

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**



**COMPORTAMIENTO DE LA PRESION  
PARA EL CONTROL DE BROTES  
EN POZOS PETROLEROS**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO PETROLERO**  
P R E S E N T A:  
**JORGE ARTURO LAZO GARZA**

MEXICO, D.F.

1991





## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## C O N T E N I D O

	PAGINA
.INTRODUCCION . . . . .	1
+ Tema del trabajo . . . . .	1
+ Objetivo . . . . .	1
+ Justificación . . . . .	2
.CAPITULO UNO	
CONCEPTOS BASICOS EN EL CONTROL DE BROTES . . . . .	3
+ Presión hidrostática . . . . .	4
+ Concepto de tubo en U . . . . .	6
+ Presión al cerrar un pozo . . . . .	8
+ Transmisión de la presión . . . . .	9
+ Etapas de control . . . . .	11
.CAPITULO DOS	
ANALISIS DE UN INTENTO DE BROTE . . . . .	13
+ Densidad del fluido invasor . . . . .	14
+ Comportamiento del gas . . . . .	16
+ Reglas para mantener el control de los pozos . . . . .	22

<b>.CAPITULO TRES</b>	
<b>HIDRAULICA DE LA PERFORACION . . . . .</b>	<b>30</b>
+ Pérdidas de presión en el sistema de circulación	31
+ Gasto y presión reducidos de circulación	48
<b>.CAPITULO CUATRO</b>	
<b>METODOS DE CONTROL DE BROTES . . . . .</b>	<b>50</b>
+ Método del perforador	51
+ Método del ingeniero	61
+ Colapso de la burbuja de gas	65
+ Técnica de control de la presión en la tubería de perforación	68
+ Técnica de control de la presión en el espacio anular	70
<b>.CAPITULO CINCO</b>	
<b>TOLERANCIA Y LIMITACIONES EN UN INTENTO DE BROTE . . . . .</b>	<b>73</b>
+ Tolerancia al intento de brote	75
+ Limitaciones de la tolerancia al intento de brote	79
+ Corrección a la elevación del fluido invasor	81
+ Método gráfico para obtener la tolerancia al intento de brote	88
<b>.CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>.BIBLIOGRAFIA . . . . .</b>	<b>99</b>

## INTRODUCCION

### TEMA DEL TRABAJO

El control de pozos es una materia de vital importancia en la perforación, por lo que es necesario conocer y entender en forma amplia y adecuada su aplicación. El mejor camino para tener éxito en el control de pozos es desarrollar un conocimiento firme y claro de la materia y de sus principios, dentro de los cuales, los que más destacan por su importancia son la relación de la presión contra su respectiva profundidad, así como sus consecuentes efectos en los pozos.

En este trabajo se describirán las causas de los intentos de brote, su comportamiento y los efectos que estos producen. Se analizarán los métodos y procedimientos de control, los equipos utilizados para ello, y se resolverán ejemplos de aplicación práctica.

### OBJETIVO

El objetivo del trabajo es mostrar cómo actúan las presiones dentro de un sistema de perforación cuando ocurre un intento de brote. Se ha recopilado un gran número de experiencias sobre el tema que se presentan en forma secuencial para obtener el mejor conocimiento del comportamiento de la presión en el pozo, a fin de mantener su control y perforar a profundidades mayores en forma rápida y segura, y por supuesto, al menor costo posible.

## JUSTIFICACION

Un brote puede ocasionar la pérdida de vidas humanas, de equipo, de los hidrocarburos que se derraman y de los que se incorporan a la atmósfera provocando contaminación, además de la pérdida de tiempo y hasta la posible pérdida del pozo. Estas pérdidas, y las complicaciones que acarrea un brote son aún mayores si se trata de un pozo marino; por ello, es conveniente estar lo mejor preparado posible para poder resolver con éxito el problema de un intento de brote y evitar las pérdidas que éste puede ocasionar al quedar descontrolado un pozo.

Los casos de descontrol de pozos en el mundo son frecuentes. En México se han presentado últimamente varios casos tanto en campos marinos como terrestres. Así que el estudiar las causas, los efectos, y los métodos de control de brotes, es de gran importancia y actualidad.

## CAPITULO UNO

### CONCEPTOS BASICOS EN EL CONTROL DE BROTES

- ♦ PRESION HIDROSTATICA
- ♦ CONCEPTO DE TUBO EN U
- ♦ PRESION AL CERRAR UN POZO
- ♦ TRANSMISION DE LA PRESION
- ♦ ETAPAS DE CONTROL

### PRESION HIDROSTATICA

La presión hidrostática es tan importante en todas las operaciones de control de pozos que es imprescindible conocerla para entender dónde y cómo se aplica. Por definición, es la presión ejercida por una columna de fluido debido a su densidad y altura vertical, y se expresa normalmente en kg/cm<sup>2</sup> o lb/pg<sup>2</sup>.

$$PH \text{ (kg/cm}^2\text{)} = \frac{D \text{ (m)} \delta \text{ ( g/cm}^3\text{)}}{10}$$

$$PH \text{ (lb/pg}^2\text{)} = D \text{ (pies)} \delta \text{ (lb/gal)} 0.052$$

donde:

PH = Presión hidrostática.

D = Profundidad.

δ = Densidad.

Las constantes 1/10 y 0.052 serán diferentes si se usan otras unidades. La figura 1.1 (Fig. 1.1) muestra la variación de presión hidrostática contra profundidad para lodos de diferente densidad.

Para el caso de pozos direccionales la profundidad a considerar es la profundidad vertical y no la profundidad desarrollada. Por lo tanto deberá convertirse la profundidad desarrollada a profundidad vertical antes de determinar la presión hidrostática apropiada, (Fig. 1.2).



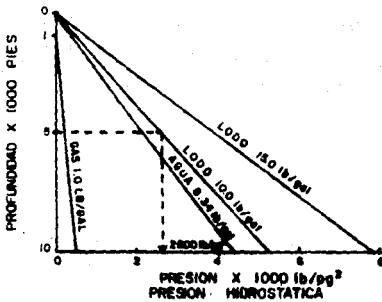


FIG.1.1. LA PRESION HIDROSTATICA, A UNA PROFUNDIDAD DADA, VARIA CON LA DENSIDAD DEL FLUIDO EN EL POZO.

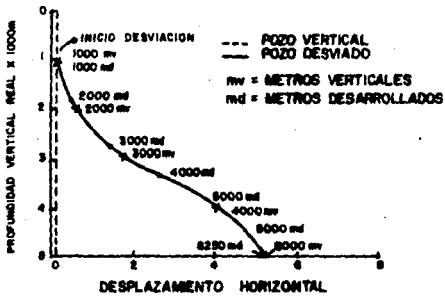


FIG.1.2. PARA DETERMINAR LA PRESION HIDROSTATICA EN POZOS DIRIGIDOS SE USA LA PROFUNDIDAD VERTICAL, NO LA PROFUNDIDAD DESARROLLADA.

## CONCEPTO DE TUBO EN U

Para facilitar la representación visual de las presiones en el espacio anular y en la sarta de perforación se estableció el concepto de tubo en U (Fig. 1.3), que representa al espacio anular y al interior de la tubería de perforación. La barrena se localiza en el fondo. El concepto de tubo en U despreja cambios en el espacio anular debidos a lastrabarrenas o a cambios en el diámetro del agujero. De cualquier forma, mientras la densidad dentro de la sarta de perforación sea la misma que en el espacio anular, existirá un nivel constante de equilibrio y la presión hidrostática será idéntica dentro de la tubería de perforación o en el espacio anular a cualquier profundidad. Esto indica que lo que ocurre en un lado del tubo en U se reflejará en el otro lado. Si se llena el tubo en U con un fluido de la misma densidad y se cierra uno de los extremos, cuando se aplica presión las lecturas de presión en ambos lados del sistema serán iguales.

Si se tiene un fluido de densidad constante en la tubería de perforación, y se permite que entren dos o mas fluidos de diferente densidad al espacio anular, al aplicarse presión en el fondo las lecturas de presión en el espacio anular y en la sarta de perforación serán diferentes. Sin embargo, si se cierra el tubo en U, se tendrá la misma presión en el fondo por la combinación de presiones y fluidos en cada lado del tubo en U.

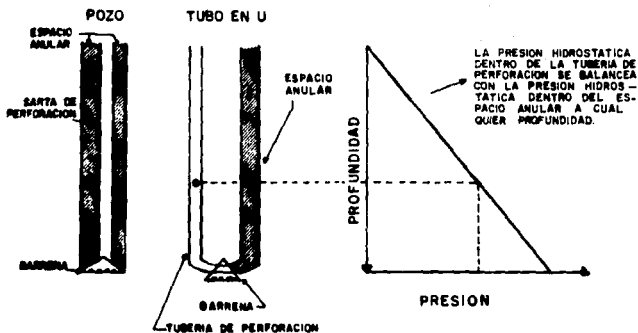


FIG.1.3. EL CONCEPTO DE TUBO EN U MUESTRA LA RELACION DE PRESIONES ENTRE LA TUBERIA DE PERFORACION Y EL ESPACIO ANULAR.

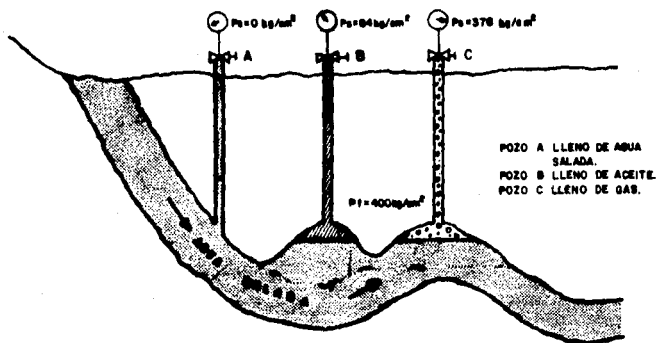


FIG.1.4. COMPORTAMIENTO DE LAS PRESIONES EN UN YACIMIENTO.

### PRESION AL CERRAR UN POZO

Para entender el comportamiento de las presiones en un yacimiento se analizará la Fig. 1.4. En la figura se simula una formación con tres pozos, perforados a la misma profundidad pero alcanzando distintos fluidos. En el pozo A se tiene agua, en el pozo B aceite y gas disuelto, y en el pozo C gas, la presión de la formación es de 440 kg/cm<sup>2</sup>.

Para el pozo A:

Profundidad = 4000 m

Densidad del fluido (agua) = 1.1 g/cm<sup>3</sup>

$$PH = \frac{4000 \text{ (m)} \cdot 1.1 \text{ ( g/cm }^3)}{10} = 440 \text{ kg/cm}^2$$

En este caso la presión hidrostática se iguala con la presión del acuífero obteniendo una presión manométrica en la superficie de 0 kg/cm<sup>2</sup>.

Para el pozo B:

Profundidad = 4000 m

Densidad del fluido (aceite) = 0.89 g/cm<sup>3</sup>

$$PH = \frac{4000 \text{ (m)} \cdot 0.89 \text{ ( g/cm }^3)}{10} = 356 \text{ kg/cm}^2$$

La presión en la superficie a pozo cerrado es de 84 kg/cm<sup>2</sup>.

$$Ps = Pf - PH = 440 - 356 = 84 \text{ kg/cm}^2$$

donde:

Ps = Presión en superficie.

Pf = Presión en la formación.

Para el pozo C:

Profundidad = 4000 m

Densidad del fluido (gas) = 0.16 g/cm<sup>3</sup>

$$PH = \frac{4000 \text{ (m)} \cdot 0.16 \text{ ( g/cm }^3 \text{ )}}{10} = 64 \text{ kg/cm}^2$$

La presión en la superficie de 376 kg/cm<sup>2</sup>.

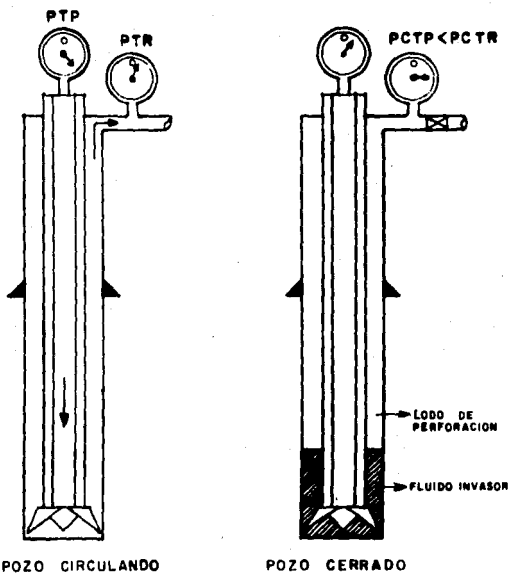
$$Ps = Pf - PH = 440 - 64 = 376 \text{ kg/cm}^2$$

Al cerrar en la superficie un pozo, el intervalo aportador seguirá fluyendo hasta que la presión hidrostática y la presión de formación se equilibren y estabilicen. La presión de cierre será el resultado de la diferencia de la presión hidrostática y la presión de formación.

En la mayoría de los casos, la presión de cierre en la tubería de revestimiento será mayor que la presión de cierre en la tubería de perforación. Esto se debe a que es más fácil que los fluidos de la formación fluyan al espacio anular, desplazando al lodo y disminuyendo su columna hidrostática, ver Fig. 1.6.

#### TRANSMISION DE LA PRESION

Cuando se aplica una presión, ésta se transmite integralmente a cualquier otra parte del sistema. Si dicha presión se aplica en el espacio anular se transmitirá a través de todo el sistema y será registrada en el manómetro del tubo vertical como una presión adicional.



**FIG. 1.8. PRESION AL CERRAR UN POZO EN CASO DE UN INTENTO DE BROTE.**

Los pulsos de presión se transmiten con la velocidad del sonido en el fluido. Si se estrangula la descarga de fluidos, aumentará la presión, sin embargo la respuesta tendrá un retraso en tiempo de algunos segundos debido al tiempo de transmisión; la presión continuará ascendiendo aún si el estrangulador se abre rápidamente, esto debido al tiempo de retraso.

### ETAPAS DE CONTROL

Existen tres etapas de control que nos definen el tipo de problema que se tiene por solucionar, y son las siguientes:

**CONTROL PRIMARIO.** En esta etapa, la presión hidrostática es por lo menos tan grande como la presión que ejercen los fluidos de la formación en cualquier punto del pozo. El control se establece únicamente con la presión hidrostática ejercida por el fluido de perforación.

Se puede perder el control primario en los casos siguientes:

a) Al perforar una formación que tenga una presión más alta que la presión hidrostática del lodo empleado. Esto también puede ocurrir cuando:

. Se permite que disminuya la densidad del lodo.

. Si no se logra tener el pozo lleno al sacar la tubería de perforación.

b) Ejerciendo una presión suficiente para romper la formación permitiendo la pérdida del lodo. Esto puede ocurrir cuando:

. Se aumenta la densidad del lodo indiscriminadamente teniendo una presión hidrostática mayor que la presión de fracturamiento de la formación.

