en la perforación, que cuando se usa brocas de 8-5/8" para un mismo sistema hidráulico de descarga, esto se debe indudablemente al aumento de pérdida de fricción en el espacio anular, en términos generales esto podría interpretarse a favor del uso de brocas de 8-5/8" en la perforación, desde el punto de vista hidráulico, puesto que para iguales regímenes de circulación dispondríamos de más energía en la broca y usaríamos menores velocidades de ascenso en el espacio anular. Pero consideraciones de orden económico, como es el incremento de los costos de brocas, el incremento en los costos del material de lodo y el mayor costo en la completación, cuando se usan brocas de 8-5/8", hacen que se prefiera el uso de brocas de 7-7/8". Por otro lado la tendencia es perforar cada vez huecos más reducidos, justamente para disminuir los costos de perforación.

Para determinar la máxima presión de superficie, en condiciones de máximos hph. disponibles de las bombas limitadas por las capacidades reales de sus motores y a profundidades limitadas, es necesario investigar el comportamiento de varias presiones de superficie que se supone deben dar la mayor eficiencia a un programa hidráulico.

Se han considerado cuatro presiones de superficie: 1,600, 1,400, 1200 y 800 psi, para una profundidad máxima de 6,500 pies li-

mitada por la capacidad del castillo y para un sistema hidráulico de las siguientes características:

Tubería	4-1/2" - 3-7/8" I. D.	I. F. de 13.75 lb./pie.
Botellas	6-1/4" O. D. y 2-7/8" I. D.	
Hueco	7-7/8"	
Lodo	10 ppg.	

Para cada una de estas presiones de superficie se han trazado curvas típicas de pérdida de hph., desde que el hph. de la bomba es mantenida constante, el hph de la bomba en los gráficos es una línea recta. Como se ve en las figuras número 16 a la 19, las líneas curvas representan los hph. disponibles para la caída de presión en la broca a varios regimens de circulación con sus correspondientes velocidades anulares de retorno y para cada 1,000 pies de profundidad. La distancia entre la línea curva y la línea recta representa la caída de presión en el sistema, con exclusión de la broca. De modo que los puntos altos de cada curva representan las condiciones óptimas de trabajo a esa profundidad particular, en regimens de circulación, en velocidad anular y en hph disponible para la broca.

La tabla 1, nos muestra las condiciones óptimas de trabajo para cada 1,000 pies de profundidad y para cada presión de superficie.

Para poder llegar a conclusiones prácticas de esta tabla, debemos tener en consideración la disponibilidad de energía de nuestro equipo hidráulico, tener una idea de lo que necesitamos de las diferentes características del sistema de circulación. El gráfico de la

figura 20 nos puede ayudar a obtener diferentes valores adecuados para cada una de las características del sistema de circulación. Para un rango de regímenes de circulación de 300 a 400 gpm, nosotros dispondríamos de lo siguiente:

- a) Caída de presión en el sistema con exclusión de la broca 457 y 784 psi.
- b) Velocidad anular de 180 a 240 fpm.
- c) Velocidad en las aberturas de la broca de 286 a 386 fps.
- d) Para estos galanajes les corresponde 100 y 220 hph. como caída de presión en la broca.
- e) Para un hph. de bomba de 300 hph. y para 6,500 pies de profundidad, camisas de 5-1/2" y 5-3/4" cumplen con estos requisitos.

Nuestro equipo hidráulico dispone de una planta de energía hidráulica de 350 hph. máximos y 300 hph como hph. de trabajo.

Para determinar la presión de superficie más eficiente bajo estas condiciones vamos a analizar la tabla 1, bajo tres factores del sistema de circulación:

- a) Hph perdidos en el sistema.
- b) Hph a la broca.
- c) Regimen de circulación.

a) Hph - Pérdidas en el Sistema. - Las presiones de superficie de 1,600 y 1,400 psi., desarrollan las mayores presiones totales de 315 y 265 hph. respectivamente, y que 1,200 y 800 psi. solamente dan 208 y 160 hph para una profundidad de 6,500 pies en condiciones de máximos galonajes. De un modo general, podemos ver que

las 4 presiones de superficie cumplen con distribuir  $1/3$  de la presión de superficie como pérdida en el sistema y las  $2/3$  partes como caídas de presión en la broca. Sin embargo solamente las presiones de superficie de 1,600 y 1,400 psi. desarrollan hph. en concordancia con la disponibilidad de hph. de nuestro equipo en condiciones máximas, de 300 hph y que 1,200 y 800 psi. desarrollan solamente un 60 por ciento de la energía disponible.

b) Hp - a la broca. - Si nos fijamos en la figura 21, podemos observar que los mayores hph de la broca están desarrollados con las presiones de trabajo en superficie de 1,600 y 1,400 psi., para profundidades de 1,00 pies a 6,500 pies. Esto se comprueba en la tabla 1, pues 1,600 y 1,400 tienen caídas de presión a través de la broca de 207 y 160 hp respectivamente, lo que está de acuerdo con el gráfico 20, donde los óptimos hph aplicados a la broca en un rango de 300 a 400 gpm son de 100 hph y 220 hph. Podemos concluir entonces que solamente las presiones de superficie de 1,600 y 1,400 psi, pueden ser usadas para obtener adecuadas caídas de presión a través de la broca.

c) Regimen de Circulación. - El volumen de circulación es un factor importante en la remoción de los cortes del fondo hasta la superficie, pues ella va a determinar las caídas de presión en el sistema y las velocidades a través de las aberturas de la broca y en el espacio anular. En tabla 1, para 1,600 y 1,400 psi. a 65,00 pies, desarrollan los mismos galonajes, en condiciones de máxima eficien

cia posible de trabajo de 337 gpm, por consiguiente las velocidades anulares y las velocidades en las aberturas de la broca para un mismo diámetro de aberturas serán las mismas, así como la caída de presión en el sistema.

El galonaje desarrollado para óptimas operaciones de hidráulica por 1,200 y 800 psi, solamente es de 298 y 250 gpm., con velocidades anulares de 175 y 146 fpm., respectivamente. Si tenemos en cuenta los resultados del gráfico 20, vemos que la mínima velocidad para 300 gpm. es de 186 fpm. con velocidades en las aberturas de 286 fps., por consiguiente las presiones de superficie de 1,200 y 800 psi. no cumplen con los requerimientos iniciales.

Entonces podemos concluir que solamente las presiones de superficie de 1,600 y 1,400 psi, pueden ser usadas en la planificación de un programa hidráulico eficiente y práctico, para los requerimientos de las características del bloque 'X', con las condiciones de limitaciones de energía de nuestro sistema hidráulico.

Observando la tabla 1, podemos ver semejanza de valores en los galonajes, velocidades anulares y de aberturas, a partir de 4500 pies, para las presiones de 1,600 y 1,400 psi. Por consiguiente el beneficio que se obtiene usando 1,600 como presión de superficie sobre 1,400 psi, solamente será hasta los 4,500 pies de profundidad. Si tenemos presente lo siguiente, que aumentos en el hph total después de que la máxima presión de superficie ha sido alcanzada por incrementos del regimen de circulación o incrementos en las aberturas de



la broca y que decrecimientos en el hph total una vez que la presión máxima de superficie ha sido alcanzada, solamente puede estar acompañada por decrecimiento en la velocidad de la bomba o en los diámetros de las aberturas, y como solamente disponemos de 300 hph, efectivos de nuestra bomba, para utilizar 1,600 como presión de superficie sería necesario la reducción del hph total, por reducciones de la velocidad de la bomba, con los consiguientes efectos sobre las velocidades en el espacio anular y en las aberturas o por reducciones del diámetro de los chorros, lo cual también resulta peligroso, por las consecuencias que se derivan de usar altas presiones con aberturas muy pequeñas.

En cambio para utilizar 1,400 psi, como presión de superficie, sería necesario aumentar el hph total, con incrementos del régimen de circulación, lo que, como se verá más adelante, se puede hacer sin mayores incrementos en las pérdidas por fricción, o también por aumentos del diámetro de los chorros.

Entonces podemos decir que para aprovechar al máximo nuestro equipo hidráulico para una profundidad límite de 6,500 pies, la presión de trabajo en superficie de 1,400 psi, es la que mejor incrementa todas las características del sistema de circulación en beneficio del régimen de penetración, a todo lo largo de la perforación.

