



6  
247

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

## CONTROL DE BROTES EN LA PERFORACION DE POZOS PETROLEROS

### TRABAJO ESCRITO

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A:

*José Baltazar Domínguez Hernández*

CIUDAD UNIVERSITARIA

MEXICO, D. F. 1982



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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

### CAPITULO I

Introducción y generalidades

### CAPITULO II

Importancia de la distribución de presiones

II.1 Presión hidrostática

II.2 Presión de circulación

II.3 Presión en el estrangulador y en la línea de estrangulación

II.4 Densidad equivalente del lodo

II.5 Gradiente de presión de fractura

### CAPITULO III

Descripción y análisis de un brote

III.1 Condiciones del pozo al ocurrir el brote

III.2 Tipo de fluido invasor

III.3 Comportamiento del gas

### CAPITULO IV

IV.1 Método del perforador o de dos ciclos de circulación

IV.2 Método del Ingeniero o de un ciclo de circulación

IV.3 Limitaciones del control de la presión

### CAPITULO V

Operación del equipo

V.1 El colapso de la burbuja

V.2 La fricción en el espacio anular

V.3 Presiones en el múltiple de estrangulación

## CAPITULO VI

### Control de Brotes

#### VI.1 Tolerancia al brote

#### VI.2 Limitaciones

#### VI.3 Correcciones por altura de fluido

### Bibliografía.

## CAPITULO I

### INTRODUCCION Y GENERALIDADES

El propósito del presente trabajo es dar una idea al lector de uno de los problemas encontrados durante la perforación de pozos de petróleo, como es el caso de los brotes, que puede representar uno de los más peligrosos y costosos contratiempos.

En el pasado los pozos se perforaban a profundidades someras, pero en la actualidad la necesidad de obtener nuevas fuentes de hidrocarburos a hecho que se perfore en zonas de acceso más difícil y a mayor profundidad lo que hace más laboriosas y peligrosas las operaciones, ya que mientras la profundidad de perforación se incrementa las formaciones presentan presiones cada vez mayores, a las esperadas durante la operación de perforación, lo que puede ocasionar brotes de menor o mayor magnitud.

Por ello el personal de operación del equipo de perforación deberá contar con una buena preparación y dominio de las técnicas de control de brotes pues si en un momento dado sucediera alguno, se tenga la suficiente capacidad y destreza para eliminar el peligro que pudiera representar -- el citado brote.

Por lo que se refiere a los brotes en un pozo podemos considerar tres etapas; esto es con el objeto de tener un concepto claro de lo que en realidad es un brote del pozo y son las siguientes:

1. Intento de brote
2. Brote
3. Descontrol o flujo descontrolado

En las dos primeras etapas aunque no se tengan condiciones normales el pozo está bajo control, no así para la tercera etapa en la que el fluido que invade el pozo lo abandona en forma descontrolada, ya sea en la superficie a través de conexiones dañadas o dentro del pozo a formaciones débiles o alrededor de las tuberías de revestimiento hacia la superficie. La mejor forma de prevenir un brote consiste en detectarlo oportunamente mediante la apreciación de los signos o señales previas a un brote, tales como:

- (a) Incremento en el nivel de lodo en las presas
- (b) Incremento en el flujo del lodo de retorno
- (c) El pozo se llena con menor volumen que el calculado al sacar la tubería
- (d) Incremento en la velocidad de perforación
- (e) Decremento en la presión de bombeo al estar circulando
- (f) Lodo gasificado (que no necesariamente indica un brote)
- (g) Lodo contaminado con agua o incremento en la salinidad del lodo

Durante las operaciones de perforación normal el lodo es circulado a través del sistema mediante el uso de una bomba. Este lodo es bombeado desde las presas hacia la tubería de perforación pasando a través de esta, de los tubos lastrabarrena y por la barrena, subiendo después hacia la superficie por el espacio anular entre la pared del pozo y la tubería de perforación, fluyendo entonces por el preventor de brotes para que, después de ser limpiado de impurezas, sea nuevamente succionado por

la bomba y efectúe otra circulación.