. Si se introduce tubería rápidamente permitiendo que surjan presiones adicionales sobre la formación.

La pérdida de fluido hacia la formación puede provocar que el nivel de éste caiga hasta el punto en que la presión hidrostática se reduzca por debajo de la presión de formación, entrando los fluidos de ésta al pozo.

**CONTROL SECUNDARIO.** Esta etapa comienza cuando se pierde el control en la primer etapa. Se requiere, por lo tanto, alguna forma adicional de control en la superficie como lo siguiente: puede cerrarse el pozo con el objeto de igualar la presión de la formación a una presión formada por la combinación de la presión hidrostática, más una presión que se acumula en la cabeza al cerrar el pozo en la superficie. Puede circularse el lodo para remover los fluidos introducidos o aumentar la densidad del lodo de perforación. Esta segunda etapa de control puede perderse si se aplica una presión inadecuada contra la formación.

**CONTROL TERCIARIO.** La tercer etapa de control tiene lugar cuando se pierde el control de la segunda etapa y los fluidos de la formación entran al pozo desplazándose sin control hacia la superficie. A partir de este momento, y en base a un conocimiento claro de la materia, deberá aplicarse el método adecuado para regresar a la segunda o primer etapa de control.



## CAPITULO DOS

### ANALISIS DE UN INTENTO DE BROTE

- ♦ DENSIDAD DEL FLUIDO INVASOR
- ♦ COMPORTAMIENTO DEL GAS
- ♦ REGLAS PARA MANTENER EL CONTROL DE LOS POZOS

### DENSIDAD DEL FLUIDO INVASOR

Es deseable saber antes de empezar el procedimiento de control, si el fluido invasor es probablemente gas, aceite, agua salada, o una combinación de estos. La diferencia de la respuesta en la presión del espacio anular, entre un intento de brote de gas y uno de agua salada será pequeña en un principio. Si el fluido es gas ocurrirán mayores efectos de expansión entre más cerca esté el gas de alcanzar la superficie.

La densidad del fluido invasor se determina como sigue:

$$\delta_{fi} = \delta - \frac{(PCTR - PCTP)}{0.052 D_{fi}}$$

donde:

$\delta_{fi}$  = Densidad del fluido invasor (lb/gal).

$\delta$  = Densidad del lodo (lb/gal).

PCTR = Presión de cierre en la tubería  
de revestimiento (lb/pg<sup>2</sup>).

PCTP = Presión de cierre en la tubería  
de perforación (lb/pg<sup>2</sup>).

$D_{fi}$  = Altura del fluido invasor (pies).

Valores de 0.4 o menores, o aún, un valor negativo indicará la presencia de gas. Un valor mayor a ocho indicará agua salada. Valores intermedios representarán combinaciones de agua, aceite y/o agua salada. No obstante en cualquier caso por seguridad, siempre se supondrá que hay presencia de gas.

El incremento en el volumen en la presa de lodos dará una indicación del volumen de fluido invasor, a partir del cual se puede determinar su altura o longitud si se conoce la capacidad del espacio anular.

$$Dfi = \frac{Vfi}{\text{Cap.e.a.}}$$

donde:

$Vfi$  = Volumen del fluido invasor.

$\text{Cap.e.a.}$  = Capacidad del espacio anular.

Hay que tomar en cuenta que las capacidades del espacio anular varían dependiendo de si se tiene agujero descubierto o tubería de revestimiento, de la tubería de perforación y de los lastrabarreras.

#### COMPORTAMIENTO DEL GAS

El comportamiento del gas está dado por las leyes de Boyle y Charles combinadas del modo siguiente:

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{Z_2 T_2} \quad \dots (2.1)$$

Enunciadas estas leyes en forma simple nos dicen: una masa dada de gas bajo una presión o temperatura dadas, ocupan un volumen definido y calculable;  $Z$  es el factor de compresibilidad que es dependiente de la composición del gas y también de la temperatura y la presión. Esa misma masa de gas, si se confina bajo una presión y temperatura diferentes, ocupará un volumen calculable el cual puede ser diferente del primero.

En aplicaciones de campo, el efecto de los cambios del factor de compresibilidad, normalmente de 0.8 a 1.2 no son tan significativos como los cambios en la presión y el volumen, los cuales pueden ser más de varias veces su magnitud. Del mismo modo cuando se usan las temperaturas absolutas

$$^{\circ}R = 460 + ^{\circ}F$$

$$^{\circ}K = 273 + ^{\circ}C$$

un cambio de una temperatura del yacimiento de 180 °F (640 °R) a la temperatura en la superficie de 60 °F (520 °R), representa solamente un cambio en temperatura absoluta aproximado al 20% el cual no es significativo si se le compara con un cambio en el volumen debido a la presión. Por lo tanto la ley simple del gas, en cuanto al control del pozo se refiere, establece que la presión y el volumen son inversamente proporcionales

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots (2.2)$$

En muchos casos esta ecuación basta para estimar el comportamiento del gas. Sin embargo lo más próximo a la realidad se obtiene cuando se usa toda la información de que se dispone.

Ejemplo 1.

Suponga que se está perforando un pozo con las siguientes condiciones

- + Profundidad = 10000 pies
- + Volumen del lodo desplazado por la invasión del gas de la formación = 30 bl
- + Densidad del lodo = 10 lb/gal
- + Capacidad del espacio anular = 0.03 bl/pie
- + Presión en el yacimiento = 6200 lb/pg<sup>2</sup> abs.

La longitud de la burbuja de gas es :

$$D_{fi} = \frac{V_{fi}}{\text{Cap.e.s.}} = \frac{30 \text{ bl}}{0.03 \text{ bl/pie}} = 1000 \text{ pies}$$

A la mitad del camino a la superficie y con el pozo abierto la presión hidrostática sobre el gas sería:

$$PH = 5000 \text{ (pies)} \cdot 10 \text{ (lb/gal)} \cdot 0.052 = 2600 \text{ lb/pg}^2$$

y el volumen que éste ocuparía

$$V = \frac{2600 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \cdot 30 \text{ (bl)}}{2800 \text{ (lb/pg}^2\text{)}} = 71.5 \text{ bl}$$

a 2500 pies

$$PH = 2500 \text{ (pies)} \cdot 10 \text{ (lb/gal)} \cdot 0.052 = 1300 \text{ lb/pg}^2$$

$$V = \frac{2600 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \cdot 30 \text{ (bl)}}{1300 \text{ (lb/pg}^2\text{)}} = 143 \text{ bl}$$

A esta profundidad el gas habrá aumentado cuatro veces. Cada vez que la presión disminuya a la mitad el volumen se duplica. Al llegar el gas finalmente a la superficie (14.7 lb/pg<sup>2</sup>) los 30 bl se habrán expandido a:

$$V_{aup} = \frac{2600 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \cdot 30 \text{ (bl)}}{14.7 \text{ (lb/pg}^2\text{)}} = 12653 \text{ bl}$$

Esta cantidad es mayor que el volumen del espacio anular el cual será desalojado y el pozo quedará descontrolado.

Ejemplo 2

Suponga el siguiente caso:

- + Profundidad del pozo = 15000 pies
- + Presión en el fondo = 10000 lb/pg<sup>2</sup> abs.
- + Volumen desplazado de lodo = 20 bl
- + Densidad relativa del gas = 0.6
- + Temperatura en el fondo = 250 °F
- + Presión en la superficie = 14.7 lb/pg<sup>2</sup>
- + Temperatura en la superficie = 80 °F

Calcular el volumen en la superficie suponiendo que se permite la expansión del gas usando:

- a) La ecuación simple del gas
- b) Todas las variables de que se dispone

Solución:

a)

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{10000 \text{ (lb/pg}^2\text{)} 20 \text{ (bl)}}{14.7 \text{ (lb/pg}^2\text{)}}$$

$$V_2 = 13605 \text{ bl}$$

b)

$$\frac{P_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{P_2 V_2}{Z_2 T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1 V_1 T_2 Z_2}{T_1 P_2 Z_1}$$

para obtener el valor de Z se siguen los siguientes pasos:

• Obtener la presión y temperatura pseudocríticas a partir de la densidad relativa del gas, (Fig. 2.1).

$$T_{pc} = 359 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$P_{pc} = 671 \text{ lb/pg}^2$$

• Obtener la presión y temperatura reducidas

$$T_r = \frac{T}{T_{pc}} = \frac{250 + 460}{359} = 1.978$$

$$P_r = \frac{P}{P_{pc}} = \frac{10000}{671} = 14.903$$

• Obtener Z de una gráfica del factor de compresibilidad como la de la figura 2.2.

$$Z = 1.4$$

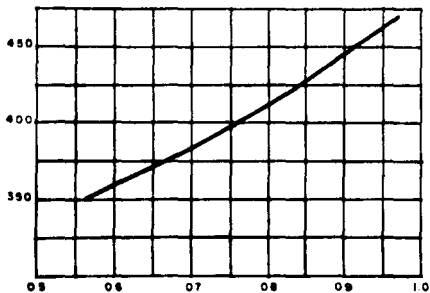
Z a condiciones atmosféricas es igual a 1, por lo tanto:

$$V_2 = \frac{10000 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \cdot 20 \text{ (bl)} \cdot 540 \text{ (}^\circ\text{R)} \cdot 1}{710 \text{ (}^\circ\text{R)} \cdot 14.7 \text{ (lb/pg}^2\text{)} \cdot 1.4} = 7391 \text{ bl}$$

En situaciones reales, cuando no se sabe la densidad relativa del gas, se supondrá ésta entre 0.6 y 0.7. Estos valores son los más comúnmente encontrados. En el caso de contar con una calculadora programable podrá obtenerse el valor de Z a partir de correlaciones y por tanto, obtener un resultado inmediato conociendo los datos del pozo.

TEMPERATURA PSEUDO CRITICA

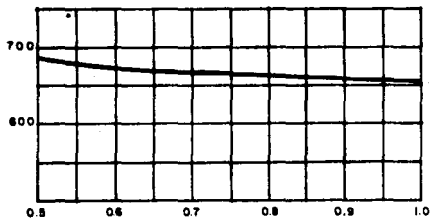
$^{\circ}R = ^{\circ}F + 460$



DENSIDAD RELATIVA DEL GAS

PRESION PSEUDO CRITICA

lb / P<sub>g</sub><sup>2</sup> abs.



DENSIDAD RELATIVA DEL GAS

FIG. 2.1. PROPIEDADES PSEUDOCRITICAS DE LOS GASES NATURALES.





Del ejemplo se nota que la ecuación simple del gas (Ec.2.2) nos dá un error demasiado alto comparado con la Ec.2.1. A menudo se descarta esta diferencia diciendo que representa un factor de seguridad. Sin embargo, si se aplican factores de seguridad adicionales, puede resultar que se sobrestime el tamaño del equipo de protección de brotes y otros componentes del equipo superficial, provocando gastos de inversión innecesarios.

En la realidad, el gas se moverá como un serpentín a través del lodo y la predicción del comportamiento del gas será solamente teórica. Este cálculo representará la peor condición posible y esto es importante cuando se consideran las acciones a seguir.

#### REGLAS PARA MANTENER EL CONTROL DE LOS POZOS

Lo antes visto conduce a la primer regla para el control de los pozos:

Si el pozo puede cerrarse, hay que hacerlo tan rápido como sea posible, de manera que solamente entre una mínima cantidad de fluido invasor al pozo.

La Fig. 2.3 muestra el aumento en el volumen del gas a medida que éste se aproxima a la superficie bajo una expansión no controlada.

El cambio en el volumen es muy pequeño cerca del fondo. La mayor expansión ocurre cerca de la superficie. Los perfiles de presión en el espacio anular, a medida que el gas se acerca a la superficie sin control, y suponiendo que no hay más invasión del fluido de la formación, se muestran en la Fig. 2.4.

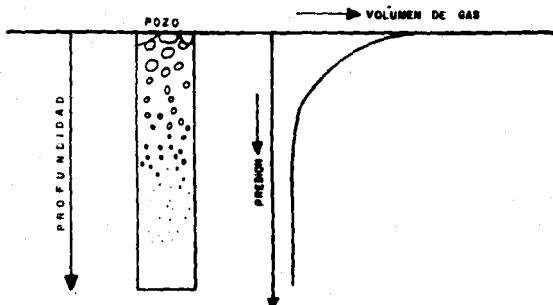


FIG. 2.3. EXPANSION DEL GAS EN EL POZO.

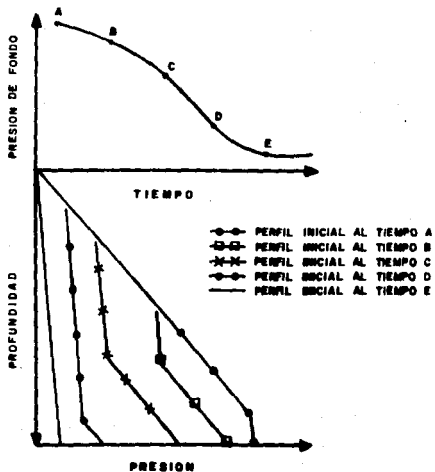


FIG. 2.4. PERFILES DE PRESION DE LA EXPANSION DEL GAS EN EL ESPACIO ANULAR A DIFERENTES TIEMPOS.

La reducción en la presión de fondo bajo estas condiciones se muestra en la misma figura. Por supuesto, mucho antes de que el gas alcance la superficie, el pozo fluye descontrolado.

Antiguamente para controlar un pozo, se sugería llevar el fluido invasor a la superficie conservando constante el volumen en la presa de lodos, previniendo una invasión adicional del fluido de la formación. Si el fluido es agua salada con una expansión despreciable, la técnica es bastante efectiva, pero si el fluido invasor es gas, entonces se debe permitir que se expanda.

En el caso de cerrar el pozo, la burbuja se moverá hacia la parte superior sin expansión ya que de acuerdo con la ley de Boyle si el volumen de gas no cambia, su presión tampoco lo hará.

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} \quad \text{si } V_2 = V_1, \text{ entonces } P_2 = P_1$$

dando como resultado que al desplazarse la burbuja de gas hacia la superficie lleve la presión que existía dentro de ella al cerrar el pozo, aumentando de esta forma la presión en todos los puntos dentro de éste, suponiendo que las formaciones expuestas no se han roto. Al llegar la burbuja de gas la presión superficial será aproximadamente igual a la presión de fondo al momento de cerrar el pozo, y la presión total en el fondo será igual a la presión superficial más la presión hidrostática del fluido dentro del pozo. (Fig. 2.5).

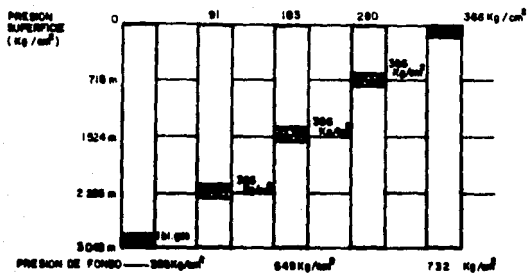


FIG. 2.8. MIGRACION DEL GAS SIN PERMITIR EXPANSION.