TABLA - 1

1,600 psi.				
Profundidad Pies	Pérdida Presión en el Sistema.	Presión a la broca	Regimen de Circul. gpm.	velocidad nular Fpr
1000	152	385	575	331
2000	140	333	507	292
3000	153	297	485	280
4000	164	263	457	264
5000	138	229	393	227
6000	115	212	350	202
6500	108	207	337	195
1,400 psi.				
1000	138	319	567	314
2000	120	272	488	278
3000	130	243	455	263
4000	130	215	425	245
5000	125	198	388	224
6000	113	174	355	205
6500	105	160	337	195
1,200 psi.				
1000	103	259	517	298
2000	137	215	502	290
3000	148	182	473	273
4000	101	166	375	217
5000	78	145	315	183
6000	77	141	302	176
6500	75	133	298	175
800 psi.				
1000	82	222	480	277
2000	75	185	400	231
3000	54	150	328	188
4000	52	140	300	174
5000	45	125	270	156
6000	47	115	250	146
6500	46	114	250	146

d) Regimen de Circulación.- El regimen de circulación del lodo se determina por la velocidad ascendente necesaria para sacar los cortes del pozo y los derrumbes y por los requerimientos de la velocidad en las aberturas de la broca. La ventaja esencial del sistema rotario de perforación sobre el sistema de perforación a cable, es que se circula un fluido (lodo) con el objeto de eliminar los cortes y mantener el hueco en condiciones tales que la tubería de perforación puede retirarse del fondo facilmente y regresar al fondo cuando sea necesario.

Para una correcta valuación de estos dos efectos del regimen de circulación, es necesario primero establecer el tipo de flujo en el sistema hidráulico de perforación.

El flujo de fluidos dentro de una tubería se divide comunmente en dos regiones. La primera región ocurre cuando las velocidades son lentas y las partículas del fluido se mueven hacia adelante siguiendo líneas rectas o ligeramente curvas, siguiendo las líneas de las paredes de la tubería.

La primera región de flujo más lento se divide generalmente en dos categorías, de acuerdo con la naturaleza viscosa de la sustancia que fluye. Para el caso de los líquidos Newtonianos o verdaderos, esta región se denomina viscosa o laminar o de flujo uniforme. Ejemplo de esto son los líquidos verdaderos como el agua y la mayoría de los aceites crudos. Estos líquidos obedecen al concepto de la viscosidad de Newton. En el caso de los líquidos no Newtonianos como lo es en realidad un lodo de perforación, al flujo se le llama plástico. Tanto en el flujo

viscoso como plástico las partículas se mueven hacia adelante siguiendo las sinuosidades de las paredes de la tubería y en capas paralelas. Sin embargo conforme se va alejando de la pared de la tubería la velocidad y la distribución de las velocidades varían para los diversos fluidos de acuerdo al grado de desviación de los líquidos verdaderos. Este a su vez va a determinar la cantidad de fluido que fluirá para una caída de presión dada, ejercida sobre toda la longitud del tubo.

La segunda región o tipo de flujo se denomina turbulento. Las altas velocidades de circulación de lodo requeridas en la perforación rotaria originan flujos turbulentos, excepto en las cantinas y posiblemente en las partes anchas del anillo. En el flujo turbulento las partículas de lodo no se mueven en capas paralelas, ni se amolzan a las paredes de la tubería, en vez de esto, el flujo se arremolina en el interior de la tubería, el movimiento de rodamiento origina el cambio de inercia de una región a otra y por eso el peso específico del fluido se convierte en un factor importante en la caída de presión. La viscosidad del fluido asume un factor más pequeño y desaparece enteramente como factor de caída de presión a velocidades infinitamente altas de flujo. Sin embargo el flujo del lodo a través de la tubería de perforación es turbulento pero se supone parece una región delgada junto a las paredes del pozo y de la tubería que tiene flujo plástico, mientras que en el centro del tubo el flujo es completamente turbulento. Por consiguiente la velocidad del flujo aumenta rápidamente al alejarse de las paredes, adquiriendo su máximo en el centro. Por eso, se supone que en lugares donde el diámetro del pozo aumenta el flujo se hace plástico y en lugares donde el diámetro

metro del pozo disminuye, el flujo se vuelve más turbulento, esto sucede también en las uniones de mayor diámetro que el resto de la tubería y en las botellas, de ahí que en estos lugares el promedio de velocidades sea mayor.

El potencial del regimen de penetración es gobernado por la acción de los dientes de la broca, la profundidad de penetración de los dientes en la formación y el efecto de las propiedades del lodo sobre el volumen de formación cortada. El regimen de penetración y por consiguiente el avance de la perforación es controlada por el porcentaje del volumen total cortado que es removido por la circulación del lodo antes de ser perforado. En la tabla 1, podemos observar algunos volúmenes de material cortado para varios diámetros de brocas, cuando el regimen de penetración fue de 100 fph.

Tabla I

Diámetro del Hueco Pulg.	Formación cortada G. P. M.
7-7/8	4.2
8-5/8	5.2
9-7/8	6.7
10-5/8	7.7
12-1/4	10.2

Puesto que el regimen de circulación es el que determina las velocidades tanto en el espacio anular como en las aberturas de la broca, es el regimen de circulación el que determina el porcentaje de material cortado, que va a ser removido antes de ser re-perforado.

Los efectos del regimen de circulación sobre el porcentaje de cortes removidos depende de las propiedades del lodo, la profundidad del pozo, el diámetro del hueco, tipo de broca, espesor del anillo, velocidad de la bomba, todas estas condiciones influyen de diferente manera el regimen de circulación, de acuerdo a las características de la formación penetrada.

Sin embargo una broca del tipo Yet tiene nueve diámetros de aberturas intercambiables y cada una de ellas puede determinar a un mismo regimen de circulación, diferentes velocidades en las aberturas y en el espacio anular, de modo que varios regímenes de circulación originan nueve velocidades cada una en las aberturas y en el espacio anular. Por consiguiente para un grupo de condiciones de perforación, hay un sólo diámetro cuanto más teóricamente que va a dar velocidades eficientes en las aberturas y en el espacio anular. En la práctica puede existir un rango de variación entre estos diámetros, que dan eficientes velocidades anulares y en las aberturas.

Por consiguiente, buenas velocidades de ascenso en el espacio anular nos está indicando que la velocidad desarrollada en las aberturas por ese regimen de circulación particular sea la más eficiente, inversamente podemos decir, que un regimen de circulación está desarrollando adecuadas velocidades en las aberturas pero que la velocidad anular de ascenso no sea la más adecuada, para sacar los cortes del fondo a la superficie.

De otro lado, como observamos de la figuras 12 y 13, incre

mentos del regimen de circulaci3n, incrementa la caida de presi3n en el sistema, tanto en el diámetro interno de la tubería como en el espacio anular, esta pérdida de presi3n será mayor si el diámetro de la tubería es la misma y disminuye el diámetro del hueco, figuras 14 y 15, y conforme se profundiza el pozo, figura 22. Por lo que dentro de los límites prácticos de trabajo, podemos decir que un buen programa hidráulico es aquel que desarrolla mínimas caídas de presi3n con máximos regímenes de circulaci3n, en condiciones de presi3n de superficie limitada, para desarrollar eficientes velocidades en el anillo y en las aberturas, y que mantenga la máxima cantidad de fuerza disponible sobre la broca, de modo que máximos pesos puedan ser usados.

Cualquier volumen de circulaci3n empleado en una perforaci3n, siempre es mucho mayor del volumen de cortes generados por la broca, de modo que las necesidades de la circulaci3n de lodo se dirigen exclusivamente a la remoci3n de los cortes, por medio de eficientes velocidades de ascenso por el espacio anular y en las aberturas para evitar reperforaciones de cortes y por ende empaquetaduras de las brocas.

Como se observa de la figura 20, podemos decir que, como condiciones previas al planeamiento de un programa hidráulico para el bloque X, podemos considerar un rango de volumen de circulaci3n de 300 a 400 gpm.

e) Velocidad de Retorno por el Espacio Anular. - La velocidad de ascenso por el espacio anular es un factor importante en la preparaci3n de un programa hidráulico eficiente, pues la velocidad de ascenso es la responsable de llevar los cortes desde el fondo hasta la superficie

y mantener el hueco siempre limpio de cortes y de derrumbes, posiblemente que en algunos lugares este concepto puede ser usado para el cálculo de un programa hidráulico.