La circulación del lodo sirve para diferentes funciones:

levanta los cortes de roca transportandolos hacia fuera del pozo, suspende dichos cortes durante algún tiempo cuando la circulación es detenida, recubre las paredes del pozo con una película arcillosa o enjarre y contrarresta las presiones subterráneas. La presión ejercida por la columna de lodo impide que los fluidos de la formación penetren al pozo, mientras esta presión sea mayor que la presión de los fluidos contenidos en la formación. Si en algún momento la presión ejercida por la columna de lodo es menor que la presión de los fluidos de la formación, estos tenderán a entrar al pozo y de no corregirse esta diferencial de presión, dichos fluidos penetrarán al pozo. Esto se le conoce como un intento de brote.

Lo anterior puede ocurrir por causas tales como el uso de un lodo de baja densidad, abatimiento del nivel del lodo dentro del pozo, succión -- causada al levantar la tubería de perforación demasiado rápido o por perforar dentro de una zona de presión anormalmente alta. El resultado en los casos anteriores será la entrada de fluido de la formación al pozo mezclandose dicho fluido con el lodo de perforación contenido en el espacio anular. Puesto que el fluido de la formación es casi siempre más ligero que el lodo, se incrementará la diferencial de presión en el sistema, y a menos que el pozo sea rápidamente matado, continuara entrando -- fluido al pozo desplazando al lodo hasta que el fluido alcance la superficie, lo que puede resultar en un descontrol.

Los procedimientos comunmente empleados para matar pozos de profundidad moderada, aplicados a brotes en pozos bastante profundos, efectivamente pueden dar lugar a que estos pozos se pierdan por descontrol. Es necesario tener un conocimiento completo de las presiones a través de todo el sistema durante la perforación a grandes profundidades, sobre todo cuando ocurre un intento de brote, a fin de poder ejercer siempre un control adecuado.

## CAPITULO II

### IMPORTANCIA DE LA DISTRIBUCION DE PRESIONES.

Los procedimientos de control de un brote requieren un conocimiento de los fenómenos físicos que suceden en el pozo y dentro de estos es imprescindible conocer la distribución de presiones en tiempo y lugar en todo el sistema. Entendiéndose como sistema el conjunto formado por las conexiones - superficiales, el pozo y la formación, es decir no solo se debe tomar en cuenta la presión en el fondo del pozo ó en el estrangulador sino la presión en todos y cada uno de los puntos del sistema o sea la distribución de presiones.

Los métodos más usuales para controlar el brote de un pozo son: El método comunmente llamado del perforador ó de dos ciclos de circulación y el método del Ingeniero ó de un ciclo de circulación.

En realidad solo existe un método de control y consiste en mantener la -- presión de fondo de tal manera que su valor sea igual o ligeramente mayor al de la formación.

Todos los métodos existentes tratan de realizar lo anterior pero en ocasiones el conocimiento inadecuado de la distribución de presiones puede ocasionar que se aplique demasiada presión a las formaciones expuestas de bajo de la zapata de la última tubería de revestimiento cementada y se -- fracture en las formaciones más cercanas a dicha zapata, ya que a esta -- profundidad la presión de fractura será menor que la que soporta la formación en el fondo del pozo.

Para el caso en que el fluido que entró al pozo sea agua salada el efecto causado será de poca importancia ya que ésta es de una densidad casi siempre menor que la del lodo de perforación y la presión ejercida por esta será menor que la de fractura soportada por la formación. No así para el caso en que el fluido que entró al pozo sea gas, pues la burbuja de gas (como comunmente se le llama al fluido invasor que penetra al pozo cuando es gas) ascenderá por el espacio anular debido al fenómeno de segregación gravitacional, a una presión igual a la de la formación y conforme se acerque a la superficie la presión de esta sumada a la presión hidrostática de la columna de lodo abajo y arriba de dicha burbuja sobrepasará la presión de fractura, induciendo una fractura de las formaciones expuestas inmediatamente abajo de la última zapata cementada.

El control de un pozo puede ser dividido en tres estados: Primario, secundario y terciario.