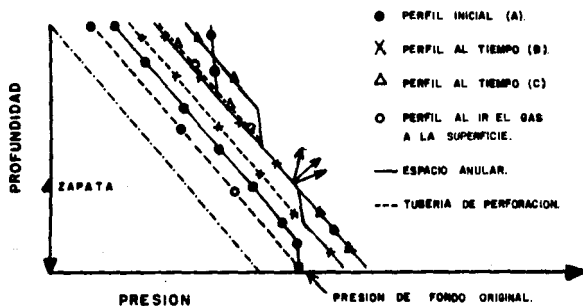


FIG. 2.9. PERFIL DE PRESION A MEDIDA QUE EL GAS LLEGA A LA SUPERFICIE SIN EXPANSION.

La formación se habrá roto mucho antes de la llegada del gas a la superficie. La presión en el espacio anular continuará aumentando a medida que el gas asciende forzando al lodo hacia la formación a través de una ruptura. Las Fig. 2.6 y 2.7 muestran curvas reales de lo que acontece verdaderamente.

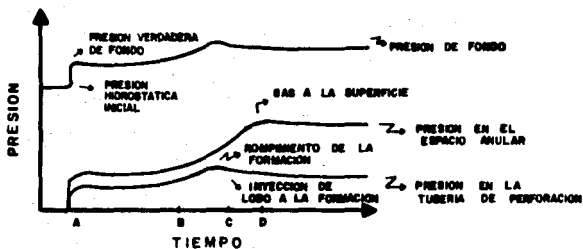
La segunda regla para el control de pozos es la siguiente:

Después de cerrar el pozo no se permita que la burbuja de gas se lleve a la superficie sin que exista una expansión controlada.

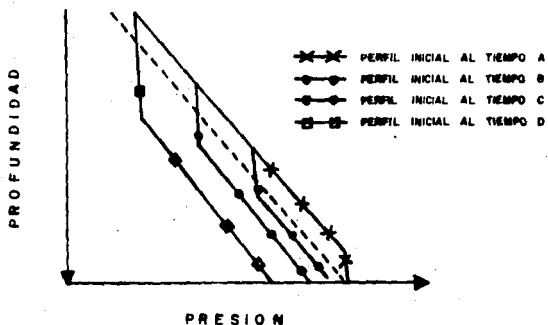
Supóngase que en el ejemplo 1 la presión en el espacio anular al cerrar el pozo se mantiene constante en 1500 lb/pg<sup>2</sup> hasta que el gas se trae a la superficie y que sólo se circula con el lodo original. El volumen de gas habrá aumentado a 120 barriles.

$$V_2 = \frac{V_1 P_1}{P_2} = \frac{30 \text{ (bl)} 6200 \text{ (lb/pg}^2\text{)}}{1500 \text{ (lb/pg}^2\text{)}} = 120 \text{ bl}$$

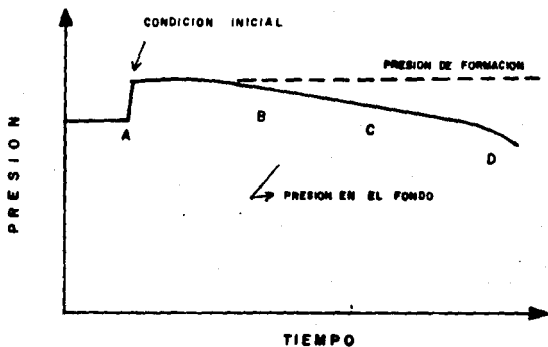
Como la capacidad del espacio anular es de 0.03 bl/pie, la longitud de la burbuja de gas se expande 4000 pies. La presión total aplicada en el fondo disminuye a 4820 lb/pg<sup>2</sup> (1500 en la superficie más 3120 de la presión hidrostática producida por 8000 pies de lodo). Tendremos casi 1500 lb/pg<sup>2</sup> menos que la presión de la formación, permitiendo que una segunda burbuja de gas entre al pozo. La presión en la tubería de perforación disminuye a medida que cae la presión en el fondo. En la práctica con la tubería de perforación y los lastrebarrenas en el pozo, la disminución de la presión en el espacio anular sería menor. Este efecto se muestra en las Fig. 2.8 y 2.9.



**FIG. 2.7. PRESION A MEDIDA QUE EL GAS SE DESPLAZA A LA SUPERFICIE SIN EXPANSION.**



**FIG. 2.8. PERFIL DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR DEL GAS HACIA LA SUPERFICIE CON LA PRESION DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO CONSTANTE.**



**FIG. 2.9. REDUCCION DE LA PRESION DE FONDO A MEDIDA QUE SE TRAE EL GAS A LA SUPERFICIE MANTENIENDO CONSTANTE LA PRESION EN LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO.**



Esta es la tercera regla para el control de pozos:

A medida que se aproxime el gas a la superficie, se debe permitir que aumente la presión en forma controlada para impedir una expansión abrupta del gas y para mantener constante la presión en el fondo.

El gas en expansión desplaza el lodo delante de él a una velocidad mayor que la que se circula el pozo. La parte inferior del gas se mueve a una velocidad igual a la velocidad de circulación.

La presión adicional que debe aplicarse en la superficie equilibra la pérdida de la presión hidrostática en la columna de lodo por arriba y por abajo de la columna de gas.

## CAPITULO TRES

### HIDRAULICA DE LA PERFORACION

♦ PERDIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA DE CIRCULACION

♦ GASTO Y PRESION REDUCIDOS DE CIRCULACION

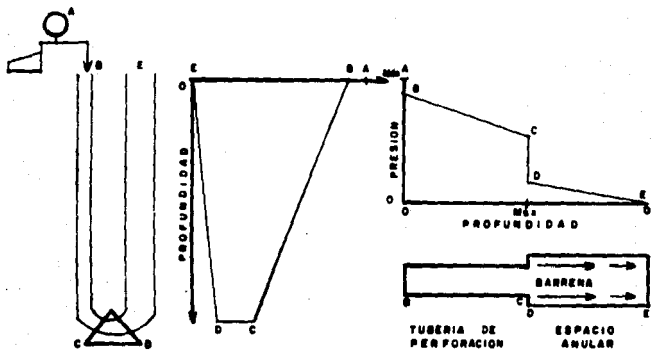
## PERDIDAS DE PRESION EN EL SISTEMA DE CIRCULACION

Los procedimientos normales para el control de intentos de brote implican circular el lodo del pozo para desplazar el fluido invasor y reemplazar al lodo original con uno suficientemente pesado para controlar el pozo, por tanto, hay que tomar en consideración la presión dinámica y saber como se usa.

Los programas de hidráulica deben diseñarse para determinar las pérdidas de presión por fricción en el equipo superficial, dentro de la tubería de perforación, a través de las toberas de la barrena y en el espacio anular.

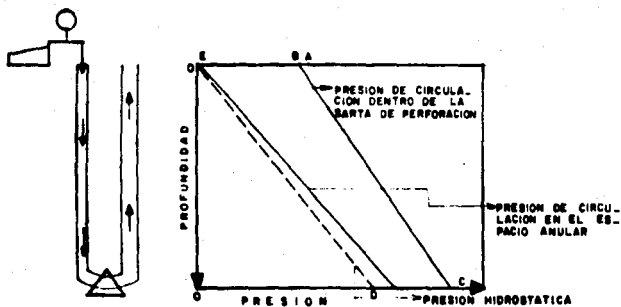
Una representación clara de las pérdidas por fricción puede obtenerse si la tubería de perforación y el espacio anular se dibujan como una tubería horizontal, (Fig. 3.1). La presión por fricción en la superficie es de A a B. La pérdida de presión en la sarta de perforación es de B a C. La pérdida a través de la barrena es de C a D y la pérdida por fricción en el espacio anular es de D a E. La pérdida total de presión por fricción es de A a E, la cual es proporcionada por la bomba y se lee en el medidor del tubo vertical.

Las pérdidas por fricción pueden ser superpuestas a la presión hidrostática para obtener la presión absoluta verdadera en cualquier punto del sistema, (Fig. 3.2). El conocimiento de la presión absoluta es esencial porque éste determina la presión verdadera contra la formación que indica si el flujo hacia el pozo puede controlarse o si puede ocurrir un rompimiento de la formación.



- A → TUBERIA VERTICAL.
- B → PARTE SUPERIOR DE LA TUBERIA DE PERFORACION.
- C → PARTE INFERIOR DE LA TUBERIA DE PERFORACION.
- D → PARTE INFERIOR DEL ESPACIO ANULAR.
- E → PARTE SUPERIOR DEL ESPACIO ANULAR.

**FIG. 3.1. REPRESENTACION GRAFICA DE LAS PERDIDAS DE PRESION POR FRICCION.**



**FIG. 3.2. PRESION ABSOLUTA EN CUALQUIER PUNTO DEL SISTEMA.**

A una misma profundidad, la presión absoluta dentro de la tubería de perforación aumenta de A a A' cuando se circula. En el espacio anular también se denota una variación respecto a la presión hidrostática disminuyendo ésta conforme nos acercamos a la superficie. La pérdida de presión por fricción en cualquier punto siempre es la suma de todas las pérdidas de presión por fricción determinadas desde un punto, hasta el final del sistema en dirección del flujo.

La presión requerida por la bomba es la necesaria para vencer las pérdidas por fricción en el sistema. En consecuencia la presión de descarga se define como:

$$dPT = dPs + dPtp + dPc + dPb + dPac + dPatp \quad \dots (3.1)$$

donde:

dPT = Presión en la descarga de la bomba, que representa la pérdida de presión total en el sistema.

dPs = Pérdida de presión en las conexiones superficiales.

dPtp = Pérdida de presión dentro de la tubería de perforación.

dPc = Pérdida de presión dentro de los lastrabarrenas.

dPb = Pérdida de presión en las toberas de la barrena.

dPac = Pérdida de presión en el espacio anular alrededor de los lastrabarrenas.

dPatp = Pérdida de presión en el espacio anular alrededor de la tubería de perforación.

La solución de la ecuación es bastante tediosa en cuanto a la elaboración de los cálculos por separado que se necesitan para cada sección. De cualquier modo, con un poco de práctica y comprendiendo lo que se va a hacer no resulta difícil su solución.

Se ilustrará el cálculo de las pérdidas de presión por fricción mediante un ejemplo tomado de un caso común de campo:

### Ejemplo 3.1

Datos de operación del pozo:

Profundidad = 6000 pies

5500 pies de tubería de perforación.

500 pies de lastrabarreras.

Diámetro de tubería de perforación = 4 $\frac{1}{2}$  pg

eint. = 3.826 pg

Diámetro de lastrabarreras = 6  $\frac{3}{4}$  pg

eint. = 2.813 pg

Densidad del lodo = 10 lb/gal

Viscosidad plástica = 30 cp

Punto de cedencia = 10 lb/100 pies<sup>2</sup>

Barrera tipo chorro tricónica de diámetro = 7  $\frac{7}{8}$  pg

¿ Qué potencia hidráulica será necesario suministrar a la bomba para vencer todas las pérdidas de presión por fricción ?

#### 1.- Cálculo de la velocidad de circulación.

Este se obtiene de la velocidad requerida en el espacio anular para tener un adecuado acarreo de los recortes de la formación.

Para este caso se supone un área de roca suave con una penetración rápida y se establece una velocidad de 180 pies/min (3 pies/seg).

2.- Cálculo del gasto de circulación.

$q = \text{Area del espacio anular} \times \text{Velocidad}$

$$q \text{ (gal/min)} = 2.45 [(s \text{ agujero})^2 - (s \text{ T.P.})^2] v \quad \dots (3.2)$$

$$q = 2.45 (82 - 20.2) 3$$

$$q = 308 \text{ gal/min}$$

3.- Cálculo del diámetro equivalente de las toberas de la barrena.

Se usará una barrena tricónica con una tobera por cono por lo tanto se tendrá un gasto de  $1/3 q$  por cada una de ellas.

Para una  $v$  de 250 pies/seg a través de cada una

$$s_{eq} = \left[ \frac{q / 3}{2.45 v} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$s_{eq} = \left[ \frac{103}{2.45 (250)} \right]^{\frac{1}{2}} = 0.41 \text{ pg}$$

de la Fig. 3.3 el valor más cercano es de 13/32 pg.

Esta tobera permite una velocidad real de:

$$v = \frac{103}{2.45 (13/32)^2} = 225 \text{ pies/seg}$$

4.- Cálculo de la pérdida de presión del equipo superficial.

El equipo superficial consiste del tubo vertical, la unión giratoria y la tubería entre la bomba y el tubo vertical. En esta parte del sistema sólo se causa una fracción pequeña de la pérdida total de presión, por lo tanto es suficiente con la aproximación que se obtiene de la Fig. 3.4 escogiendo el caso que más se aproxime al problema.



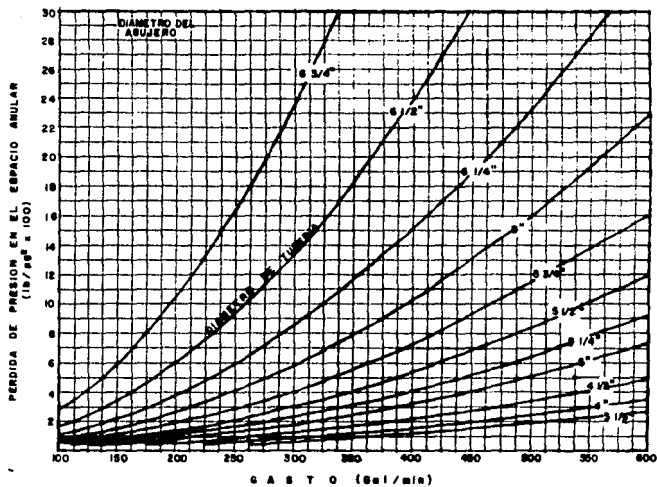
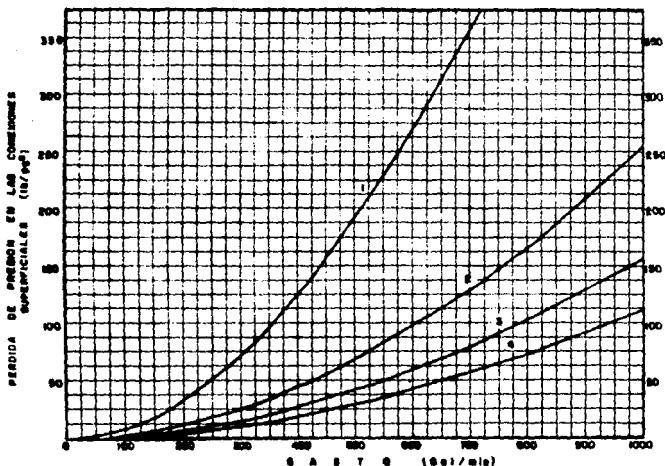


FIG 8.8. PERDIDA DE PRESION EN EL ESPACIO ANULAR PARA FLUJO TURBULENTO CON UN LODO DE 3cp y 9.5 lb/gal



EQUIPO DE CONEXIONES SUPERFICIALES	COMBINACION DE CONEXIONES SUPERFICIALES							
	NO 1		NO 2		NO 3		NO 4	
	d int.	Longitud	d int.	Longitud	d int.	Longitud	d int.	Longitud
TUBO VERTICAL	3"	40'	3 1/2"	40'	4"	45'	4"	48'
TUBO FLEXIBLE	2"	45'	2 1/2"	55'	3"	55'	3"	55'
UNION GIRATORIA	2"	4'	3 1/2"	5'	2 1/2"	5'	3"	8'
CUELLO DE GANCHO FLECHA	2 1/4"	40'	3 1/8"	40'	3 1/4"	40'	4"	40'

FIG. 3.4. PERDIDA DE PRESION EN LAS CONEXIONES SUPERFICIALES.