La remoción de cortes depende del flujo en el sistema hidráulico, el flujo laminar levanta los cortes en función de la velocidad, de la densidad y de la viscosidad del lodo. Por eso al elevar la densidad de un lodo, en flujo laminar, se puede emplear velocidades en el anillo menores que las usadas en flujo turbulento.

En flujo turbulento arrastra los cortes, es función de la velocidad de flujo y de la densidad, por tanto también se puede reducir las velocidades de ascenso con incrementos de densidad.

El agua teniendo menor gravedad específica y viscosidad que cualquiera de los tipos de lodo empleados en la perforación, alcanza las máximas velocidades de ascenso en el espacio anular. Pero conforme se incrementa la viscosidad y el peso específico por la adición de sólidos, la velocidad de ascenso decrece.

Cuando el fluido se mueve en el espacio anular hacia arriba, la velocidad de ascenso varía de cero en las paredes del pozo a valores máximos en el centro del anillo, los puntos de más alta velocidad están en las uniones de la tubería. Luego las áreas de menor velocidad estarán a lo largo de la longitud de la tubería, de igual modo altas velocidades de ascenso estarán en áreas adyacentes a las botellas. Si el lodo asciende con una velocidad adecuada, acumula los cortes en las áreas de menor espesor del anillo, esto es en áreas adyacentes a las



uniones de la tubería, una excesiva acumulación de cortes puede traer problemas de derrumbes, si la velocidad de ascenso no es la suficiente como para sacar los cortes tan pronto como sean formados.

La velocidad mínima necesaria debe estar siempre en exceso a fin de cubrir los regímenes de caída de los cortes cuando se circula el lodo y tener las mismas características cuando se comienza a circular. Si el promedio de velocidades sostiene exactamente los cortes en suspensión, hay un cierto número de cortes moviéndose hacia arriba en el centro del anillo y hacia abajo cerca de las paredes del pozo, y algunos cortes permanecen en una situación intermedia. En cualquier parte estrecha del anillo, un constante intercambio de cortes de ascenso en el centro y de descenso en las paredes del hueco, de cortes que no alcanzan a llegar a la superficie pero que tampoco llegan al fondo, pueden ocasionar derrumbes cerca a las uniones y a lo largo de las botellas. Esta situación bien puede ocurrir al perforar formaciones duras.

Por consiguiente las velocidades de ascenso en el espacio anular siempre deben estar en exceso a fin de cubrir cualquiera de estas circunstancias.

Los requerimientos de excesos de velocidad anular dependen de la capacidad de la bomba, de la velocidad de la bomba, del diámetro y regularidad del hueco, del diámetro de tubería usada, del tipo de conexiones, del espesor del anillo, de las propiedades del lodo (densidad, viscosidad) y del tipo de formación penetrada.

De estas condiciones solamente las características de trabajo de la bomba y las propiedades del lodo están sujetas a control, de

modo que es casi imposible derivar una fórmula que involucre todas estas variables y obtener valores adecuados de velocidades anulares para eficientes limpieza del hueco.

la velocidad anular puede incrementarse con el incremento del volumen desplazado por la bomba. A un desplazamiento de bomba dado, la velocidad de retorno puede incrementarse con el incremento del diámetro de la tubería o con el decrecimiento del diámetro del hueco para el mismo diámetro de tubería.

Observaciones de campo nos indican que las velocidades de retorno aceptables para condiciones de gravedades específicas semejantes de las formaciones, las velocidades anulares varían inversamente al diámetro del hueco, como se ve en la tabla 1.

Tabla 1

Diámetro del hueco Pulg.	Velocidad anular fpm.
15	80
12-1/4"	90
10-5/8"	110
8 -3/4"	120
7-7/8"	140
6-	150

La velocidad anular varía considerablemente con el avance de la perforación. En formaciones duras, las mínimas velocidades anulares están en función de las mínimas áreas superficiales por volumen cúbico de los cortes como ocurre cuando se perforan areniscas. Si por el contrario formaciones blandas están siendo penetradas y los

regímenes de perforación son altos, en el cual los materiales están siendo finalmente divididos y en cortes pequeños las partículas más finas van a formar parte del lodo, entonces las mínimas velocidades de ascenso deben estar en función de las mínimas áreas superficiales, como cuando se perforan lutitas por ejemplo.

Para un material de gravedad específica dado, altas velocidades de ascenso se requieren si los cortes se aproximan a pequeñas esferas y menores velocidades de ascenso se necesitarán si las partículas incrementan su área superficial para un mismo peso. Máximas velocidades anulares son necesarias cuando se perforan rocas duras, puesto que dan cortes de mínimas áreas superficiales por volumen cúbico, por ejemplo cuando se perforan areniscas finas o conglomerados. Como ejemplo podemos mencionar que una esfera compacta requiere velocidad de ascenso que la misma esfera pero porosa.

Para un grupo de características de lodo, espesor de anillo, la velocidad necesaria de ascenso para mover los cortes fuera del hueco de semejante área y forma superficial varía más o menos directamente con la gravedad específica, como se puede ver la fórmula para el cálculo de velocidades de ascenso, en flujo turbulento.

$$V = 3.5 \sqrt{D (w_1 - w_2)}$$

donde: V            velocidad en ppm.            valores  
 D            diámetro de la partícula  
 w<sub>1</sub>        densidad del corte lbs. por pie cúbico.  
 w<sub>2</sub>        densidad del lodo en lbs. por pie cúbico.

Para partículas de semejante peso específico, la velocidad de ascenso varía inversamente proporcional al diámetro del hueco.

Un ejemplo que ilustra la influencia del área superficial de los cortes en la velocidad de ascenso es el siguiente: 1- tenemos un cubo de 1 pulgada de lado, conteniendo 1 pulgada cúbica de material y una esfera que contiene 1 pulgada cúbica del mismo material y que tenga un radio de 1.236 pulgadas.

$$\begin{aligned} \text{Area superficial de la esfera} & - & 4 \times 3.1416 \times (1.236)^2. \\ \text{Area superficial del cubo} & & 6 \text{ pulg.} \times 1 \text{ pulg.} = 6 \text{ pulg. cuadradas.} \\ & & - 4.82 \text{ pulgadas cuadradas.} \end{aligned}$$

Se puede ver para mover el cubo fuera del hueco se requerirá menor velocidad que para remover la esfera.

Son conceptos básicos de la perforación rotaria que cuando se perfora formaciones blandas, mínimos pesos, altas velocidades de rotación, con altas velocidades de ascenso en el espacio anular se requieren, y en formaciones duras y pesos y velocidades de rotación moderadas con máximas velocidades anulares son necesarias para dejar el hueco limpio.

Altas velocidades de ascenso tienen otras ventajas además de dejar el hueco limpio, los cortes por el rápido movimiento hacia arriba de la circulación del lodo, permanecen por cortos períodos de tiempo en el hueco, éste mantiene el peso del lodo en los valores deseados, con lo cual decrece la posibilidad de pérdidas de circulación, sobre todo cuando se perforan formaciones blandas, con intercalaciones de arenas

acufferas. Todos los pesos incluyendo las partículas que forman el lodo, determinan la presión hidrostática, si los cortes permanecen cortos períodos de tiempo el grado de fracturamiento y descomposición de los cortes principalmente de las lutitas, será limitado, esto a su vez contribuye a disminuir los incrementos de la viscosidad y cuando se perforan formaciones blandas y a su vez buen arrastre de cortes contribuyen a disminuir la tendencia de pegamientos de tubería.

La rotación de la columna de perforación es un factor que contribuye a incrementar el regimen al cual los cortes son sacados fuera del hueco por la velocidad anular, puesto que la fuerza centrífuga generada por la rotación de la columna mantiene y envía los cortes a las regiones de máxima velocidad en el anillo, todas las velocidades de rotación usadas en la perforación son aceptables desde este punto de vista.