Tenemos un estado de control primario cuando la presión hidrostática de la columna de lodo es al menos un poco mayor que la de la formación en cualquier punto del pozo.

Esto es cuando se circula normalmente (prevector abierto).

El estado de control primario puede convertirse en el secundario cuando se perfora alguna formación que tenga una presión mayor que la hidrostática generada por la columna de lodo y esto puede suceder por no mantener el peso del lodo en el valor adecuado, por circular un lodo ligero, no mantener el pozo lleno al sacar la tubería, efectual succión al levantar demasiado rápido la tubería o causar incrementos bruscos de presión al bajar demasiado rápido la tubería y de esta manera fracturar alguna forma --

ción, induciendo así pérdidas de circulación que pueden causar que el nivel de lodo dentro del pozo baje a tal grado que la columna de lodo genere una presión hidrostática que no sea suficiente para contrarrestar la presión de la formación y entonces los fluidos invadan el pozo.

El estado de control secundario se presenta cuando la entrada de fluido al pozo requiere de algún equipo superficial de control (preventor cerrado).

Entonces el pozo puede cerrarse y la presión de formación contrarrestarse al sumar las presiones hidrostática y superficial.

El estado de control secundario se puede perder si se ejerce demasiada sobre la formación que aporta el fluido ó sobre las formaciones expuestas en el pozo, induciendo de esta manera una fractura.

El estado de control terciario se presenta al perderse el secundario y los fluidos invaden todo el pozo y penetran a otras formaciones más débiles ó de menor presión de ruptura. Cuando esto sucede se deben emplear técnicas adecuadas para recuperar ya sea el estado de control secundario ó el primario.

## II.1 Presión Hidrostática.

La presión hidrostática es de suma importancia en las operaciones de control de un pozo, por lo cual es necesario entender sus efectos y consecuencias en el fenómeno de los brotes.

La presión hidrostática se relaciona al peso específico del lodo y a la profundidad del pozo de la siguiente forma:

$$p = \frac{\gamma h}{10}$$

donde: P es la presión Hidrostática en Kg/cm<sup>2</sup>

$\gamma$  es el peso específico del lodo en g/cm<sup>3</sup> y h es la profundidad en m.

En la fórmula anterior la profundidad considerada, debe ser la profundidad vertical del pozo, para el caso de un pozo dirigido o inclinado deberá obtenerse dicha profundidad y no considerar la medida con la sarta de perforación.

Es difícil tener una visión clara o representar las presiones en el espacio anular por lo que aquí se tomará en cuenta el concepto de un tubo en U (figura 2.1), para que el lector pueda apreciar en una forma más explícita sus efectos y consecuencias. En este tubo en U la parte más gruesa representa la tubería de perforación, localizándose la barrena en la parte inferior.

Al analizar el tubo en U se debe tomar en consideración que este no toma en cuenta cambios de sección en el espacio anular que en la realidad se presentan debido a las dimensiones de los tubos lastrabarrena o por la disminución del diámetro del pozo, lo cual se torna crítico en pozos donde se usan demasiados estabilizadores ó cuando ocurre un brote al estar perforando debajo de una tubería corta de un diámetro pequeño.

En si cualquier cambio en el área de sección transversal tendrá como consecuencia, si el fluido que entró al pozo es gas, el colapso de la burbuja ó sea esta disminuirá de sección transversal pero aumentará en su longitud - lo que puede resultar en una modificación del procedimiento de control.

## II.2 Presión de Circulación.

Los procedimientos de control de un brote necesitan de la circulación para sacar el fluido que entró al pozo y reemplazar el lodo original y el lodo

contaminado por un lodo suficientemente pesado para matar el pozo<sup>1</sup>.

También es necesario tener un concepto claro de la hidráulica del pozo, ya sea cuando se perfora normalmente ó cuando se presenta algún brote. Desafortunadamente la mayoría de los métodos comunes para controlar un pozo omiten ó le dan poca importancia a las consideraciones referentes a la presión en condiciones dinámicas ó sea no toman en cuenta las caídas de presión por --fricción, lo que da lugar a cometer serios errores.