Para el ejemplo, el caso II es el que más se adecúa.

finalmente:

$$dPa = 30 \text{ lb/pg}^2$$

5.- Cálculo de la pérdida de presión dentro de la tubería de perforación.

Primero se calcula la velocidad crítica.

$$v_c = \frac{1.08 \mu_p + 1.08 (\mu_p^2 + 9.3 \delta \text{ sint.}^2 Y_b)^{1/2}}{\delta \text{ sint.}} \dots (3.3)$$

donde:

$\mu_p$  = Viscosidad plástica. (cp).

$\delta$  = Densidad del lodo, (lb/gal).

sint. = Diámetro interior de tubería. (pg).

$Y_b$  = Punto de cedencia, (lb/100 pies<sup>2</sup>).

$$v_c = \frac{1.08 (30) + 1.08 \{ (30)^2 + 9.3 (10) (3.826)^2 \}^{1/2}}{10 (3.826)}$$

$$v_c = 4.2 \text{ pies/seg}$$

la velocidad real dentro de la tubería de perforación es:

$$v = \frac{q}{2.45 \text{ sint.}^2}$$

$$v = \frac{308}{2.45 (3.826)^2} = 8.58 \text{ pies/seg}$$

Ya que  $8.58 > 4.2$ , el flujo es turbulento y se aplica la siguiente ecuación para obtener el número de Reynolds:

$$Re = \frac{2970 \delta v_{int.}}{\mu_p} \quad \dots (3.4)$$

$$Re = \frac{2970 (10) 8.58 (3.826)}{30} = 32500$$

de la Fig. 3.5 curva II el factor de fricción de fanning será:

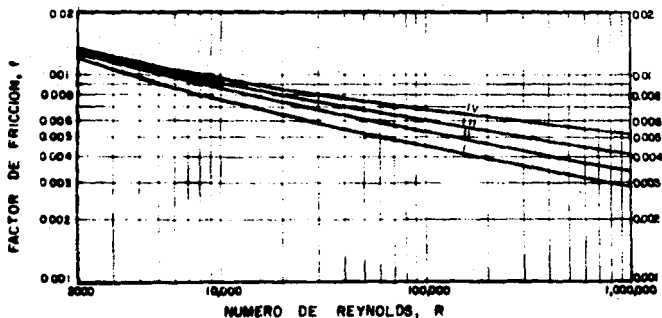
$$f = 0.0066$$

finalmente la pérdida de presión en la tubería de perforación es:

$$dP_{tp} = \frac{f \delta L v^3}{25.8 d} \quad \dots (3.5)$$

$$dP_{tp} = \frac{0.0066 (10) 5500 (8.58)^3}{2.58 (3.826)} = 270 \text{ lb/pg}^2$$

La tubería de perforación tiene en realidad dos diámetros interiores; uno para el cuerpo de la tubería y otro para las juntas. Por tanto se deben hacer cálculos por separado de las pérdidas de presión para una longitud total equivalente correspondiente a cada diámetro interior. También puede obtenerse un diámetro promedio formado por la combinación de la tubería y las juntas.



- I.-TUBERIA DE BRONCE O VIDRIO.
- II.-PARA UN FLUJO INTERNO LIMPIO EN BUENAS TUBERIAS.
- III.-PARA TUBERIA DE PERFORACION LLENA O ESPACIO ANULAR CON AGUJERO ADEMADO.
- IV.-PARA ESPACIO ANULAR EN AGUJERO DESCUBIERTO.

FIG. 3.5. FACTOR DE FRICCIÓN VS. NUMERO DE REYNOLDS

6.- Cálculo de la pérdida de presión dentro de los lastrabarrenas.

Siguiendo los mismos pasos que en el punto 5:

$$v = \frac{308}{2.45 (2.813)^2} = 15.9 \text{ pies/seg}$$

valor que implica que el flujo es turbulento

$$Re = \frac{2970 (10) 15.9 (2.813)}{30} = 44300$$

o también

$$Re = 32500 \frac{3.826}{2.8132} = 44300$$

el factor de fricción será:

$$f = 0.0062$$

finalmente

$$dP_c = \frac{0.0062 (10) 500 (15.9)^2}{25.8 (2.813)} = 108 \text{ lb/pg}^2$$

7.- Cálculo de la pérdida de presión a través de las toberas de la barrena.

Se tiene una barrena tipo chorro con un coeficiente de tobera de 0.95, por lo tanto se usa la siguiente ecuación de toberas múltiples:

$$dP_b = \frac{q^2 \delta}{7430 C^2 (\text{segt.})^4} \quad \dots (3.7)$$

donde:

C = Coeficiente de la tobera de barrena, (%)

seqt. = Diámetro equivalente de las toberas  
de la barrena, (pg).

$$\text{seqt.} = [ (e1)^2 + (e2)^2 + (e3)^2 ]^{\frac{1}{2}} \quad \dots (3.8)$$

e1, e2, e3, = Diámetro de las toberas de la barrena.

Para el ejemplo

$$e = [ 3 (13/32)^2 ]^{\frac{1}{2}} = 0.704 \text{ pg}$$

finalmente

$$\text{dpb} = \frac{(308)^2 \cdot 10}{7430 (0.95)^2 (0.704)^4} = 580 \text{ lb/pg}^2$$

8.- Cálculo de la pérdida de presión alrededor de los  
lastrabarreras.

La velocidad crítica para esta sección es:

$$v_c = \frac{1.08 (30) + 1.08 [ (30)^2 + 9.3 (10) (1.125)^2 (10) ]^{\frac{1}{2}}}{10 (1.125)}$$
$$= 7.25 \text{ pies/seg}$$

el diámetro equivalente del espacio anular es:

$$7.875 - 6.750 = 1.125 \text{ pg}$$

la velocidad real es:

$$v = \frac{308}{2.45 [ (7.875)^2 - (6.75)^2 ]} = 7.6 \text{ pies/seg}$$

por lo tanto el flujo es turbulento

$$Re = \frac{2970 (10) 7.6 (1.125)}{30} = 8450$$

el factor de fricción es:

$$f = 0.0098 \text{ de la curva IV Fig. 3.5}$$

finalmente

$$dPac = \frac{0.0098 (10) 500 (7.6)^2}{25.8 (1.125)} = 97 \text{ lb/pg}^2$$

9.- Cálculo de la pérdida de presión en el espacio anular alrededor de la tubería de perforación.

$$vc = \frac{1.08 (30) 1.08 [ (30)^2 + (9.3) 10 (3.375)^2 ]^{1/2}}{10 (3.375)}$$

$$vc = 4.38 \text{ pies/seg}$$

por lo tanto el flujo es laminar, desde que se calculó el gasto a una velocidad anular de 3 pies/seg. La ecuación que se usa es:

$$dP = \frac{L Yb}{300 \text{ seq.}} + \frac{\mu v L}{1500 (\text{seq.})^2} \quad \dots (3.9)$$

donde:

L = Longitud del tramo de tubería en análisis, (pies)

seq. = Diámetro equivalente del espacio anular, (pg).

$$dPatp = \frac{5500 (10)}{300 (3.375)} + \frac{30 (3) 5500}{1500 (3.375)^2} = 83 \text{ lb/pg}^2$$



La pérdida de presión en el espacio anular al igual que la pérdida de presión en el interior de la tubería se compone de dos partes: la pérdida alrededor del cuerpo de la tubería y la pérdida alrededor de las juntas en las conexiones de tuberías. En la mayor parte de los casos ésta es una corrección insignificante y para este caso se aplica un diámetro de tubería como si fuese uniforme. Sin embargo en pozos con diámetros pequeños, las correcciones pueden ser notables. En estos casos una aproximación es considerar que por cada 1000 pies de espacio anular se tienen 950 pies de tubería y 50 pies de juntas.

10.- Cálculo de la pérdida de presión total en el sistema.

$$dPT = 27 + 270 + 108 + 580 + 97 + 83 = 1170 \text{ lb/pg}^2$$

La potencia de salida de la bomba es entonces:

$$\text{Potencia (HP)} = \frac{q \text{ (gal/min)} dPT \text{ (lb/pg}^2\text{)}}{1714} \quad \dots(3.10)$$

$$HP = \frac{308 (1170)}{1714} = 210 \text{ HP}$$

La potencia suministrada a la bomba con una eficiencia volumétrica del 90% y una eficiencia mecánica del 85% es:

$$HP = \frac{210}{0.90 (0.85)} = 275 \text{ HP}$$

Se han realizado gráficas con curvas y tablas donde se analizan formas distintas de la ecuación de Fanning para lodos con cierta viscosidad y densidad. La Fig. 3.5 muestra esta gráfica para lodos

con viscosidad de 3.5 cp y una densidad de 9.5 lb/gal. El factor de fricción ha sido estimado en términos del gasto y del diámetro de la tubería.

Las pérdidas de presión leídas en estas gráficas pueden corregirse para otras densidades mediante:

$$dP = dPg \frac{\delta}{9.5}$$

donde:

$dPg$  = Valor no corregido de las gráficas.

$dP$  = Valor corregido para el lodo con densidad  $\delta$ .

Es posible corregir estos valores para cambios en la viscosidad y la temperatura pero resulta ya demasiado teórico y poco práctico hacerlo debido al pequeño efecto que tienen en la pérdida de presión.

Para aplicaciones de campo Petroleros Mexicanos ha establecido en su manual para la prevención de brotes las siguientes normas para calcular las pérdidas de presión.

La pérdida de presión en el interior de las tuberías se pueden calcular así:

$$dP = \frac{6.1 \times 10^{-5} \delta L q^{1.86}}{4.86} \dots (3.11)$$

(eint.)

donde:

$dP$  = Pérdida de presión por fricción, (lb/pg<sup>2</sup>).

$\delta$  = Densidad del lodo, (lb/gal).

$L$  = Longitud de la tubería, (pies).

$q$  = Gasto de la bomba, (gal/min).

eint. = Diámetro interior de la tubería, (pg).

La pérdida de presión en las toberas de la barrera será:

$$dP_b = \frac{\delta \cdot q^2}{10858 (A_t)^2} \quad \dots (3.12)$$

donde:

$A_t$  = Área de las toberas, (pg<sup>2</sup>).

Las pérdidas de presión por fricción para el espacio anular pueden considerarse por regla empírica que equivalen al 10% del sistema para pozos hasta de 12 pg. Para pozos de menor diámetro podrá aumentar hasta el 30%.

Para las conexiones superficiales se considerará un valor promedio de pérdida de presión de 3.5 Kg/cm<sup>2</sup>.

**DIAMETRO EQUIVALENTE DEL ESPACIO ANULAR.** Al realizar las operaciones usadas para el flujo de un fluido por el espacio anular, es necesario contar con un diámetro circular hipotético, el cual es el equivalente hidráulico del espacio anular existente, y es el siguiente:

$$d_{eq.} = d_1 - d_2 \quad \dots (3.13)$$

donde:

$d_{eq.}$  = Diámetro equivalente del espacio anular.

$d_1$  = Diámetro de mayor largo.

$d_2$  = Diámetro de menor largo.

### Ejemplo 3.2

Fluye lodo a través del espacio anular entre un agujero de 7 7/8 pg y una tubería de perforación de 4 1/2 pg. ¿Cuál es el valor del diámetro hidráulico equivalente?

$$d_{he} = 7.875 - 4.5 = 3.375 \text{ pg}$$

### GASTO Y PRESION REDUCIDOS DE CIRCULACION

Durante el control de un brote se hace necesario la reducción del gasto de circulación, éste se determina generalmente disminuyendo el bombeo a la mitad del gasto normal de perforación. Al tener este gasto estabilizado, la presión que se lea en la tubería de perforación será la presión reducida de circulación, la cual representa las pérdidas de presión por fricción en el sistema a ese gasto, y podrá ser calculada con las ecuaciones mencionadas anteriormente en caso de ser necesario.

El gasto y la presión reducida de circulación son datos importantes que es necesario tener cuando se presente un intento de brote, por eso es necesario actualizarlos cuando se efectúen cambios en la sarta de perforación o en las propiedades del lodo o cada vez que la profundidad se incremente en 150 m.

Las justificaciones para reducir el gasto de la bomba durante el control de un brote son las siguientes:

- + Disminuye la posibilidad de falla del equipo de bombeo por fatiga.
- + Permite adicionar barita durante la operación de control.
- + Se dispone de más tiempo para analizar los problemas que se presentan.
- + Permite que el rango de trabajo del estrangulador variable sea el adecuado.
- + Reduce las pérdidas por fricción.

Para determinar la presión reducida de circulación a diferentes gastos, tomando como base los parámetros de gasto y presión reducida de circulación determinados en forma práctica o analíticamente se hace uso de una ecuación empírica:

$$Pr2 = Pr1 \left[ \frac{Qr2}{Qr1} \right]^{1.88} \quad \dots (3.14)$$

donde:

Pr1 = Presión de circulación reducida original (Kg/cm<sup>2</sup>)

Pr2 = Nueva presión reducida de circulación (Kg/cm<sup>2</sup>)

Qr1 = Gasto de circulación reducido original (emb/min)

Qr2 = Nuevo gasto reducido de circulación (emb/min)

El exponente 1.88 se usa para lodos base agua. En lodos base aceite este exponente será de 1.1.

## **CAPITULO CUATRO**

### **METODOS DE CONTROL DE BROTES**

- ♦ METODO DEL PERFORADOR
- ♦ METODO DEL INGENIERO
- ♦ COLAPSO DE LA BURBUJA DE GAS
- ♦ TECNICA DE CONTROL DE LA PRESION EN LA TUBERIA DE PERFORACION
- ♦ TECNICA DE CONTROL DE LA PRESION EN EL ESPACIO ANULAR

Los métodos de control de pozos han recibido una gran variedad de nombres dependiendo de las características del método y del lugar. De hecho, solo hay una forma de control que es la de mantener la presión en el fondo del pozo en un valor por lo menos igual o ligeramente superior a la presión de la formación. Todos los métodos tratan de hacer esto, sin embargo, hay que tomar en cuenta los problemas y circunstancias de cada caso para evitar perder el control del pozo por un aumento o disminución de la presión que se impone sobre la formación.