Cuando se trata de determinar la más eficiente velocidad anular es necesario considerar un mínimo volumen de lodo, el cual puede dar una mínima velocidad de ascenso requerida para transportar los cortes desde el fondo hasta la superficie, tan luego como ellos son producidos, especialmente en las formaciones blandas, puesto que la velocidad anular no tiene ningún efecto sobre el regimen de penetración, sin embargo se puede evaluar la velocidad anular desde el punto de vista del empaquetamiento de la broca, pues bajas velocidades de ascenso permiten el regreso de los cortes al fondo, de modo que, cortes cada vez más pequeños se están produciendo y esto incrementa la tendencia al empaquetamiento y por consiguiente los problemas de pesca de conos se presentará. Teniendo presente este concepto, para analizar

la perforación de 7 pozos en el bloque "X", donde se perforó hasta una profundidad de 6,500 pies con regimen de penetración de 80 pies por hora en las formaciones blandas y de 10 pies por hora en las formaciones duras, con una velocidad de ascenso de 180 pies por minuto con el espacio anular, podemos decir que de 6 brocas que se usaron en formaciones blandas, 3 ó 4 salieron en cada pozo empaquetadas y en los pozos PB-255 y 258, las pescas se produjeron justamente por esta circunstancia, aunque se debe mencionar que no toda la culpa la tuvo la velocidad anular sino el incremento de la viscosidad.

Teniendo en cuenta esta observación, en cuanto al empaquetamiento, la descripción litológica de cada una de las formaciones que componen el bloque "X", extraída del perfil compuesto y, de acuerdo a la tabla 1, de distribución promedio de la litología de las formaciones, sacadas de los perfiles eléctricos, podemos decir que la mínima velocidad aceptable de velocidad de ascenso en el espacio anular, sería de 140 fpm. pero, por consideraciones al incremento de la viscosidad, la mínima velocidad de trabajo, para la perforación del bloque "X" es de 180 fpm.

T A B L A 1 (después de velocidad anular)

<u>Profundidad</u> <u>Pie s</u>	<u>Lutita</u> <u>Pie s</u>	<u>Arenisca</u> <u>Pie s</u>	<u>Intercalac.</u> <u>Pie s.</u>
0- 150		150	
150-1050	900		
1050-1120			70
1120-1620	500		
1120-1700			80
1700-1760		60	
1760-1800	40		
1800-2250			450
2250-2340	90		
2340-2530			190
2530-2620	90		
2620-2650		30	
2650-2690	40		
2690-3100			410
3100-3200	100		
3200-3300		100	
3300-3340	40		
3340-4000		660	
4000-4270	270		
4270-4330			60
4330-4490		160	
4490-4820			330
4820-4900	80		
4900-5060			160
5060-5160	100		
5160-5200		40	

5200-5320	120		
5320-5650			330
5650-5700	50		
5700-5820		120	
5820-6500			750
Totales :	2420	1130	2860
Porcentajes :	36%	20%	44%

### Descripción Litológica de las Formaciones

#### Del Bloque "X"

##### Formación Verdún:

Está constituida por areniscas de grano fino hasta grueso de color gris claro, con intercalaciones de lutitas bentónicas, gris claro y gris verdosas y en la base un conglomerado grueso de cuarcitas y cuarzo.

##### Formación Pozo-Brecha:

Está constituida por una secuencia alternada de arenas finas gris verdosas, lutitas gris marrón claras, micáceas y silstone gris micáceas, con bandas de calcita.

##### Formación Talara Superior:

Consiste de una intercalación de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, con abundante cuarzo hialino y lutitas bentónicas grises y marrones, con silstone gris.

##### Formación Talara Medio:

Está constituida en su parte superior de areniscas y arena de



grano fino, con bandas de calcita, areniscas grises verdosas y gris claras con intercalaciones de lutitas azuladas bentoníticas en su parte media y en su parte inferior de arena blanca de cuarzo hialino lechoso y arenisca conglomerádica gris verdosa gruesa. Formación Productiva.

**Formación Rica:**

Consiste de una intercalación de lutitas grises marrones con silstones y areniscas grises de grano fino.

**Formación Ñuro:**

Está constituida por areniscas grises verdosas de grano fino a medio, arenas conglomerádicas con lutitas grises micáceas y silstones arenoso.

**Formación Quemada:**

Está formada por una intercalación de lutitas grises marrones y silstone gris.

**Formación Patria -Salina:**

Formada por arenas y areniscas con lutitas verdes lisas intercaladas con silstone carbonoso y conglomerado grueso de cuarzo blanco con pirita y arena cuarzosa en su parte superior, areniscas gris verdosas y arenas intercaladas con lutitas gris verdosas y silstone gris verdoso en su parte media, arenisca blanca fina carbonosa y arenas cuarzosas en su parte inferior. Formación Productiva.

**F. Velocidad en las aberturas de la Broca:** - Las brocas del tipo Yet dirigen el chorro de lodo directamente al fondo del pozo, la turbulencia creada por la velocidad del chorro hace saltar los cortes del fondo cada

vez que son producidos por la broca, manteniendo el fondo limpio a l mismo tiempo los conos y dientes de la broca.

El uso de la acción de limpieza del fondo y de la broca, puede basarse en dos criterios, a) - El empleo de altas velocidades de aberturas, y b) - El uso de moderadas velocidades de aberturas, la línea divisoria entre estos dos criterios es indefinida, a excepción hecha para un mismo diámetro, pues es del diámetro de la abertura que depende el efecto que pueda crear el lodo en el fondo y en la broca por acción directa de desplazamiento del material cada vez que los cortes son producidos.

La velocidad con que sale el chorro de lodo de la abertura, depende de la cantidad de fuerza disponible en la broca, del régimen de circulación y de su diámetro.

Si se incrementa el hph. de la bomba, el hph. a la broca se incrementará proporcionalmente, como se observa de la figura 2, incremento que aumentará la fuerza del chorro de lodo, lo que incrementará el régimen de penetración por efectos de mayor limpieza del fondo, pues en cada nueva revolución la broca hundirá sus dientes en formaciones nuevas.

Si el régimen de circulación es demasiado bajo las velocidades en las aberturas de la broca también serán bajas, por el contrario altos regímenes de circulación dan altas velocidades de aberturas, para el mismo diámetro.

Para el mismo régimen de circulación, un diámetro demasiado grande dará bajas velocidades, inversamente, diámetros pequeños

para el mismo regimen de circulaci3n dan altas velocidades en las aberturas.

Por consiguiente sea cualquiera la situaci3n presente, bajas velocidades de aberturas estar3n haciendo la limpieza del fondo de cualquier modo y los problemas derivados de la reperforaci3n como los empaquetamientos estar3n presentando.

Por consiguiente, para un grupo de condiciones de perforaci3n dados, existe un di3metro de abertura que balancea, el regimen de circulaci3n y la velocidad anular, que proporciona adecuadas velocidades en las aberturas, para eficientes limpiezas del fondo y de conos y dientes de la broca.

Cuando se perforan formaciones blandas es evidente que se necesitan altas velocidades de aberturas puesto que es necesario remover los cortes tan luego son producidos. Pero tambi3n es indudable - que cuando se perforan formaciones duras, las ventajas derivadas de altas velocidades en las aberturas, pueden disminuir mientras que un mayor factor contribuye a la limpieza desde el fondo hasta la superficie o sea la velocidad anular, contribuyendo de este modo a incrementar el regimen de penetraci3n, evitando el regreso de cortes. Consecuentemente altas velocidades de aberturas tienen una marcada contribuci3n cuando se perforan foramciones blandas y los regimenes de penetraci3n son altos. Sin embargo el uso de excesivas velocidades de aberturas contribuyen a deteriorar las aberturas de modo que p3rdidas de presi3n, por esta causa, se presentar3n sobre todo cuando se usan di3metros de aberturas muy peque1os. Excesos de velocidad de aber-

turas son también necesarios en las formaciones intermedias o en las intercalaciones de lutitas y areniscas, pues se ha llegado a comprobar que se producen cortes grandes, de uno a seis veces el promedio de los cortes normales, en los lugares donde los dientes de la broca tuvieron contacto leve por varias revoluciones de la broca.

Para obtener un eficiente programa hidráulico en condiciones de presión y hph. limitados, es indudable que se tiene que ir disminuyendo el diámetro de las aberturas conforme se profundiza el pozo, este decrecimiento debe hacerse en forma progresiva del siguiente modo, si necesitamos cambiar 3 aberturas de  $7/16''$  por aberturas de  $3/8''$ , al primer cambio de broca, 1 de  $3/8''$  y 2 de  $7/16''$ , al segundo cambio de broca, 2 de  $3/8''$  y 1 de  $7/16''$  y al tercer cambio de broca, 3 de  $3/8''$ .

Como vimos en el capítulo anterior problemas de empaquetamiento se produjeron cuando se perforaron 7 pozos en el bloque "X" debido en parte al incremento de la viscosidad, cuando la velocidad en las aberturas fue de 250 fps. De acuerdo con esto y a las características litológicas de las diferentes formaciones y a su distribución, en el bloque "X" así como los requerimientos de la velocidad en las aberturas podemos decir que la velocidad mínima de aberturas para el bloque "X" es de 260 pies por segundo.