Por otra parte las bombas usadas en los equipos de perforación deben ser capaces de levantar la presión de tal forma que sea posible vencer las caídas de presión que se generan al ponerse en movimiento el fluido de perforación a través del sistema de circulación del pozo.

Si en un caso que se toma como ejemplo la bomba estuviese trabajando a un determinado ritmo y las caídas de presión a través del sistema de circulación fueran del siguiente orden: En el equipo superficial de  $7 \text{ Kg/cm}^2$ , a través de la barrena de  $112 \text{ Kg/cm}^2$ , dentro de la sarta de perforación de  $77 \text{ Kg/cm}^2$  y en el espacio anular del orden de los  $14 \text{ Kg/cm}^2$ ; entonces la caída de presión total será la suma de todas las anteriores ó de  $210 \text{ Kg/cm}^2$ .

Esta caída ó diferencia de presión total equivale a la presión de bombeo, - la cual se observará en el manómetro del tubo vertical. Una vez calculadas las caídas de presión sumándoselas a la presión hidrostática se conocerá la verdadera presión en cualquier parte del pozo. Por ejemplo si a 1500 m., la presión dentro de la tubería de perforación es de  $180 \text{ Kg/cm}^2$  con el pozo es

1 En lo sucesivo se llamará al lodo pesado para matar el pozo lodo nuevo, - con el propósito de simplificar los términos empleados, así como se empleó el de lodo original.

tático, se tendrá que la presión se incrementará a  $344.5 \text{ Kg/cm}^2$  cuando se circula.

Por lo que se puede decir que la presión por fricción requerida en cualquier punto del pozo, es siempre la suma de todas las caídas de presión determinadas a partir del punto en cuestión hasta la línea de descarga en dirección del flujo.

### II.3 Presiones en el estrangulador y en la línea de estrangulación.

Las presiones en el estrangulador y en la línea de estrangulación son de importancia y también deben ser tomados en cuenta en los cálculos, sobre todo en el caso de pozos marinos, pues en estos la línea de estrangulación es mucho más larga que en los de la tierra, ya que como esta se encuentra conectada al cabezal de tuberías el cual se encuentra localizado en el fondo del mar (caso de pozos marinos), obvio es que tendremos una longitud de la línea de estrangulación mayor, lo que dará lugar a una caída de presión por fricción de considerable magnitud, la cuál en los equipos terrestres se puede considerar despreciable.

Muchas de las personas encargadas de la operación de los equipos de perforación mantiene la presión en el espacio anular constante cuando se pone a trabajar la bomba e inclusive cuando esta circulando el lodo nuevo. Estas personas consideran que las caídas de presión por fricción en el espacio anular son nulas, despreciando también las caídas de presión en la línea de estrangulación, es más no toman en cuenta el colapso de la burbuja de gas. Desafortunadamente todas estas presiones al sumarse pueden ser de una magnitud tal que la presión dentro del pozo se incremente a tal grado que de lugar a que

se fracture alguna de las formaciones expuestas.

Considerese el ejemplo anterior (inciso II.2) de un pozo que se esta circulando con un lodo de  $1.2 \text{ gr/cm}^3$ , pero ahora para el caso de un equipo marino. Se tiene preventor cerrado, con una línea de estrangulación conectadas a un múltiple de estrangulación y el estrangulador se coloca en posición totalmente abierta.

Cuando se inicia el bombeo a determinado ritmo, la caída de presión por fricción en la línea de estrangulación podría considerarse que fuera de  $35 \text{ Kg/cm}^2$ , entonces en el manómetro del tubo vertical que en el caso anterior tenía una lectura de  $210 \text{ Kg/cm}^2$  ahora se leeran  $245 \text{ Kg/cm}^2$ , procediéndose a ajustar el estrangulador hasta que se lean  $35 \text{ Kg/cm}^2$ , por lo que en el manómetro del tubo vertical deberá registrarse una presión de  $280 \text{ Kg/cm}^2$ .

Lo anterior puede ilustrarse en la figura 2.2.