#### METODO DEL PERFORADOR

El método del perforador se usa ampliamente por su relativa facilidad para aplicarse, consiste en cerrar el pozo registrando las presiones de cierre, continuar circulando hasta desalojar el fluido invasor, calcular la densidad del lodo necesaria para controlar el pozo y circular con el lodo de nueva densidad.

En este método se requiere de un ciclo de circulación completo con el lodo de densidad original, para que los fluidos invasores sean desalojados del espacio anular a un gasto y presión constante con la ayuda de un estrangulador ajustable.

La secuencia de pasos que describen el método del perforador son:

- 1) Cerrar el pozo.
- 2) Abrir el pozo y ajustar el ritmo de bombeo.
- 3) Llevar el gas a la superficie.
- 4) Sacar el gas.

- 5) Introducir el lodo de control en la tubería de perforación.
- 6) Llevar el lodo de control al fondo del pozo.
- 7) Regresar el lodo de control a la superficie.

En este punto, el pozo deberá estar totalmente controlado.

Se analizará primero la presión estática que se deberá tener en la tubería de perforación en caso de que se cierre el pozo durante los pasos del método.

#### Ejemplo 4.1

Se está perforando un pozo en el cual surge un intento de brote y el pozo se cierra, se supone que:

- + Se desprecia la longitud de los lastrabarreras (la capacidad del espacio anular es constante).
- + No hay línea de estrangulación (no hay pérdidas de presión después de que el lodo llega a la superficie).
- + Condiciones antes del intento de brote:
  - . Profundidad total = 10000 pies
  - . Densidad del lodo = 10 lb/gal
  - . Capacidad del espacio anular = 0.03 bl/pie
  - . Presión de circulación reducida = 800 lb/pg<sup>2</sup>
  - . Velocidad de bombeo = 50 spm
  - . Pérdida de presión en el espacio anular = 100 lb/pg<sup>2</sup>
- + Se introducen 30 bl del fluido de la formación al pozo.
- + Condiciones de cierre:
  - . Presión en la tubería de perforación = 1000 lb/pg<sup>2</sup>
  - . Presión en la tubería de revestimiento = 1500 lb/pg<sup>2</sup>
  - . Presión hidrostática = 5200 lb/pg<sup>2</sup>
  - . Presión del yacimiento 6200 lb/pg<sup>2</sup>



Del paso 1 al 5 la densidad del lodo de control en la tubería de perforación y la presión de fondo se mantienen constantes conservándose la presión de cierre en 1000 lb/pg<sup>2</sup>. Entre los pasos 5 y 6 la presión en la tubería de perforación se reduce gradualmente a medida que el lodo de control viaja hacia la barrena. Una vez que ha llegado a la barrena, la presión en la tubería de perforación al cierre será igual a cero, ya que la presión hidrostática ejercida por el lodo de control será suficiente para contrarrestar la presión de la formación. Entre los pasos 6 y 7 la presión en la tubería de perforación al cierre permanecerá en cero, vease la Fig. 4.1

La densidad del lodo necesaria para mantener el control sobre la formación se determina como sigue :

$$\delta_c \text{ (lb/gal)} = \delta \text{ (lb/gal)} + \frac{\text{PCTP (lb/pg}^2\text{)}}{0.052 \text{ D (pies)}}$$

o bien

$$\delta_c \text{ (g/cm}^3\text{)} = \delta \text{ (g/cm}^3\text{)} + \frac{\text{PCTP (kg/cm}^2\text{)} \cdot 10}{\text{D (m)}}$$

donde:

$\delta_c$  = Densidad del lodo de control.

$\delta$  = Densidad del lodo original.

PCTP = Presión de cierre en la tubería de perforación.

D = Profundidad.

$$\delta_c = 10 \text{ (lb/gal)} + \frac{1000 \text{ (lb/pg}^2\text{)}}{10000 \text{ (pies)} \cdot 0.052} = 12 \text{ lb/gal}$$

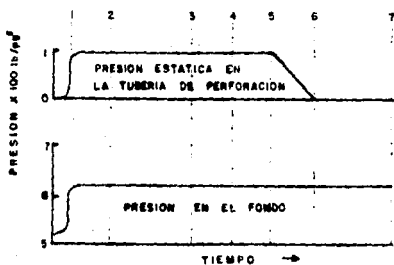


FIG. 4.1. METODO DEL PERFORADOR

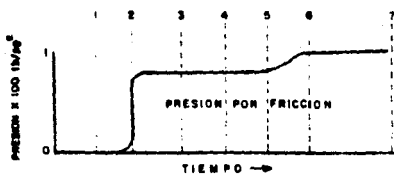


FIG. 4.2. METODO DEL PERFORADOR.

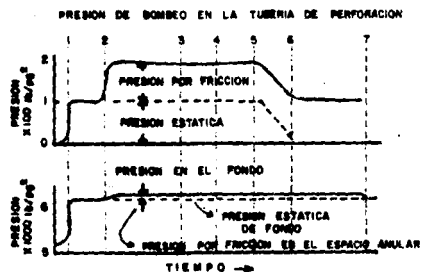


FIG. 4.3. METODO DEL PERFORADOR.

Ahora se considerarán las pérdidas por fricción. La pérdida por fricción en la circulación reducida inicial, será de un valor igual a la presión reducida de circulación, en el caso del ejemplo 800 lb/pg<sup>2</sup> a 50 spm. Permanecerá en este valor hasta que el lodo de control entre en la tubería de perforación, (paso 5).

La presión por fricción aumentará lentamente a medida que el lodo de control se desplace hacia abajo de la tubería de perforación, las pérdidas de presión por fricción dentro de la tubería de perforación aumentan con la densidad del lodo, y aumentarán también cuando el lodo de control acabe de dejar la barrena, (paso 6). La presión por fricción total al final del paso 6 será ahora de 960 lb/pg<sup>2</sup> (800 x 12/10), y permanecerá en este valor hasta el paso 7. La presión en el fondo ha aumentado en 100 lb/pg<sup>2</sup>, o sea, ha aumentado en una cantidad igual a la pérdida por fricción en el espacio anular que se incluye en la presión de circulación reducida. Mientras se circule el pozo estará presente el aumento en la presión de fondo, esta presión se reducirá a la presión estática de cierre en el fondo cuando cese la circulación. La presión por fricción contra el tiempo se muestra en la Fig. 4.2.

Ahora podemos determinar la presión de bombeo agregando a la presión estática requerida la pérdida de presión por fricción.

$$\text{Presión en la bomba} = \text{Presión estática} + \text{Presión por fricción}$$

Una vez que la bomba está trabajando a la velocidad de circulación reducida, la presión de bombeo mostrará inicialmente 1800 lb/pg<sup>2</sup> (1000 de estática + 800 por fricción) y permanecerá en este valor hasta el paso 5. Entre los pasos 5 y 6, se permitirá que la presión de bombeo baje gradualmente de 1800 lb/pg<sup>2</sup> a 960 lb/pg<sup>2</sup>.

cuando se alcance el paso 6. La presión de bombeo disminuye 1000 lb/pg<sup>2</sup> por la compensación originada por el aumento de la densidad del lodo:

$$2 \text{ (lb/gal) } 10000 \text{ (0.052) } = 1000 \text{ lb/pg}^2$$

también aumenta en 160 lb/pg<sup>2</sup> por el aumento en la presión de fricción originado por la misma causa:

$$800 \text{ (12/10) } = 960$$

Normalmente se requiere de un pequeño ajuste al estrangulador entre los pasos 5 y 6; la velocidad de bombeo puede tender a aumentar a medida que se reduzca la presión en la bomba. Se deben hacer correcciones durante este periodo al notar que el ritmo de bombeo empiece a aumentar. Si no se tiene precaución en esto, aumentarán las pérdidas por fricción debido al aumento de la velocidad de bombeo, lo que a su vez, ocasionará que se reduzca la presión en el fondo y esto puede permitir que entre una segunda burbuja al pozo. La Fig. 4.3 muestra la presión de bombeo en la tubería de perforación y la presión de fondo.

La presión inicial en el espacio anular, será la presión de cierre de la tubería de revestimiento. Esta aumentará rápidamente según el gas se aproxime a la superficie, (paso 3). Aquí se tendrá la máxima presión en el espacio anular ya que el gas se ha expandido a su máximo volumen y ha desplazado el máximo volumen de lodo del espacio anular. El volumen de la presa de lodos aumentará durante este periodo; el aumento sobre la ganancia inicial, refleja la expansión del volumen del gas inicial a medida que se mueve hacia la superficie.

La sumatoria de: la presión de estrangulación, la presión hidrostática del lodo encima del gas, la presión hidrostática del lodo debajo del gas, y la pérdida por fricción en todo el espacio anular, siempre será igual a la presión de fondo; y esto deberá de ser igual a la presión de fondo estática inicial más la pérdida por fricción en el espacio anular.

En la Fig. 4.4 se muestra la presión en el espacio anular contra el tiempo. La curva de presión se correlaciona con la presión en el fondo, con el volumen de la presa, y con la presión de bombeo en la tubería de perforación.

Del paso 3 al 4 el gas se desfoga del espacio anular. A medida que el gas sale, se reemplaza por el lodo que tiene una densidad mayor. Al aumentar la presión hidrostática se requiere menor presión en el espacio anular permitiendo que ésta disminuya. El volumen en la presa se reduce a medida que se desplaza el lodo mientras se ventea el gas. Cuando ha salido todo el gas, la presión en el espacio anular deberá bajar hasta aproximadamente la presión de cierre inicial en la tubería de perforación ya que ahora el espacio anular está lleno de lodo con la densidad original. También el volumen de la presa deberá estar en el mismo nivel que estaba antes de la invasión de fluidos. En tanto, no se ha hecho ningún cambio significativo en la presión en el fondo.

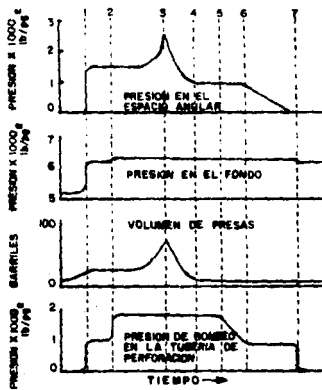


FIG. 4.4. METODO DEL PERFORADOR.

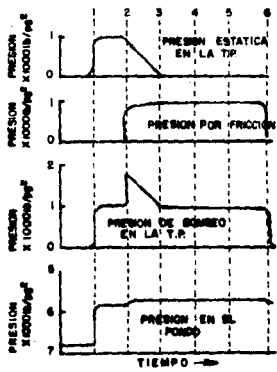


FIG. 4.5. METODO DEL INGENIERO.

Todas las presiones, incluidas la presión estática en la tubería de perforación, la presión por fricción, la presión de bombeo, y la presión en el fondo permanecerán constantes mientras la densidad original del lodo se circule a un ritmo de bombeo constante y hasta que el lodo de control esté listo para bajarse por la tubería de perforación, (paso 5). Como se mencionó, la presión estática en la tubería de perforación decrece a medida que se desplaza el lodo de control hacia el espacio anular, y la presión de bombeo declina también. Tanto la presión en el fondo como la presión en el espacio anular permanecen constantes, sin embargo, hay que considerar que en este periodo sólo se circula el lodo original. Del paso 6 al 7 se desplaza el lodo de control hacia arriba por el espacio anular; la presión en el espacio anular declina lentamente en el paso 7 que es cuando el lodo de control alcanza la superficie y el pozo queda controlado.

Habiendo descrito la secuencia de presiones hay que saber dónde aplicar la operación de control, ya sea en la tubería de perforación o en el espacio anular.

Se puede acelerar la bomba manteniendo constante la presión en el espacio anular hasta que se alcance el ritmo correcto de emboladas o el predeterminado, (paso 2). De esta forma, el control se cambia a la tubería de perforación manteniendo la presión de bombeo hasta que el lodo de control esté listo para circularse hacia el fondo de la tubería, (pasos 2 a 5). El control debe cambiarse con anterioridad a cualquier expansión apreciable del gas.

El control se cambia nuevamente al espacio anular y se mantiene su presión en un valor igual al de la presión de cierre en la tubería de perforación hasta que en ésta queda desplazado el lodo de control, (pasos 5 a 6).

El control se regresa entonces a la tubería de perforación, al tiempo que en el espacio anular se desplaza el lodo de control, (pasos 6 a 7).

La presión de bombeo deberá ser ahora igual a la presión de circulación reducida corregida por el aumento de la densidad del lodo.

La presión en la tubería de perforación puede bajarse entre los pasos 5 y 6, pero debe de notarse que a través del estrangulador la densidad del lodo original no cambia, el flujo se mantiene constante, y la presión debe mantenerse también en un valor constante.

La ecuación para la obtención de la pérdida de presión por fricción a través de una tobera tipo chorro o a través de un estrangulador es la siguiente:

$$dP = K \delta \frac{Q^2}{A^2} \quad \text{donde } K = \text{Cte.}$$

Por tanto, como  $dP$ ,  $\delta$ , y  $Q$ , permanecen constantes, consecuentemente la sección del área del estrangulador deberá permanecer constante también. Durante este intervalo se requerirá muy poco o ningún ajuste del estrangulador, y el control puede cambiarse al espacio anular en esta fase del método del perforador, mientras se desplaza el lodo de control en la tubería de perforación con relativa seguridad.



## METODO DEL INGENIERO

El método del ingeniero también llamado de esperar y densificar implica que las operaciones se demoran (espera) una vez que el pozo se cierra, en tanto que se prepara el volumen suficiente de lodo de control (densificar), entonces se desplaza hacia afuera el gas mientras el lodo de control se circula hacia el fondo de la tubería de perforación simultáneamente. En realidad se combinan en una sola las dos operaciones de circulación requeridas en el método del perforador, ocurriendo simultáneamente los pasos 2 y 5.

El cuadro de presiones para la tubería de perforación descrito en el método del perforador para los pasos 5 a 7 es exactamente el mismo en el método del ingeniero. Las presiones estática, de fricción y de bombeo de la tubería de perforación se muestran en la Fig. 4.5. Los eventos que describen el método del ingeniero son los siguientes:

- 1) Se cierra el pozo.
- 2) Se abre el pozo y se acelera la bomba, se empieza a desplazar el lodo de control por la tubería de perforación.
- 3) Se desplaza el lodo de control hacia el fondo del pozo.
- 4) El gas se desplaza hacia la superficie.
- 5) Se desaloja el gas.
- 6) Se desplaza el lodo de control a la superficie.

Si el volumen en la tubería de perforación es cuatro o cinco veces más grande que el volumen del espacio anular, si el volumen del fluido invasor en caso de ser gas es relativamente pequeño, si no hay lastrabarreras, si no existen cambios en la sección del espacio anular, y si el fluido invasor apenas está en el fondo.

entonces la curva de presión en el espacio anular será constante mientras que en la tubería de perforación se desplace el lodo de control del paso 1 al 3. Estas limitaciones se quitarán posteriormente y se discutirán los efectos de cada limitación o suposición.

La presión en el fondo permanecerá prácticamente constante en el valor inicial al cierre más la pérdida por fricción en el espacio anular.