G - Horsepower a la broca: - Los regímenes de penetración están asociados a los hph. de fuerza que pasan a través de las aberturas de la broca hacia el fondo del hueco, como se puede observar de las figuras 1 y 2. Se ha demostrado que la cantidad en volumen de circulación así como la fuerza de la velocidad del chorro incrementan el régimen de penetración. Cuando se perforan formaciones blandas es indudable que alto del material es arrancado por la fuerza del chorro, sin embargo,

parece que un factor más importante como el que se puede aplicar más peso a la broca, cuando se dispone de excesos de energía hidráulica para desplazar el material cortado por la broca y eliminarlo en superficie, es el factor principal para el incremento del regimen de penetración.

Por consiguiente cuando se trata de formular un programa hidráulico es necesario partir de este principio de la limpieza del fondo, como base para el programa hidráulico, se han considerado cuatro criterios, que tienen relación con cuatro características del sistema de circulación para concretar este principio en un programa hidráulico

- a) Velocidades mínimas en las aberturas y por consiguiente mínimos diámetros de chorros.
- b) Velocidades mínimas en el espacio anular de ascenso.
- c) Impacto hidráulico.
- d) Horsepower a la broca.

Como ya dijimos, la velocidad de retorno por el espacio anular del lodo no es una adecuada medida de un buen programa hidráulico, una velocidad suficiente como para mover los cortes hacia la superficie a cierto regimen de circulación no es necesariamente una apropiada medida de la velocidad, que ese mismo regimen de circulación esté desarrollando en las aberturas aun más, ese regimen de circulación que de velocidad anular eficiente, puede que no esté desarrollando en el sistema adecuados hph. totales ni hph. a la broca de modo que aun la velo-

cidad de las aberturas sea lo suficientemente alta como para hacer una eficiente limpieza del fondo, si no está acompañada de la cantidad de fuerza necesaria, muy poco será el efecto que se consiga de altas velocidades de aberturas. De igual modo podemos decir que regímenes de circulación que desarrollen eficientes velocidades en las aberturas, con la suficiente fuerza como para hacer una total limpieza del fondo, no pueden estar desarrollando buenas velocidades anulares de retorno. De otro lado las velocidades de ascenso y en las aberturas, están sujetas unas directamente a las variaciones de las propiedades del lodo y a las variaciones de las características de las formaciones que están siendo penetradas.

El tercer criterio del impacto hidráulico se define como la fuerza con que golpea el chorro el fondo del hueco, el cálculo se hace a base de los hphs. disponibles en superficie, sin tener en cuenta la caída de presión en el sistema, para la caída de presión en la broca. Difiere del hph. a la broca en que el régimen de trabajo realizado por el chorro, queda de hecho fuera de consideración, con todo un enfoque de tal naturaleza tiene su aplicación, pues es sensato el uso de la acción que hace saltar los cortes cada vez que éstos son producidos por la broca, como una función de la fuerza del lodo.

El impacto producido, por el chorro de las aberturas de la broca está dado por el producto de  $Q_n V_n$ , donde  $Q_n$  es el volumen de circulación por las aberturas y  $V_n$  es la velocidad del lodo en las mismas aberturas, quiere decir entonces que para desarrollar altas velocidades en las aberturas, se necesitan la circulación de altos volúme-

nes. Indudablemente que esto sólo es posible en equipos que disponen plantas de energía hidráulica con altos hph. en sus bombas (2,000 ó más), por consiguiente no hay limitación en la disponibilidad de hph. ni de presión en superficie en la formulación de programas hidráulicos, un programa hidráulico basado en este principio es indudablemente superior y más eficiente al basado en el regimen de trabajo de la broca.

Puesto que, nosotros tenemos limitaciones en nuestro equipo hidráulico, en la disponibilidad de hph. de la bomba y de presión máxima en superficie, es lógico el que usemos el cuarto principio de hph. a la broca, toda vez que sólo se va usar a 6,500 pies como profundidad máxima.

Como ya mencionamos, el cuarto principio está basado en el regimen de trabajo desarrollado por el lodo, como función de los hph. disponibles en la broca para la limpieza del fondo. Este regimen de trabajo está definido por el producto de  $Q_n V_n^2$ , donde  $Q_n$  es el volumen que está circulando por las aberturas y  $V_n$  es la velocidad del lodo en las mismas aberturas. Es indudable que regímenes de circulación moderados van a determinar altas velocidades en las aberturas.

El hph. a la broca está definido por hphb.

$$\text{hphb} = \frac{Q P}{1,714} = \text{img}$$

Q regimen de circulación

Pb caída de presión en las aberturas de la broca.

Pb — es proporcional a  $V_n^2$ .

Por consiguiente podemos decir que, siendo el regimen de circulación constante en todo el sistema y que, cuando no hay limitación de hph, disponible, la caída de presión en la broca puede acercarse al valor de la presión de superficie, esto puede ocurrir al disminuir el regimen de circulación, de modo que se reduce la caída de presión al mínimo en el sistema con exclusión de la broca. Por consiguiente altos valores de hph. a la broca desarrollan altas velocidades en las aberturas con mínimos volúmenes de circulación, lo que puede conducir a buenas performances de la broca.

Consecuentemente hay un sólo valor de hph. a la broca para cada peso, para una formación específica y para todas aquellas condiciones que rodean la performance de la broca, el cual va a proveer eficiente limpieza del fondo para obtener máximos regímenes de penetración.

Valores por encima de este hph. crítico a la broca, no va a producir mayores incrementos del regimen de penetración y serán consumidos en la línea de fricción, pero valores por debajo de este valor crítico de hph. a la broca pueden permitir la reperfuración de cortes y consecuentemente aumentarían la tendencia al empaquetamiento de la broca, con reducciones en el regimen de penetración.

Desde luego, entonces, cuando se están aplicando máximos pesos a la broca, cada valor de hph. a la broca puede afectar la performance de la broca, solamente por la limitación de la cantidad de peso que se está usando. Esto puede ser definido mejor de la siguiente manera, el hph. requerido para mantener limpio el fondo,



cada vez que los cortes son producidos varía linealmente con el peso sobre la broca y puesto que el regimen de penetración varía linealmente con el hph. a la broca, si máximos pesos están siendo empleados.

Cuando se perforan formaciones blandas y el regimen de penetración está dada por el peso sobre la broca, entonces mayor fuerza hidráulica es necesaria para una mejor limpieza del fondo, entonces hay un rango, en el cual excesos de limpieza del fondo con más acción de chorro contribuirán a una buena performance de la broca y que ésta no se empaquete.

Por consiguiente el incremento de la fuerza hidráulica en las aberturas de la broca tiene mucho más ventaja cuando se perforan formaciones blandas y aún en las duras, pero ésta disminuye a medida que la roca se hace más densa, donde la velocidad de ascenso juega un papel más importante. Por lo que se puede decir que el límite económico de un buen programa hidráulico está dado, cuando se perforan formaciones duras.

El hph. total decrece conforme se incrementa la profundidad del pozo, según la figura 23, por consiguiente el hph. disponible a la broca también decrece, luego es necesario considerar un regimen de circulación y una presión de superficie, que mantengan hph. constantes a todo lo largo de la perforación.

El hph. a la broca se incrementa cuando se incrementa la presión de superficie, figura 2. La caída de presión en el sistema, en un óptimo sistema de circulación, debe ser la tercera parte como máximo de la presión de superficie, dejando disponibles para la caída de presión en la broca las dos terceras partes restantes. Este principio puede demostrar así.

Sabemos que :

$$P_s = dP_p + dP_b \quad (1)$$

$$dP_p = K_1 Q^n.$$

Multiplicando la ecuaci3n 1. por  $q/k_2$ .

$$\frac{P_s Q}{K_2} = \frac{dP_p Q}{K_2} + dP_b Q$$

Luego

$$HPH_s = HPH_p + HPH_b$$

$$HPH_b = HPH_s - HPH_p$$

Sustituyendo:

$$HPH_b = \frac{P_s Q}{K_2} - \frac{K_1 Q^n Q}{K_2}$$

$$HPH_b = \frac{P_s Q}{K_2} - \frac{K_1 Q^{n+1}}{K_2}$$

Diferenciando:

$$\frac{d(HPH_b)}{d(Q)} = \frac{P_s}{K_2} - \frac{K_1 (n+1) Q^n}{K_2}$$

Para m3ximos valores de  $HPH_b$ .

$$\frac{d(HPH_b)}{d(Q)} = 0$$

a (Q)

Si  $P_s$  Presi3n m3xima permisible en superficie.