#### II.4 Densidad equivalente del lodo de circulación.

El cálculo de la densidad equivalente de circulación se debe hacer para tener un panorama completo de la distribución de presiones y para los ajustes en la densidad del lodo. Dicho cálculo puede ser efectuado mediante la siguiente fórmula:

$$\gamma_e = \frac{10 P_t}{h}$$

Donde  $\gamma_e$  es la densidad equivalente del lodo en  $\text{gr/cm}^3$

$P_t$  es la presión total en  $\text{Kg/cm}^2$

$h$  es la profundidad en m.

La presión total comprende la presión de la descarga de la bomba, la que in

cluirá la suma de las presiones hidrostáticas de cualquier fluido arriba del punto en cuestión más las caídas de presión en el espacio anular, la línea de estrangulación (si se tiene), y cualquier presión impuesta por el estrangulador aunque esté en posición totalmente abierta.

La densidad equivalente de circulación se determina para el pozo en condiciones estáticas donde se tiene circulación normal.

#### II.5 Gradiente de presión de fractura

Cualquier formación puede ser fracturada si se le aplica demasiada presión, es por esto que muchos pozos se han perdido.

Las consideraciones del gradiente de presión de fractura son de gran importancia para el desarrollo de un programa de perforación aceptable.

En el caso de pozos marinos la profundidad del agua tiene una influencia de importancia en el gradiente de presión de fractura.

Es decir a medida que la profundidad del agua aumenta la densidad equivalente del lodo para una profundidad considerada será menor, lo cuál se puede apreciar en la figura 2.3 .

Para poder llevar a cabo una buena operación de perforación ya sea en pozos marinos como en terrestres es necesario que la densidad equivalente del lodo debajo de la zapata de la última tubería de revestimiento cementada sea menor que el gradiente de presión de fractura en ese punto.

De lo expuesto anteriormente podemos decir que si la profundidad del agua del mar aumenta, se tendrán mayores dificultades para conducir adecuadamente la perforación del pozo, debido a que se pueden fracturar las formaciones con una facilidad relativamente mayor, también las caídas de presión por fricción en la línea de estrangulación y en el estrangulador tendrán un efecto mayor.