En la Fig. 4.6 se muestra la curva de presión en el espacio anular contra el tiempo y su correlación con la presión en el fondo, el volumen de la presa, y la presión de bombeo en la tubería de perforación.

Una vez que el lodo de control alcanza la barrenas, (paso 3), se incrementará la presión hidrostática en el espacio anular a medida que el lodo sube por éste. En consecuencia, la presión adicional requerida en el estrangulador declinará hasta que el gas esté cercano a la superficie. La declinación en la presión se detendrá y la presión en el espacio anular podrá aumentar hasta el valor máximo cuando el gas llega a la superficie. Esto ocurrirá simultáneamente con la máxima ganancia en la presa de lodos. La máxima presión observada en la superficie será menor que la observada en el método del perforador debido al lodo de control en el espacio anular, las otras condiciones permanecen igual.

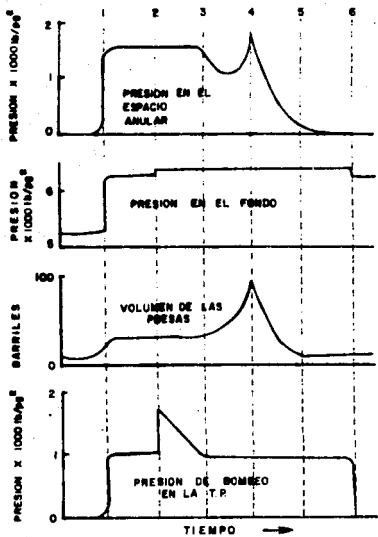


FIG. 4.6. METODO DE INGENIERO.

La presión declinará rápidamente del paso 4 al 5 mientras el gas es desfogado. En el paso 5 la presión requerida en el espacio anular será igual a la presión de cierre en la tubería de perforación, multiplicada por la capacidad de la tubería de perforación y dividida por la capacidad del espacio anular, si es que el lodo de control se bombea inmediatamente y la burbuja de gas no ha avanzado hacia arriba del pozo. En el ejemplo la presión deberá estar ahora entre 200 y 250 lb/pg<sup>2</sup>.

Entre los pasos 5 y 6, el volumen inicial de lodo original en la tubería de perforación es desalojado al espacio anular, y la presión caerá a cero, a medida que el espacio anular queda finalmente controlado.

Bajo las condiciones establecidas, sin lastrabarreras, sin cambio en la sección del espacio anular, el método ha consistido en conservar constante la presión en el espacio anular con un valor igual a la presión de cierre en la tubería de revestimiento. En seguida se cambia el control a la tubería de perforación conservando la presión y abatiendo el pozo.

Por el contrario, si alguna de las restricciones mencionadas está presente, puede bajarse la presión en la tubería de perforación y se puede monitorear la presión en el espacio anular pero no usarse para control. Se ha demostrado que con el método del ingeniero se pueden controlar todos los casos de intentos de brote conservando constante la presión en el espacio anular mientras se desplaza lodo de control en la tubería de perforación. Esto puede dar lugar a problemas adicionales como un sobrecontrol por no tomar en cuenta las restricciones antes mencionadas.

## COLAPSO DE LA BURBUJA DE GAS

En algunos casos, los problemas que causa una burbuja de gas pueden resultar de orden mayor, teniendo un efecto considerable en el control de un pozo.

El colapso lo causa la contracción de la burbuja de gas en su longitud, cuando la burbuja va de un área de sección transversal menor a una sección mayor, y no por un cambio en el volumen de la burbuja de gas.

El método empleado para controlar la presión de fondo puede tener un efecto grande en el pozo si se usa el método del perforador o el del ingeniero. Si se baja la presión en la tubería de perforación tiene poca importancia el colapso, pero puede tener un efecto mayor el hecho de conservar constante la presión en la tubería de revestimiento mientras se desplaza el lodo de control en la tubería de perforación al usar el método del ingeniero.

### Ejemplo 4.2

Suponga los siguientes datos:

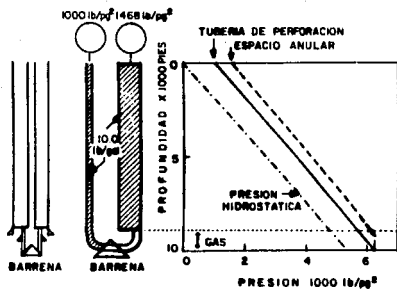
- + Longitud de la tubería de perforación = 9000 pies
- + Longitud de los lastrabarrenas = 1000 pies
- + Boca de la T.R. corta = 9000 pies
- + Zapata de la T.R. corta = 9500 pies
- + Presión de cierre en la tubería de perforación = 1000 lb/pg<sup>2</sup>
- + Densidad del lodo = 10 lb/gal
- + Capacidad del espacio anular entre los lastrabarrenas y la tubería de revestimiento corta = 0.02 bl/pie

- + Capacidad del espacio anular entre la tubería de perforación y la de revestimiento = 0.1 bl/pie
- + Ganancia en el volumen de lodo en presas = 20 bl
- + Densidad del gas = 1 lb/gal

Las condiciones de cierre se muestran en la Fig. 4.7.

La presión inicial de cierre en la tubería de revestimiento será de 1468 lb/pg<sup>2</sup>. El método del ingeniero puede usarse de dos maneras. Se puede empezar y mantener el control de la tubería de perforación usando la presión programada (tanta presión se requiere en la tubería de perforación después de tantas emboladas) según se explicó anteriormente mientras se desplaza el lodo de control; enseguida se mantiene constante la presión en la tubería de perforación a la presión de circulación final. Otra opción es la de mantener el control en el espacio anular, usando como guía la presión de cierre en la tubería de revestimiento, mientras se desplaza lodo de control por la tubería de perforación, entonces se cambia el control de la presión a la tubería de perforación una vez que el lodo de control llegue a la barrena. Esta última técnica es más simple y puede emplearse a menudo sin poner en peligro el pozo.

Empleando el sistema de un efecto con una variable por vez, se comparará el control de la presión en la tubería de perforación con el control de la presión en el espacio anular, durante el periodo que toma desplazar la burbuja hacia la parte superior de la tubería de revestimiento corta y de los lastrabarrenas mientras que únicamente se bombea el lodo original por la tubería de perforación.



**FIG. 4.7. EFECTO DE LA GEOMETRIA DEL POZO (TUBERIA CORTA Y ENSAMBLE EN EL FONDO) PARA CONDICIONES DE CIERRE.**

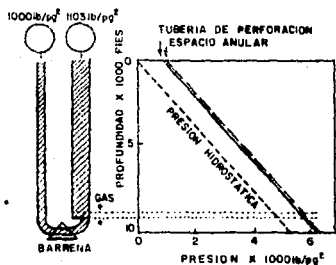
## TECNICA DE CONTROL DE LA PRESION EN LA TUBERIA DE PERFORACION

Suponiendo que se han desplazado 20 barriles de lodo, la presión estática en la tubería de perforación sigue igual a 1000 lb/pg<sup>2</sup> y no se ha efectuado ningún cambio en la presión de bombeo. También la presión en el fondo del pozo es constante con 2600 lb/pg<sup>2</sup> (más la pérdida por fricción en el espacio anular). Sin embargo, la burbuja de gas se ha colapsado de 1000 pies a solo 200 pies. La presión hidrostática ha aumentado de 4732 lb/pg<sup>2</sup> a 5097 lb/pg<sup>2</sup>, o sea, 365 lb/pg<sup>2</sup> de aumento. Para balancear el sistema sólo se necesita aplicar 1103 lb/pg<sup>2</sup> al espacio anular.

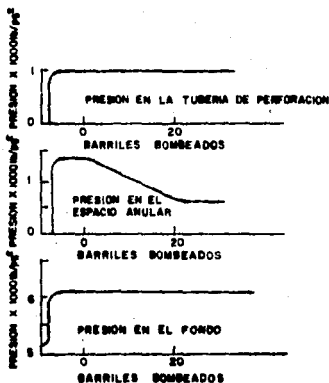
La Fig. 4.8 muestra la condición estática existente cuando la burbuja se ha desplazado hacia la parte superior de los lastrabarrenas (y hacia la parte superior de la tubería de revestimiento corta en este caso) si se usó el control en la tubería de perforación.

La Fig. 4.9 muestra el efecto que tiene el colapso de la burbuja de gas en la presión del espacio anular, en la presión estática de la tubería de perforación, y en la presión de fondo usando el control en la tubería de perforación.





**FIG. 4.8. PERFIL DE PRESIONES PARA EL COLAPSO DE LA BURBUJA DE GAS USANDO EL CONTROL EN LA TUBERIA DE PERFORACION (CONDICIONES ESTATICAS).**



**FIG. 4.9. COLAPSO DE LA BURBUJA DE GAS CON EL CONTROL EN LA TUBERIA DE PERFORACION EN CON- DICIONES ESTATICAS.**

## TECNICA DE CONTROL DE LA PRESION EN EL ESPACIO ANULAR

Del ejemplo, se observa que la presión en el espacio anular no se mantendrá constante al desplazarse la burbuja de gas hasta la parte superior de la T.R. corta. El aumento en la presión hidrostática de 365 lb/pg<sup>2</sup> ahora aumenta la presión en el fondo del pozo en 365 lb/pg<sup>2</sup> y, en consecuencia, la presión estática en la tubería de perforación en 365 lb/pg<sup>2</sup> y, por lo tanto, la presión de bombeo en la misma cantidad. La presión en el fondo ahora es de 6665 lb/pg<sup>2</sup> más la pérdida por fricción en el espacio anular, y la presión estática en la superficie habrá aumentado a 1365 lb/pg<sup>2</sup>.

Se puede ejercer control solamente en un lado del sistema, el otro es resultado natural de las presiones balanceadas.

La Fig. 4.10 muestra como el colapso en la burbuja de gas afecta la presión en la tubería de perforación y en el fondo del pozo, si se mantiene constante la presión en el espacio anular mientras se bombea el gas hacia la parte superior de los lastrabarreras o de la T.R. corta en este caso.

La Fig. 4.11 muestra como aumenta la presión en la tubería de perforación y en el fondo del pozo a medida que se colapsa la burbuja de gas. Este aumento de presión en la tubería de perforación es real y ocurre si se mantiene constante la presión en la tubería de revestimiento mientras se desplaza el lodo de control o el original hacia abajo de la tubería de perforación. Si sólo se aumentara la presión en el fondo del pozo no tendría consecuencias serias; sin embargo la presión aumenta en todos los puntos debajo del fondo de la burbuja de gas, y aquí es donde se pueden crear problemas.

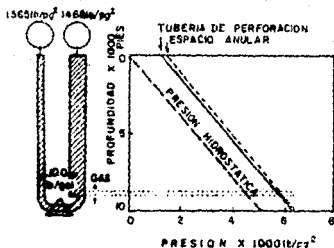


FIG. 4.10. PERFIL DE PRESIONES PARA EL COLAPSO DE LA BURBUJA DE GAS CON CONTROL EN EL ESPACIO ANULAR (CONDICIONES ESTATICAS).

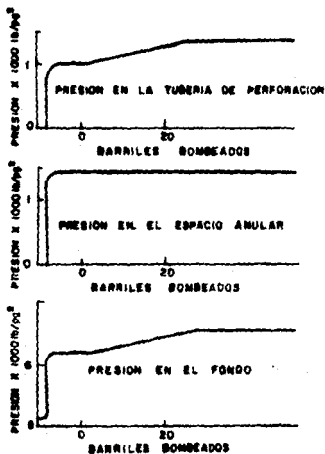


FIG. 4.11. COLAPSO DE LA BURBUJA DE GAS CON CONTROL EN EL ESPACIO ANULAR (CONDICIONES ESTATICAS).

En este ejemplo la zapata de la T.R. corta está a 9500 pies. La presión original en la zapata al cierre era de 8174 lb/pg<sup>2</sup>, la cual corresponde a una densidad del lodo equivalente de 12.5 lb/gal si se usa el control en la tubería de perforación.

Si se considera que se debe emplear el control de la presión en el espacio anular, se puede calcular el efecto del colapso de la burbuja para definir si es importante o no. Normalmente no será importante si el agujero es grande y los lastrabarreras relativamente pequeños. Será de menor importancia si la capacidad del espacio anular del agujero descubierto por debajo de la zapata de la T.R. corta es equivalente al volumen de dos o más tuberías de perforación.

Si el aumento de la presión hidrostática es significativo, pueden bombearse algunos barriles bajo control y entonces cerrar el pozo permitiendo que se estabilice. La presión en el espacio anular caerá hasta un valor más bajo que el que tenía originalmente. Repitiendo este procedimiento de bombear unos cuantos barriles hasta estabilizar el pozo, la presión en el espacio anular continuará bajando hasta que se alcance un nuevo valor de equilibrio. Este nuevo valor se puede usar para desplazar el lodo de control por la tubería de perforación.

## CAPITULO CINCO

### TOLERANCIA Y LIMITACIONES EN UN INTENTO DE BROTE

- ♦ TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE
- ♦ LIMITACIONES DE LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE
- ♦ CORRECCION A LA ELEVACION DEL FLUIDO INVASOR
- ♦ METODO GRAFICO PARA OBTENER LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE

La mayoría de los intentos de brote ocurren cuando se está movilizand o la tubería. En estos casos es más fácil controlar el pozo si se regressa la sarta de perforación al fondo. Por ejemplo, si el control se intenta a 6000 pies en un pozo con un lodo de 10 lb/gal, y la presión en la formación es de 6200 lb/pg<sup>2</sup> a 10000 pies, entonces se requerirá una densidad del lodo de control de 13.2 lb/gal en lugar de 12 lb/gal si se intenta el control en el fondo. Las lecturas de presión en la superficie tendrán muy poco significado porque se desconoce el tipo de fluido invasor y el grado de expansión de éste.

Al estar realizando el viaje de la tubería al fondo, hay que drenar una cantidad de lodo del espacio anular igual a la capacidad de la tubería de perforación más el desplazamiento de ésta a la velocidad que está siendo trasladada hacia el fondo del agujero. La presión en la superficie aumentará si la tubería de perforación se desliza dentro de una burbuja de gas y esta burbuja se alarga. La pérdida de la presión hidrostática, debido al alargamiento de la burbuja de gas, se compensa con el incremento de la presión en la superficie. El volumen de fluido que se desfoga del espacio anular debe medirse con precisión, incluyendo la pérdida de fluido que se permite que se fugue.

Si la migración de gas se vuelve evidente durante el viaje de la tubería (determinándose por una ganancia de presión más alta que la esperada), deberá desfogarse una mayor cantidad de fluido para permitir una expansión controlada del gas si no se desea romper la formación debajo de la zapata de la tubería de revestimiento. Sin embargo, normalmente la migración del gas es bastante más lenta que el deslizamiento de la tubería de perforación al regresar al fondo.

Quando se efectúa un viaje al fondo del pozo y se circula, es riesgoso parar ya que puede quedar atrapada la tubería debido a presiones diferenciales.