$Q$  Volumen de circulaci3n 3ptimo.

$$Q_{op} = \left( \frac{P_s}{K_1 (n+1)} \right)^{1/n} \quad (2)$$

$$\text{Si } P_s = dP_b + K_1 Q_{op}^n.$$

$$K_1 Q_{op}^n = P_s - dP_b.$$

$$K_1 = \frac{P_s - dP_b}{Q_{op}^n}.$$

Sustituyendo este valor en la ecuaci3n 2.

$$dP_b = P_s \frac{n}{n+1} \quad (3)$$

Multiplicando la ecuaci3n 2, por  $p_s/K_2$ .

$$P_s Q_{op} = \frac{(P_s)^{n+1}}{K_2 (K_1 (n+1))} \quad 1/n.$$

Por definici3n:

$$HPH = \frac{P_s Q_{op}}{K_2}$$

$$HPH = \frac{(P_s)^{\frac{n+1}{n}}}{K_2 (K_1^{n+1})} \quad 1/n$$

Si para flujo turbulento  $n = 1.82$

$$dP_b = P_s \frac{1.82}{2.82} = 0.65 \text{ psi.}$$

$$Q_{op} = \frac{(P_s)^{0.54}}{2.82 K_1}$$

$$HPH = \frac{(P_s)^{1.54}}{K_2 (2.82 K_1)^{0.54}}$$

Por consiguiente para un buen programa hidr3ulico, basado en hph. a la broca, el 65 por ciento de la presi3n de superficie debe considerarse como ca3da de presi3n en la broca y el 35 por ciento como ca3da de presi3n m3xima en el sistema.

$P_s$  — Presi3n de superficie.

$dP_p$  — Ca3da de presi3n en el sistema.

$dP_b$  — Ca3da de presi3n a trav3s de la broca.

$Q$  — Volumen de circulaci3n.

$K_1$  — Constante que depende de varios factores, del di3metro del hueco, de la tuber3a, del espesor del anillo, de las conexiones de superficie, peso del lodo.

$K_2$  — Constante de conversi3n.

$n$  — Exponente que relaciona la ca3da de presi3n con el volumen de circulaci3n.

HPHs	Caballos de fuerza en superficie.
HPHp	Caballos de fuerza perdidos en el sistema.
HPHb	Caballos de fuerza disponibles a la broca.
HPH -	Caballos de fuerza de la bomba.

\* \* \*

#### IV - METODO ANALITICO PARA DETERMINAR EL MAXIMO HPH. NECESARIO PARA LIMPIAR EL FONDO, DEBAJO LA BROCA.

Análisis del método. - Si consideramos que la caída de presión en el sistema hidráulico de un equipo de perforación es:

$$P = K_1 Q^n.$$

donde,  $K_1$ , es una constante que varía con las dimensiones del hueco, de la tubería, peso de lodo, conexiones de superficie, etc. Y si para flujo turbulento ' $n$ ' es igual a 1.82. Entonces el gráfico de la caída de presión vs. el regimen de circulación a una profundidad dada, es una línea recta, que tiene una pendiente de 1.82, en un papel log-log.

Una graficación completa puede hacerse para varias profundidades, con una sola caída de presión y regimen de circulación, por el gráfico de estos puntos y trazando paralelas por estos puntos a la línea de pendiente 1.82. Cuando se tiene limitación de presión y hph. en superficie, se debe considerar como máxima caída de presión en el sistema el 35 por ciento de la presión de superficie, como

se demostró al hablar de hph. a la broca. Esto supone el empleo de máximas permisibles presiones de superficie.

Hasta ahora hemos considerado como presión máxima de trabajo de la bomba, 1,400 psi, con 300 hph. disponibles de nuestra bomba. se ha demostrado que el peso sobre la broca solamente puede incrementarse con incrementos en el regimen de limpieza del fondo. Por consiguiente, cualquier programa hidráulico práctico y eficiente debe estar basado en los requerimientos de limpieza del fondo, bajo un grupo de condiciones o bajo condiciones máximas de perforación.

El método que a continuación vamos a describir, basado justamente en los requerimientos de la broca, bajo condiciones del fondo, supone un planeamiento alternativo y progresivo de incrementos de la presión de superficie, conforme se profundiza el pozo, a fin de ~~mantener~~ mantener una constante y necesaria caída de presión a través de la broca, conservando siempre como coeficiente de eficiencia el 65 por ciento de la presión de superficie como caída de presión a través de la broca.

Nosotros creemos que un programa basado en estos prin cipios es el más eficiente, a fin de utilizar la energía de nuestro sistema hidráulico, en el máximo de limpieza del fondo, por otro lado, un programa así supone menor consumo de combustible de parte de los motores, puesto que el consumo de combustible de un

está motor/en relación directa con el hph. requerido.

Si consideramos 100 pies por hora como regimen de penetración constante a todo lo largo del pozo, podemos, según la fórmula de Eidelberg, necesitar 3.3 hph por pulgada cuadrada de hueco, como fuerza necesaria para remover los cortes del fondo, cada vez que son producidos por la broca.

Este programa, sólo hace uso de 240 hph. de la bomba, con el máximo regimen de circulación necesario, lo que redundará en beneficio de una mejor utilización de la bomba y con una presión máxima de superficie de 1,380 psi.

Descripción del método: - El procedimiento consiste en usar un papel log-log, que tenga trazado una línea con pendiente 1.82, y se procede de la siguiente manera.

- 1) Se llena la información de la parte superior de la tabla I, y se llena la parte inferior con las siguientes indicaciones.
- 2) Se determina una mínima velocidad anular, y se traza la línea correspondiente al galonaje en el papel log-log.
- 3) Sobre las líneas de hph. del papel se traza la línea del hph. máximo de trabajo de la bomba.
- 4) Sobre esta línea de hph máximo de trabajo se trazan las presiones alcanzadas por las diferentes camisas que puede usar la bomba, a sus regímenes de circulación.
- 5) Construya una línea paralela a la de hph máximo y que represente el 35 por ciento de las presiones de trabajo de la bomba.
- 6) Seleccione un volumen de circulación adecuado.

- 7) Determine las caídas de presión, por cada 1,000 pies para ese volumen de circulación, con ayuda de la tabla 1; grafique estos valores en el papel log-log.
- 8) Construya sobre los puntos graficados líneas paralelas a la línea de pendiente 1.82 para cada 1,000 pies, desde la línea de mínima velocidad anular hasta la línea de máximo hph de trabajo.
- 9) Del gráfico de los hph. requeridos para la limpieza del fondo, vemos que son necesarios 3.3 hph. por cada pulgada cuadrada de hueco, para un regimen de penetración de 100 pies por hora.
- 10) Multiplique el área de 7-7% por 3.3  $3.3 \times 47.8 = 160$  hph.
- 11) Hph. perdido en el sistema:  
 $1/2$  de 10 = 80 hph.
- 12) El hph de la bomba será igual a (10) - (11) = 240 hph.
- 13) Dibuje las líneas correspondientes a 80 y 240 hph.
- 14) Seleccione <sup>un</sup> diámetro de camisa adecuada, 5-1/2".
- 15) Proyecte el galonaje de esta camisa, hasta encontrar la línea de 80 hph. siga por esta línea hasta encontrar la línea de 6,500 pies, proyecte este punto verticalmente sobre la línea de 240 hph. Este punto indica la presión máxima de superficie de 1,380. Nótese que es menor que la presión máxima permisible. Las presiones de cada intersección de la línea trazada así, indica las caídas de presión el sis

tema con sus respectivos galonajes.