#### TOLERANCIA AL INTENTO DEL BROTE

Es conveniente conocer el término tolerancia al intento de brote y la forma en que se le da uso. La ecuación de la tolerancia es:

$$TIB = \frac{d}{D} ( CCF - \delta ) \quad \dots (5.1)$$

donde:

TIB = Tolerancia al intento de brote, (lb/gal).

d = Profundidad de la zapata de la última tubería de revestimiento, (pies).

D = Profundidad del pozo, (pies).

CCF = Capacidad de control de la formación o densidad de fractura, (lb/gal).

δ = Densidad del lodo ahora en uso, (lb/gal).

La tolerancia al intento de brote representa un incremento de la densidad del lodo en uso con el cual puede cerrarse el pozo con seguridad. El gradiente total de la presión sobre la formación, dentro de la que puede perforarse con el lodo en uso, se determina a partir de la suma de la TIB y la densidad del lodo.

La CCF se determina como sigue:

$$CCF = 81 + \frac{P_g}{0.052 d} \quad \dots (5.2)$$

donde:

$\delta_1$  = Densidad del lodo al correr la prueba de goteo.

$d$  = Profundidad vertical de la última tubería de revestimiento.

$P_g$  = Presión de goteo.

La máxima presión sobre la formación que puede mantenerse al cerrar el pozo, se puede determinar del modo siguiente:

$$MP_f = 0.052 (TIB + \delta) D \quad \dots (5.3)$$

donde:

$D$  = Profundidad de interés.

La máxima presión de superficie es:

$$MP_s = 0.052 (TIB) D \quad \dots (5.4)$$

Esto no significa que si se encuentra una presión de formación de este valor, pueda controlarse o cerrarse el pozo con buenos resultados.

Para una densidad del lodo dada, la tolerancia al intento de brote se reduce a medida que se extiende el intervalo del agujero abierto por debajo de la zapata. Para una profundidad dada, el valor de la TIB aumenta a medida que se reduce la densidad del lodo. Sin embargo, el valor máximo absoluto de  $(TIB + \delta)$ , y de aquí el de la presión sobre la formación, aumenta a medida que aumenta la  $\delta$ .

#### Ejemplo 5.1

Se tiene un pozo con la siguiente información:

$d = 4800$  pies

$CCF = 14.6$  lb/gal

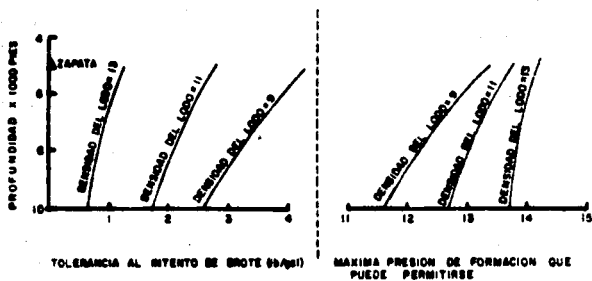


PROFUNDIDAD (pies)	DENSIDAD DEL LODO (lb/gal)		
	9	11	13
	TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE (lb/gal)		
6000	4.4	2.8	1.2
8000	3.3	2.1	0.9
10000	2.6	1.7	0.7

La presión sobre la formación que se puede aplicar es la siguiente:

PROFUNDIDAD (pies)	DENSIDAD DEL LODO (lb/gal)		
	9	11	13
	PRESION EQUIVALENTE A LA MPf (lb/gal)		
6000	13.4	13.8	14.2
8000	12.3	13.1	13.9
10000	11.8	12.7	13.7

La relación entre TIB y la presión en la formación se muestra en la Fig. 5.1



**FIG. 8.1. EFECTO DE LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE Y LA PROFUNDIDAD CON RELACION A LA DENSIDAD DEL LODO EN USO.**

Los valores comunes de la TIB son menores de la unidad pero hay valores mayores de 6 lb/gal cuando se presentan zonas de presión anormalmente altas.

La posibilidad de controlar una manifestación aumenta si la presión ejercida por la densidad del lodo se aproxima a una presión anticipada de la presión en la formación. Si se usan lodos cada vez más ligeros la posibilidad de mantener el control se reduce. No es conveniente continuar las operaciones de perforación cuando el valor de la tolerancia al intento de brote, corregido para las condiciones que se explican enseguida, cae dentro de los límites de 0.5 a 1.0 lb/gal.

#### LIMITACIONES DE LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE

La expresión TIB no proporciona ningún margen para la pérdida por fricción en el espacio anular o en la línea de estrangulación (si fuese aplicable). Tampoco toma en cuenta la invasión de un fluido de densidad menor que la del lodo en el agujero o una afluencia cualquiera. Sin embargo, estos efectos existen y debe corregirse el valor de TIB.

El efecto de la pérdida de fricción en el espacio anular ocurre desde la zapata hasta la superficie. La pérdida por fricción en el espacio anular, se convierte a su equivalente en lb/gal de la forma siguiente:

A partir de que

$$P = 0.052 \delta D$$

despejando  $\delta$ :

$$\delta = \frac{P}{0.052 D}$$

donde:

P = Presión (lb/pg<sup>2</sup>).

$\delta$  = Densidad (lb/gal).

D = Profundidad (pies).

Por lo tanto:

$$\delta d_{Pea} = \frac{d_{Pea}}{0.052 d} \quad \dots (5.5)$$

donde:

$\delta d_{Pea}$  = Densidad equivalente a la pérdida de presión en el espacio anular.

$d_{Pea}$  = Pérdida de presión en el espacio anular.

El valor de TIB entonces se reduce quedando del modo siguiente:

$$TIB = \frac{d}{D} (CCF - \delta) - \delta d_{Pea} \quad \dots (5.6)$$

Si se usa el método del ingeniero y se mantiene constante la presión en la tubería de revestimiento al desplazar el lodo de control en la tubería de perforación, la pérdida de fricción equivalente en la línea de estrangulación debe restarse también a la tolerancia al intento de brote.

$$TIB = \frac{d}{D} (CCF - \delta) - \delta d_{Pea} - \delta d_{Pie} \quad \dots (5.7)$$

en donde  $\delta d_{Pie}$  es la pérdida por fricción en la línea de estrangulación expresada en lb/gal equivalentes a la profundidad de la zapata. Considerando el ejemplo anterior donde:

$$d = 4800 \text{ pies}$$

$$CCF = 14.5 \text{ lb/gal}$$

$$D = 10000 \text{ pies}$$

$$\delta = 11 \text{ lb/gal}$$

$$\delta d_{Pes} = 0.2 \text{ lb/gal}$$

$$\delta d_{Pie} = 0.4 \text{ lb/gal}$$

Entonces la tolerancia al intento de brote se reduce de 1.7 a 1.1 lb/gal, y la presión equivalente en la formación que puede soportarse a 10000 pies se reduce de 12.7 a 12.1 lb/gal. Por lo aquí expuesto esta práctica resulta desfavorable.

Deberá usarse el método del ingeniero, bajando la presión en la tubería de perforación para compensar los cambios en la densidad del lodo.

#### CORRECCION A LA ELEVACION DEL FLUIDO INVASOR

Si se conoce el tipo de tubería que se tiene en el fondo del pozo y la medida del diámetro del agujero, se puede calcular la elevación probable del fluido invasor. Siempre deberá suponerse que el fluido que invade el pozo es gas a menos que por experiencia se sepa que el fluido más probable sea agua. Los gradientes típicos de gas, a condiciones de yacimiento, normalmente andan en el orden de 1 a 2 lb/gal.

Suponiendo que se permite la entrada de 15 barriles de la formación al pozo antes de que se ejecute una acción correctiva y si la tubería en el fondo consta de 15 lastrabarrenas de 8 pg en un agujero de 12 1/4 pg, una ganancia de 15 barriles ocupará 180 pies o 6 lastrabarrenas de 30 pies.

Si se tiene en el fondo una tubería compuesta de 15 lastrabarrenas de 4 3/4 pg, en un agujero de 5 7/8 pg, la capacidad del espacio anular para esta sección será de 5.2 barriles, los restantes 9.8 barriles del fluido invasor estarán alrededor de la tubería de perforación. Para una tubería de perforación de 3 1/2 pg la altura total del fluido que entrara al espacio anular sería de 900 pies.

La presencia de gas reduce la tolerancia al intento de brote y también la máxima presión contra la cual se puede cerrar el pozo con seguridad.

Dependiendo de donde esté la cima del gas, con respecto a la zapata de la tubería de revestimiento, se puede tener que la máxima presión superficial permisible en el espacio anular sea igual o mayor que cuando no se considera el gas.

El efecto de la entrada de fluido, y de la altura de éste, se vuelve más significativo a medida que aumenta la profundidad y por tanto la consecuente reducción del diámetro del agujero.

CASO 1. La parte superior del fluido invasor queda debajo de la zapata de la tubería de revestimiento.

La máxima presión aplicable sobre la formación sin tomar en cuenta el fluido de entrada es:

$$MPf = 0.052 [ d ( CCF - \delta ) + D \delta ] \quad \dots (5.8)$$

La presión permisible sobre la formación se reduce ahora en:

$$0.052 H ( \delta - \delta_{in} ) \quad \dots (5.9)$$

en donde:

H = Altura del fluido invasor (pies).

$\delta_{in}$  = Densidad del fluido invasor (lb/gal).

Esto se muestra en la Fig. 5.2.

La presión de formación permisible ahora es:

Restando 5.9 de 5.8

$$MPf = 0.052 [ d ( CCF - \delta ) + ( D - H ) \delta + H \delta_{in} ] \quad \dots (5.10)$$

Esto puede expresarse como densidad del lodo equivalente de la manera siguiente:

$$\text{A partir de} \quad \delta = \frac{P}{0.052 D}$$

Substituyendo la ec. 5.10 en la ec. anterior

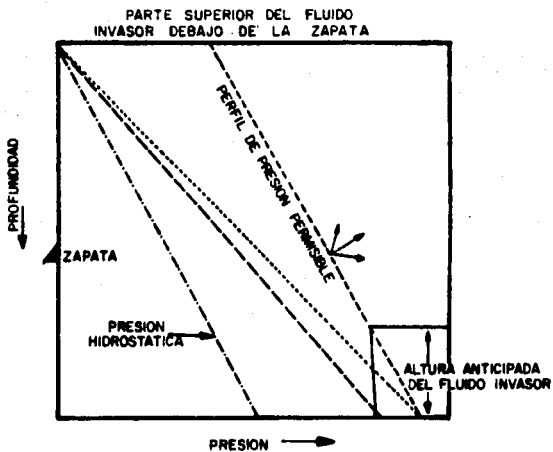
$$\delta_3 = \frac{0.052 [ d ( CCF - \delta ) + ( D - H ) \delta + H \delta_{in} ]}{0.052 D} \quad \dots (5.11)$$

$$\delta_3 = \frac{d ( CCF - \delta ) + ( D - H ) \delta + H \delta_{in}}{D} \quad \dots (5.12)$$

y el valor efectivo de la tolerancia al intento de brote es:

$$TIB = \delta_3 - \delta \quad \dots (5.13)$$

Es decir, a la máxima densidad equivalente aplicable sobre la formación ( $\delta_3$ ) se le resta la densidad del lodo empleada y ese será el valor de la tolerancia aplicable.



**FIG. 5.2. REDUCCION DE LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE A LA ENTRADA DE FLUIDO INVASOR.**



Además la TIB debe reducirse posteriormente debido a la fricción en la línea de estrangulación cuando el caso lo amerite y por la pérdida de fricción en el espacio anular como sigue:

Substituyendo 5.7 en 5.3

$$MPf = 0.052 \left[ \frac{d}{D} (CCF - \delta) - \delta dPea - \delta dPle + \delta \right] D$$

$$MPf = 0.052 \left[ d (CCF - \delta) + D (\delta - \delta dPea - \delta dPle) \right] \quad \dots (5.14)$$

Restando 5.9 de 5.14

$$MPf = 0.052 \left[ d (CCF - \delta) + D (\delta - \delta dPea - \delta dPle) - H (\delta - \delta in.) \right] \quad \dots (5.15)$$

Simplificando y reduciendo términos

... (5.16)

$$MPf = 0.052 \left[ d (CCF - \delta) + (D - H) \delta - D (\delta dPea + \delta dPle) + H \delta in. \right]$$

Convirtiendo a densidad equivalente

$$\delta 3 = \frac{d (CCF - \delta) + (D - H) \delta - D (\delta dPea + \delta dPle) + H \delta in.}{D} \quad \dots (5.17)$$

Finalmente

$$TIB = \delta 3 - \delta$$

La máxima presión permisible en la superficie no ha cambiado y permanece en  $0.052 d (CCF - \delta)$  menos las correcciones por la pérdida de fricción en el espacio anular y en la línea de estrangulación.

CASO 2. La parte superior del fluido que invade el pozo queda arriba de la zapata de la tubería de revestimiento.

Para este caso la presión de la formación permisible debe de reducirse en:

$$0.052 ( D - d ) ( \delta - \delta_{in.} ) \quad (\text{ver Fig. 5.3})$$

La presión permisible sobre la formación es ahora

$$MPf = 0.052 [ d ( CCF ) + ( D - d ) \delta_{in.} ]$$

esto puede expresarse como densidad del lodo equivalente de la siguiente manera:

$$\delta_3 = \frac{d ( CCF ) + ( D - d ) \delta_{in.}}{D} \quad \dots (5.18)$$

y el valor efectivo de la tolerancia al intento de brote es:

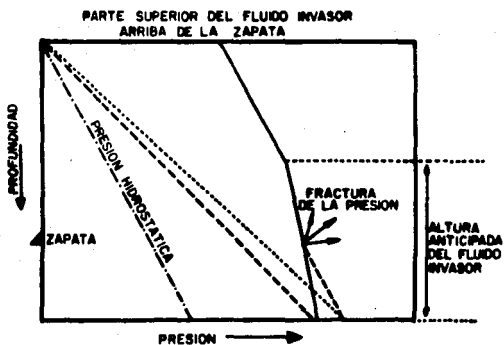
$$TIB = \delta_3 - \delta$$

Como en el caso anterior deberán hacerse correcciones por pérdidas de fricción cuando sean aplicables.

La máxima presión permisible en la superficie ha aumentado como se muestra en la Fig. 5.3 y ahora es:

$$MPs = 0.052 [ d ( CCF - \delta_{in.} ) + H ( \delta - \delta_{in.} ) - D ( \delta - \delta_{in.} ) ] \quad \dots (5.19)$$

La presión en la superficie debe reducirse al tomar en cuenta las pérdidas de presión por fricción en el espacio anular y en la línea de estrangulación si es que son aplicables.



**FIG. 8.8. REDUCCION DE LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE  
DEBIDO A LA ENTRADA DE FLUIDO.**

La tolerancia al intento de brote puede ser de gran valor si se aplica correctamente. Si se usa inadecuadamente puede conducir a operaciones muy optimistas que llevan a la suposición de una tolerancia de 1 ó 2 lb/gal y a seguir perforando hasta que ocurre un intento de brote y se cierra el pozo. Entonces se puede tener un brote subterráneo perdiendo el retorno del lodo al intentar circular. Un cálculo correcto de la tolerancia al intento de brote, que hubiese tomado en consideración todos los factores relevantes, mostraría que el pozo ya había sido perforado a mayor profundidad de la que era prudente hacerlo por razones de seguridad; indicaría que la situación no permitía que ocurriera ninguna manifestación de importancia. La densidad del lodo se hubiese aumentado hasta la presión de la formación penetrada de manera que no fuese posible un intento de brote.

#### METODO GRAFICO PARA OBTENER LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE

La tolerancia de un intento de brote muestra la capacidad de controlar éste sin fracturar la formación y provocar una pérdida de circulación.

La presión de la formación puede incrementarse repentinamente cuando se está perforando a través de una falla o una sección de presión anormalmente alta. La presión hidrostática del lodo puede ser insuficiente para controlar esta presión anormal y sobrevenir un desbalance de la formación. El desbalance de la densidad del lodo es una de las causas de los intentos de brote. La cantidad del fluido que invade el pozo en un intento de brote depende de factores como:

- ♦ Magnitud del desbalance hidrostático.
- ♦ Porosidad y permeabilidad de la formación.
- ♦ Sensibilidad y precisión del equipo de detección.
- ♦ Tiempo de reacción del personal que opera el equipo.
- ♦ Tiempo de cierre de los preventores usados para cerrar el pozo.

Una vez que el pozo se cierra y se estabiliza la presión de fondo, la presión de cierre de la tubería de perforación se usa como una medida del desbalance hidrostático.

La formación fracturada normalmente se supone que se localiza justamente debajo de la zapata de la última tubería de revestimiento. Por lo tanto, la máxima presión permisible en la tubería de revestimiento será:

$$MPPTR = 0.052 (CCF - 6) d \quad \dots (5.20)$$

Los procedimientos de control de pozos son rutinarios si no existe pérdida de circulación. El procedimiento de control manteniendo la presión de fondo constante y un arreglo normal del espacio anular restringe las posibilidades de pérdida de circulación cuando el fluido invasor se localiza debajo de la zapata de la tubería de revestimiento.

La expansión del gas desplaza al lodo de control causando un incremento de la presión en la tubería de revestimiento. Una vez que el gas se circula arriba de la zapata, la expansión adicional del gas reduce la presión hidrostática del lodo aplicada en la zapata en una cantidad igual. De este modo, con la burbuja arriba de la zapata, la presión en ésta permanece constante o se reduce al tiempo en que el lodo de control se circula.

Un pozo cerrado es un tubo en U balanceado si no hay pérdida de lodo en la formación. La presión hidrostática ejercida por el lodo, más la presión de cierre en la sarta de perforación, equilibran la presión hidrostática ejercida por los fluidos en el espacio anular y la presión de cierre en la tubería de revestimiento. La diferencia entre la PCTR y la PCTP es igual a la pérdida de presión hidrostática en el espacio anular, y es proporcional a la longitud del fluido invasor:

$$PCTR - PCTP = 0.052 (\delta - \delta_{in.}) H \quad \dots (5.21)$$

La Fig. 5.4 es el método gráfico para identificar el tipo de fluido invasor que entra en un pozo del que se tiene la siguiente información:

- . Profundidad vertical real = 2000 pies
- . Densidad del lodo = 14.5 lb/gal
- . Tubería de revestimiento = 9 5/8 pg
- . Profundidad de la zapata de la TR = 8000 pies
- . Capacidad de control de la formación  
o densidad de fractura en la zapata = 17.5 lb/gal
- . Diámetro del pozo = 8 1/2 pg
- . Diámetro de lastrabarreras = 6 1/2 pg
- . Longitud de lastrabarreras = 850 pies
- . Diámetro exterior de la tubería de perforación = 6pg

Se supone que las densidades del gas, aceite y agua salada son de 2, 6 y 9 lb/gal respectivamente.

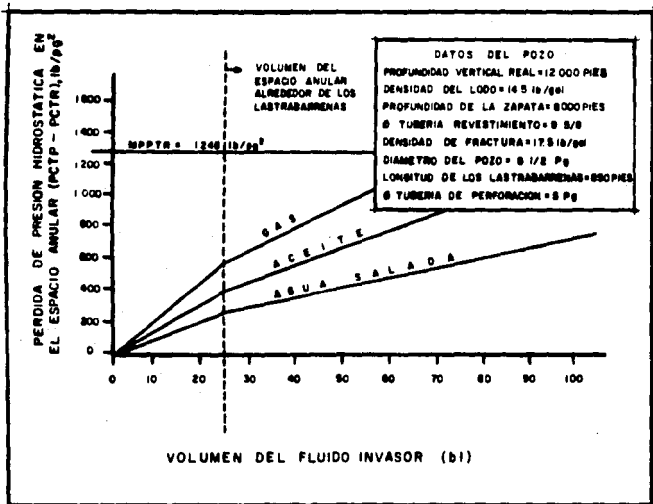


FIG. 8.4. GRAFICA PARA IDENTIFICAR EL TIPO DE FLUIDO INVASOR

Los puntos a la izquierda de la línea de gas indican un intento de brote de gas; los puntos a la derecha de la línea de agua indican un intento de brote de agua salada; y los puntos entre las líneas de gas y de agua salada indican un intento de brote de aceite, o una mezcla de gas, aceite y/o agua salada.

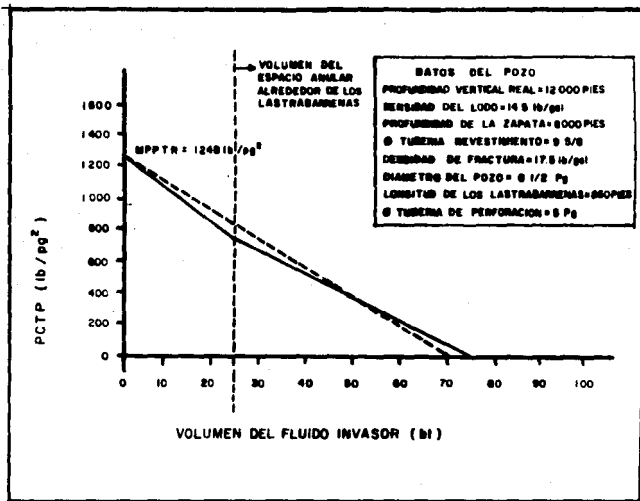
El punto de intersección entre cada línea y la línea de máxima presión permisible en la tubería de revestimiento indica la máxima afluencia de gas, aceite o agua salada, la cual puede ser barrida dentro del pozo sin causar pérdida de circulación.

La tolerancia al intento de brote identifica la cantidad máxima de fluido invasor así como el desbalance de la presión hidrostática con los que no se producen pérdidas de circulación, considerando desde que se cierra el pozo hasta que se circula el fluido invasor por arriba de la zapata de la tubería de revestimiento. Substituyendo la máxima presión permisible en la tubería de revestimiento por la presión de cierre en la tubería de revestimiento de la ecuación 5.21 la presión de cierre en la tubería de perforación resultante representa el desbalance máximo permisible de la presión hidrostática (MPCTP):

$$MPCTP = MPPTP - 0.052 (d - d_{in.}) H \quad \dots (5.22)$$

La Fig. 5.6 muestra el método gráfico para obtener la tolerancia al intento de brote cuando el fluido invasor es gas, tomando en cuenta los datos del pozo dados anteriormente, (línea continua).





**FIG. 5.5. FORMA GRAFICA PARA DETERMINAR LA TOLERANCIA AL INTENTO DE BROTE.**

Quando no hay invasión de fluidos la máxima presión de cierre permisible en la tubería de perforación es igual a la máxima presión permisible en la tubería de revestimiento. Cuando no hay un desbalance hidrostático el volumen máximo de gas permisible en el espacio anular es igual al volumen por cuya razón disminuye la presión hidrostática en el espacio anular en una cantidad igual a la máxima presión permisible en la tubería de revestimiento.

Los parámetros del intento de brote mostrados en la Fig. 5.5 representan el máximo volumen de fluido invasor permisible y el desbalance hidrostático que no causan pérdidas de circulación cuando el pozo se cierra en un inicio. No es el máximo volumen permisible de fluido invasor y desbalance hidrostático que pueden circularse a la zapata de la tubería de revestimiento, a menos que se causen pérdidas de circulación.

Si la presión de la tubería de perforación excede a la presión de fracturamiento de la formación en la zapata, se tendrá una pérdida al momento de circular el fluido invasor.

La presión de fractura de la formación se calcula así:

$$P_{frac} = 0.052 CCF d \quad \dots (5.23)$$

El volumen máximo de gas, cuando la presión es igual a la presión de fractura en la zapata, es el volumen que reduce la presión hidrostática a la máxima presión permisible en la tubería de revestimiento.

$$VMFIP = MPPTR \text{ Cap.e.a.} / [ 0.052 ( \delta - \delta_{in} ) ] \quad \dots (5.24)$$

donde VMFIP = Volumen máximo de fluido invasor permisible

Despreciando la temperatura y los efectos de compresibilidad, el producto de la presión del gas y el volumen es constante:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \dots (5.26)$$

Si la densidad del lodo en el espacio anular permanece constante, la ecuación 5.25 determina el volumen máximo equivalente de gas que entra al fondo y que se expande al máximo volumen dado por la ecuación 5.24 cuando se circula hacia la zapata.

Cuando no existe flujo de gas, el máximo desbalance hidrostático permisible es igual a la máxima presión permisible en la tubería de revestimiento. Por lo tanto, sólo se necesita determinar el punto cero de desbalance para dibujar la línea recta.

El desbalance cero representa el caso de barrido del pozo, en donde la presión inicial del gas  $P_1$  es la presión hidrostática del lodo en la sarta de perforación.

La ecuación 5.26 es la relación entre el volumen equivalente máximo inicial de gas en el fondo del pozo y el máximo volumen de gas permisible en la zapata de la tubería de revestimiento, (VMFIPZ).

$$VMFIPZ = ( P_{frac} / P_H ) VMFIP \quad \dots (5.28)$$

El volumen crítico inicial de gas para la información del pozo dada se muestra en línea punteada de la Fig. 5.6. Esta es la tolerancia al intento de brote para cualquier invasión de gas, que cuando se circula a la zapata, provoca una pérdida de circulación.

La tolerancia al intento de brote para este pozo queda completamente definida por el área que queda debajo de ambas líneas. El pozo no tolera un intento de brote si cae por encima de esta área.

Para este caso, la presión máxima en la zapata de la T.R. se presentará cuando se cierre inicialmente el pozo con una invasión de 63 bl o menos. Un intento de brote con un volumen mayor de 63 bl producirá una presión máxima en la zapata cuando la burbuja se circule hacia ésta.

La tolerancia al intento de brote graficada puede ayudar a determinar si la presión máxima en la zapata de la T.R. ocurre cuando se cierra el pozo inicialmente o cuando se circula el fluido invasor a la zapata. Esta información puede determinar qué método de control se debe usar para controlar el pozo.

Cuando se tenga una presión máxima en la zapata durante el cierre inicial, será preferible circular inmediatamente el fluido invasor a la superficie en lugar de esperar a mezclar el lodo para obtener la densidad de control. En este caso se debe usar el método del perforador para controlar el pozo en lugar del método del ingeniero que se usa con más frecuencia. Con esto se obtienen ventajas adicionales como es la de reducir la posibilidad de quedar atrapada la tubería de perforación. El método del ingeniero se recomienda en cualquier caso en que la burbuja de gas produzca en la zapata un esfuerzo máximo. La gráfica destaca la importancia de detectar lo antes posible la invasión de fluidos para cerrar el pozo de manera que sólo se permita la entrada de una mínima cantidad de fluido invasor. Cumplido esto se estará en una mejor posición para controlar un intento de brote.

## CONCLUSIONES

Todos los métodos de control de pozos se sustentan en un tubo en U. En el momento en que se rompe el tubo en U, normalmente del lado del espacio anular, se crean dos sistemas separados en operación y el clásico control de tubo en U deja de funcionar.

Cuando se controla un pozo se deberá tener cuidado en no aumentar excesivamente la densidad del lodo porque pueden resultar problemas de adherencia superficial. Más aún, se pueden romper las formaciones débiles debido a las presiones surgidas y causar la pérdida de la circulación. En cambio, se podría aumentar la tubería de revestimiento para aislar los tramos ya perforados y continuar en forma segura la perforación.

Hay tres puntos que son críticos durante el procedimiento de control de un pozo dado que crean una presión máxima en la zapata de la tubería de revestimiento que es el lugar más propicio para originar un problema de un brote y son:

- 1.- El cierre inicial.
- 2.- Cuando la burbuja de gas llega a la zapata.
- 3.- Cuando el lodo de control alcanza la barrena al usar el método del ingeniero.

La geometría del pozo afectará al resultado total tanto como lo afectan la intensidad del intento de brote y el tamaño del flujo.

Todos estos factores pueden ser críticos. La presión inicial de cierre será crítica cuando la burbuja alcance una gran altura en el espacio anular, creando por lo tanto una gran presión en la superficie.

El pozo, a la altura de la zapata, resultará dañado si la burbuja de gas ejerce su mayor presión cuando pasa por este punto durante el cierre inicial o cuando el fluido de control alcanza la barrena.

Cuando el lodo de control entra al pozo en el caso de un sobrecontrol durante el método del ingeniero, se puede crear la situación de mayor desbalance. En este caso la presión de estrangulación reflejará dos desbalances de presión hidrostática, uno debido a la densidad del lodo de control que entra, y otro debido al fluido desplazado por la expansión de la burbuja de gas.

Los tres puntos pueden ser determinantes y deben analizarse cuidadosamente a fin de obtener un buen resultado en el procedimiento de control.

Sin lugar a duda la presión en el interior de un pozo es el parámetro más importante cuando está presente un intento de brote. La presión de fondo es la que permite o evita el flujo de los fluidos de las formaciones hacia el interior del pozo o viceversa, por lo tanto de su adecuado manejo dependerá el éxito de la operación para controlar un pozo.

## B I B L I O G R A F I A

- ♦ "Fundamentals Of Pressure Control"  
H.A. Kendall, Amoco International Oil Co.  
Petroleum Engineer Internacional, 1978.
  
- ♦ "Manual de procedimientos y normas operativas para la prevención,  
detección y control de brotes en pozos petroleros"  
Gerencia de Perforación.  
Petróleos Mexicanos.
  
- ♦ "Forward for Advanced Well Control"  
L. William Abel, Preston L. Moore y otros.  
Moore and Abel Inc. 1987
  
- ♦ "Handy Method Helps Define Kick Tolerances"  
Gary Nance, Randy Smith Well Control Schools.  
Petroleum Engineer Internacional, Feb. 1990.
  
- ♦ "Offshore Blowout Prevention and Well Control"  
Petroleum Industry Training Service.

+ "Reglamento de seguridad para la detección y control de brotes en unidades perforadoras de la Zona Marina"

Gerencia de Perforación.

Petroleos Mexicanos.