- 16) Usando el gráfico y según se indica en el anterior (15), llene la segunda parte de la parte inferior de la tabla I. Anotando los galonajes y las caídas de presión, así como los hph correspondientes a estas presiones y galonajes.
- 17) Sume los hph perdidos en el sistema con los hph. necesarios en la broca. Esto da el hph. necesario de la bomba por cada 1,000 pies.
- 18) Plotee cada uno de estos hph sobre el regimen de circulación respectivo.
- 19) Opuestos a cada valor de hph. anote las presiones que son las presiones de trabajo de la bomba.
- 20) Determine caídas de presión en la broca por la diferencia entre la presión de superficie y la caída de presión para cada 1,000 pies.
- 21) Determine del diagrama 2, las áreas de los chorros para estas caídas de presión y los galonajes respectivos en la broca. Este gráfico nos sirve también para planificar un programa basado en presiones de superficie constantes y máximos, procediendo de la siguiente manera.
  - 1.- A partir de la parte 8, determine el galonaje necesario por selección de una camisa adecuada.
  - 2.- Se anota las intersecciones de cada una de esta línea, con ca-



da una de las profundidades hasta llegar a la línea del 35 por ciento.

- 3.- A partir de esta línea se mantiene constante la presión y se anotan los galonajes respectivos hasta encontrar la línea de 6,500 pies.
- 4.- Se anotan los galonajes respectivos con sus caídas de presión en la tabla I.
- 5.- La diferencia entre la máxima presión de superficie y la caída de presión en el sistema determina la caída de presión en la broca.
- 6.- Con esta caída de presión en la broca seleccione los diámetros de los chorros del diagrama 2.

## V - ASPECTO ECONOMICO

- 1 - Programas Hidráulicos.
- 2 - Mantenimiento del lodo de perforación
- 3 - Mantenimiento y operación de bombas.
- 4 - Regímenes de Penetración.

1- Programas hidráulicos. - El problema técnico y económico de la perforación, es perforar un pozo en el menor tiempo posible y al menor costo, desde que incrementos en el tiempo de perforación se traducen en:

- Aumentos de jornales y gastos de supervisión por cada día que el equipo demore en perforar el mismo pozo.
- Aumento del costo de perforación.
- Aumento del costo de mantenimiento del equipo.
- Aumento en el costo de mantenimiento del lodo.

Los percances que se pueden encontrar como pegamientos, atrapamientos, pérdidas de circulación, reventones, aumentan con el tiempo de perforación.

- El costo de completación puede depender del tiempo de perforación, a causa de tener el pozo por largos períodos de tiempo sin tubería revestidora, que pueden causar problemas al bajar la tubería rebestidora.

Largos períodos de tiempo de perforación pueden efectar a

la productividad de una formación y la posibilidad de pasar por alto una formación productiva.

Por consiguiente es necesario disminuir el tiempo de perforación por el incremento del regimen de penetración de cada broca, y desde que una broca rinde más cuando los pesos que se aplican son los máximos permisibles en condiciones de perforación eficiente, de modo que la planificación de un programa hidráulico con excesos en cada una de las características que componen el sistema de circulación va a asegurar una eficiente limpieza del fondo del pozo, y por ende la aplicación de mayor peso sobre la broca incrementarán los regímenes de penetración y por consiguiente menor será el tiempo de perforación y menor el número de brocas usadas.

2 - Mantenimiento del lodo. - Como ya mencionamos las propiedades del lodo afectan las características del sistema de circulación a todo lo largo de la perforación, de allí que siempre es necesario una correcta valuación de cada una de ellas y de los problemas que se derivan del incremento de cada una de ellas.

como se observa de las tablas del comportamiento de la viscosidad, el valor promedio para los siete pozos perforados a profundidades de 6,000 a 6,500 pies, la viscosidad mínima fue de 60 segundos y que a partir de las formaciones Rica hasta Quemada la viscosidad del lodo se incrementa notablemente, sobrecargándose se la bomba al momento de comenzar la circulación. Lo primero

se debe indudablemente al hecho de que se dá preferencia a disminuir los regímenes de pérdida de filtrado con sacrificio de parte de filtrado con sacrificio de parte de la viscosidad, en zonas de lutitas, no obstante estos regímenes de filtrado nunca son menores de 4 ó 5 cc. por consiguiente parte de los derrumbes que se observan se debe a la pérdida por filtrado.

En cuanto a lo segundo, de acuerdo a las observaciones de la litología para esas formaciones, se sabe que existen en la zona de Organos justamente en esas formaciones lentes y mantos de carbonatos y sulfatos de calcita, lo que contaminan el lodo e incrementan notablemente la viscosidad.

Si observamos la tabla 1, del consumo de diesel, en la preparación y mantenimiento de lodos emulsionados en los siete pozos perforados, vemos que el promedio empleado es de 16,440 galones, si sabemos que un galón de diesel cuesta 3 soles más o menos el total del costo de diesel empleado en un solo pozo es de 49,320 soles, cantidad bastante apreciables para un sólo pozo. De aquí que sea necesario usar las ventajas derivadas del uso del diesel al máximo, en cada una de las diferentes formaciones al mismo tiempo que tener en cuenta las variaciones de las propiedades del lodo que están sujetas a los efectos del diesel como el peso y el ph, si observamos detenidamente ~~las~~ tas tablas del comportamiento del lodo de los siete pozos, vemos que los decrecimientos del peso, están en función directa del incremento de diesel en el lodo

de modo que la cantidad de baritina usada están en función de la disminución del peso del lodo por efectos de diesel. Entonces, siempre que se perforan un pozo debe programarse aproximadamente los porcentajes de diesel a ser usado en cada formación, de acuerdo a la experiencia, a la litología de la formación, a las pruebas de laboratorio, disminuyéndose así grandemente los costos de mantenimiento de lodo.

### 3 - Mantenimiento y operación del equipo Hidráulico. -

En la perforación rotaria grandes incrementos del regimen de penetración han sido obtenidos de la aplicación de brocas yet, este incremento está relacionado a las hph. disponibles en las bombas de lodo, del volumen desplazado por ella y de las velocidades de las aberturas con adecuadas cantidades de fuerza disponibles en el fondo.

Por consiguiente, el empleo de brocas yet, exige cada vez mayores incrementos del hph. de sus bombas, de modo que grandes consumos de hph. requieren el consumo de incrementos en el combustible, este factor es importante, puesto que si nos fijamos en la tabla 1, 26,540 galones de diesel fueron consumidos por los motores del equipo, de los cuales 17,700 galones fueron usados en los 4 motores de las bombas de lodo. Por otro lado el aumento de mayores hph. en las bombas supone problemas relativos a mantenimiento de piezas, problemas que varían desde frecuentes reemplazos de pistones y válvulas hasta ruptu-

ras de camisas, por incrementos de la presión en las bombas con lodos erosivos.

Pero si bien es cierto, incrementos del hph de las bombas supone incrementar los problemas que se pueden encontrar en una bomba y mayor consumo de combustible; el incremento en el regimen de penetración van a compensar ampliamente todos estos problemas. De otro lado este incremento en el consumo de diesel en los motores será compensado por una adecuada utilización del diesel en el mantenimiento del lodo si se conservan las especificaciones que se indican.

Quizas algunos costos adicionales como la compra de desarenadores, y el empleo de material más resistente en cada una de las piezas que componen los diferentes elementos del sistema hidráulico van a causar problemas económicos iniciales en un programa hidráulico con máximos hph disponibles de bombas, pero los resultados en términos de mayor penetración por broca compensarán grandemente esta circunstancia.

4 - Regimen de Penetración. - El regimen de penetración de una formación específica, está definida por la dureza de la formación, tipo de broca, peso sobre la broca, velocidad de rotación, propiedades del lodo y las características del sistema de circulación.

El factor que mayor afecta el regimen de penetración es el peso sobre la broca, en términos de eficientes valores de los demás factores, en especial de la limpieza del fondo, pues sólo es

posible incrementar el peso sobre la broca cuando un a buena lim pieza del fondo se está haciendo por la circulación del lodo, pues de lo contrario se está empaquetando la broca.

Si observamos la figura 1, podemos ver que cuando el hph. de la bomba fué de 100 a 200, los regímenes de penetración sólo fueron de 20 y 40 pph., y continuos incrementos del hph de las bombas incrementan linealmente los regímenes de penetración, en términos de mayor peso aplicado a la broca.

Nuestro programa hidráulico, incrementa el hph. de la bomba a 240 obtenidos de la capacidad de las bombas, por consiguiente, el regimen de penetración debe aumentar si se reconsi deran los actuales pesos en uso sobre la broca en términos de mayor peso.

Si observamos la tabla 2, para las formaciones hasta 4,000 pies, vemos que los buzamientos promedios son de 15° y 30°, con esos buzamientos es posible el incremento del peso hasta 32,000 lbs. con una desviación aceptable de 5°.

Para las formaciones de 4,000 pies hasta 6,500 pies el buzamiento promedio es de 15°. Por consiguiente en esta formación se puede incrementar el peso hasta 46,000 lbs. con una desviación máxima de 6 grados. Esta tabla se ha hecho en uso de las tablas que dan para el efecto H. B. Woods y Arthur Lubinsky.

De modo que si podemos incrementar el peso sobre la broca, el regimen de penetración será mucho mayor para cada

T A B L A - I

<u>Pozo</u>	Profundidad	Diesel consumido p' los motores.	<u>diesel agregado al lodo.</u>
255	6,170	34,950	11,850
258	6,500	20,670	16,630
259	6,130	23,900	14,280
251	6,500	26,970	18,730
262	6,504	30,000	20,000
263	6,500	19,800	18,600
264	6,500	29,500	15,000

Promedio de galones de diesel empleados en los motores  
26,540.

Promedio de galones de diesel empleados en el lodo  
16,440.



T A B L A - I I

Pesos sobre la broca.

De 0 a 4,00 pies de profundidad.

Buzamiento promedio 15° y 30°

Pesos aplicados: 16,000 y 20,000 libras.

Desviación máxima observada para esos pesos: 2°

Pesos aplicables para un buzamiento promedio de 15°.

Desviación máxima 3° 22,000 libras

" " 4° 27,000 "

" " 5° 32,000 "

Pesos aplicables para un buzamiento promedio de 30°

Desviación máxima 3° 17,000 libras.

" " 4° 22,000 "

" " 5° 24,000 "

De 4,000 a 6,500 pies de profundidad.

Buzamiento promedio 15°

Pesos aplicados : 24,000 y 28,000 libras.

Desviación máxima obtenida con esos pesos: 3°

Pesos aplicables para un buzamiento de 15°

Desviación máxima de 4° 36,000 libras

" " 5° 41,000 "

" " 6° 46,000 "

broca y el tiempo de perforación será menor, por consiguiente esto disminuirá los días netos de perforación y la cantidad de brocas usadas. Todo esto redundará en la disminución del costo de perforación.

### CONCLUSIONES

#### A. - Lodo de Perforación.

El peso del lodo tiene influencia en la caída de presión en el sistema con flujo turbulento y sobre el régimen de penetración.

La viscosidad decrece los regímenes de penetración y aumenta la tendencia al empaquetamiento.

Un rango de peso de 9.5 a 11 no afecta mayormente en la caída de presión.

Altos regímenes de filtrado aumentan los regímenes de penetración.

Lodos emulsionados contribuyen a mantener ciertas propiedades del lodo como filtrado y tolerancia a las contaminaciones dentro de valores adecuados, pero tienden a decrecer otras propiedades como el peso y ph. y a incrementar la viscosidad, cada una de estos efectos está en proporción

directa con el porcentaje de diesel en el lodo.

B. - Presión de descarga de las bombas.

El incremento del hph. de la bomba incrementa la caída de presión a través de la broca, con lo que se incrementa el regimen de penetración.

La pérdida de presión en el sistema varía con las dimensiones de la tubería y del hueco, con el volumen de circulación y con el peso de lodo.

La caída de presión en el sistema hidráulico de un equipo de perforación, está en proporción directa con el cuadrado del volumen del regimen de circulación.

En un sistema hidráulico, la potencia es proporcional a cubo del volumen de circulación.

La caída de presión máxima en el sistema, para un programa hidráulico eficiente es la tercera parte de la presión de superficie.

C. - Limitación de presión en superficie:

Máximas presiones permisibles económicamente en superficie dan mayores incrementos en las caídas de presión a través de la broca, con lo que se incrementa el regimen de penetración por efectos de una mejor limpieza de fondo.

La máxima presión permisible para las condiciones del equipo hidráulico disponible es 1,400 psi.

D. - Regimen de circulaci3n:

a- El flujo del lodo en el sistema hidr3ulico de un equipo de perforaci3n es turbulento.

b- El 3ptimo regimen de circulaci3n varfa con las dimensiones de la tuberfa y del hueco, peso de lodo, presi3n de superficie y capacidad de la bomba.

c- El volumen de cortes desalojados del fondo est3n en proporci3n con el volumen de circulaci3n.

d- El 3ptimo regimen de circulaci3n para los requerimientos del bloque "X", es de 365 gpm.

E. - Velocidad de Retorno en el espacio anular:

a- La velocidad anular depende del volumen del regimen de circulaci3n del espesor y regularidad del espacio anular, de las propiedades del lodo y con el tipo de flujo.

b- La velocidad anular varfa para cada tipo de formaci3n de acuerdo a su peso especfico, a su forma y tama1o, en funci3n del espesor del anillo.

c- La velocidad anular no tiene efecto sobre el regimen de penetraci3n.

d- La velocidad mfnima para un pozo de 7-7/8" y ca1erfa de 4-1/2", es de 140 pies por minuto, la velocidad mfnima de trabajo en el bloque "X" en condiciones de viscosidad altas, es de 180 pies por minuto, y la velocidad 3ptima de trabajo

para el bloque 'X' es de 215 pies por minuto.

F. - Velocidad en las aberturas de la broca:

a- La velocidad en las aberturas de la broca, depende del volumen de circulación, de la cantidad de fuerza disponible en la broca y de su diámetro.

b- la velocidad en las aberturas siempre debe considerarse con valores máximos.

c- La velocidad de las aberturas para los requerimientos del bloque 'X', debe ser como mínimo 260 pies por segundo con una velocidad de aberturas de trabajo de 300 pies por segundo, con el siguiente programa de aberturas:

1000      0.40      1 - 7/16      2 - 13/32.

2000      0.40      1 - 7/16      2 - 13/32.

3000      0.40      3 - 13/32

4000      0.33      3 - 3/8

5000      0.32      3 - 3/8

6000      0.31      1 - 11/32      2 - 3/8

6500      0.30      1 - 3/8      2 - 11/32

G. - Hph. a la Broca:

a- El hph. a la broca varía con el regimen de circulación, con la presión de superficie, con las dimensiones de la tubería<sup>y</sup> del hueco.

b- Bajo óptimas condiciones la caída de presión a la broca

debe ser las dos terceras partes de la presión de superficie.

c- Incrementos en el hph. de la broca incrementan proporcionalmente el regimen de penetración si se incrementan los pesos sobre la broca.

Por consiguiente, máxima fuerza hidráulica se podrá obtener en fondo cuando:

- 1 - El diámetro de la tubería sea lo más grande posible.
- 2 - El peso del lodo sea el menor pero seguro posible.
- 3 - La presión de superficie son la máxima permisible económicamente.
- 4 - La caída de presión en el sistema son  $1/3$  de la presión de superficie y las  $2/3$  partes restantes disponibles para la caída de presión a través de la broca.
5. - El regimen de circulación mínimo posible, pero que desarrolle altas velocidades en las aberturas y en el espacio anular.
- 6 - La cantidad de fuerza disponible en el fondo sólo puede incrementar el regimen de penetración si incrementos en el peso de la broca son hechos.

Los O' ganos, Marzo de 1964.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- PLASTICO FLOW PROPERTIES OF DRILLING FLUIDS.  
J.C. Melrose y W.B. Lilenthal.
- 2.- COMPOSITION AND PROPERTIES OF OIL WELL DRILLING FLUIDS.- Walter F. Rogers.
- 3.- SELECTED READING DRILLING MUD.  
Magnet Cove Barium Corp.
- 4.- MUD FLOW PROPERTIES AND THEIR APLICATION TO MUD HIDRAULICS.- Paul Gilkeson.
- 5.- OIL WELL DRILLING TECHNOLOGY.  
McCray & Cole.
- 6.- ROTARY DRILLING HANDBOOK.  
J. E. Brantley.
- 7.- DRILLING AND PRODUCTION PRACTICE.  
Varios Números.
- 8.- WORLD OIL.  
Varios Números.
- 9.- OIL AND GAS JOURNAL.  
Varios Números.
- 10.- JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY.  
Varios números.
- 11.- PETROLEO INTERAMERICANO.  
Varios números.
- 12.- PETROLEUM ENGINEER.  
Varios números.

13.- PETROLEUM PRODUCTION ENGINEERING.  
Uren.

14.- ELEMENTARY FLUID MECHANICS.  
Jhon K. Vennard.

15.- INFORMES Y MEMORIAS DEL DEPARTAMENTO  
DE PERFORACION.

1964.