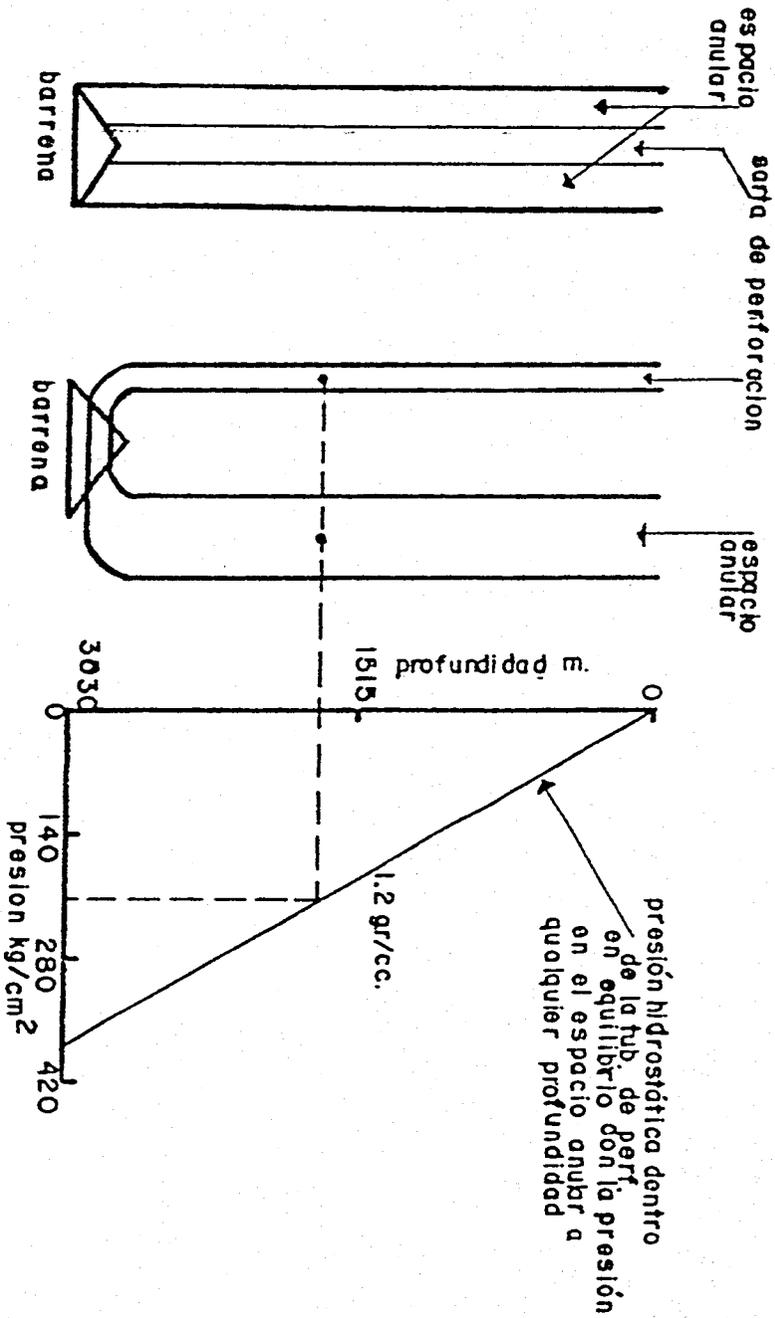


Fig. 2.1 Concepto del tubo en U que ilustra la relación de presión entre el espacio anular y la tubería de perforación sin tomar en cuenta cambios de sección en el espacio anular.

Simbología : Presión Hidrostática —·—·—·—·—  
 Circulación Normal —·—·—·—·—  
 Circ. a través de la línea de estrang. - Estrang. abierto ———  
 Circ. a través de la línea de estrang. con 35 kg/cm<sup>2</sup> en el estrangulador. ———

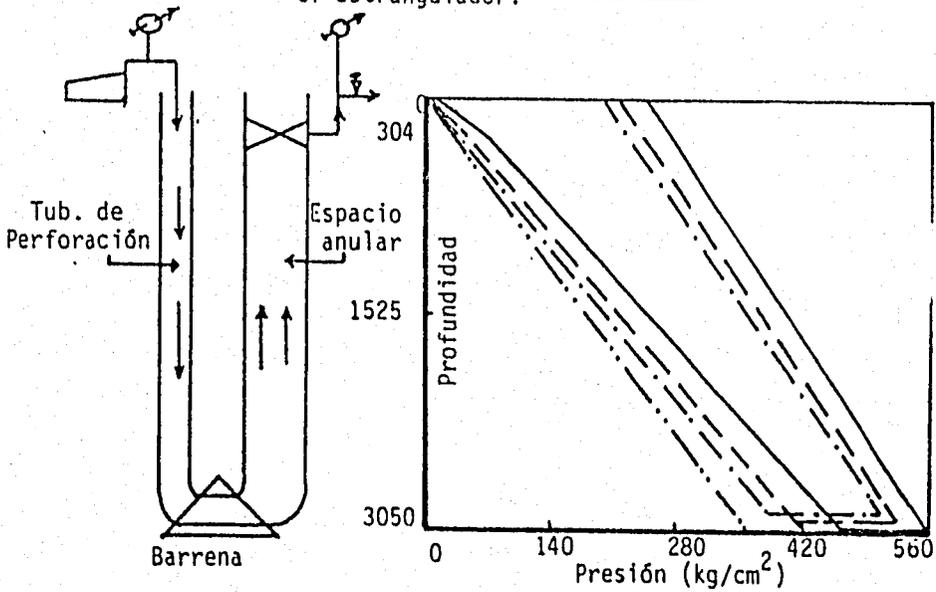


Fig. 2.2 Gráfica de presión absoluta que muestra el efecto de la presión de fricción en la línea de estrangulación y en el estrangulador a la entrada del sistema

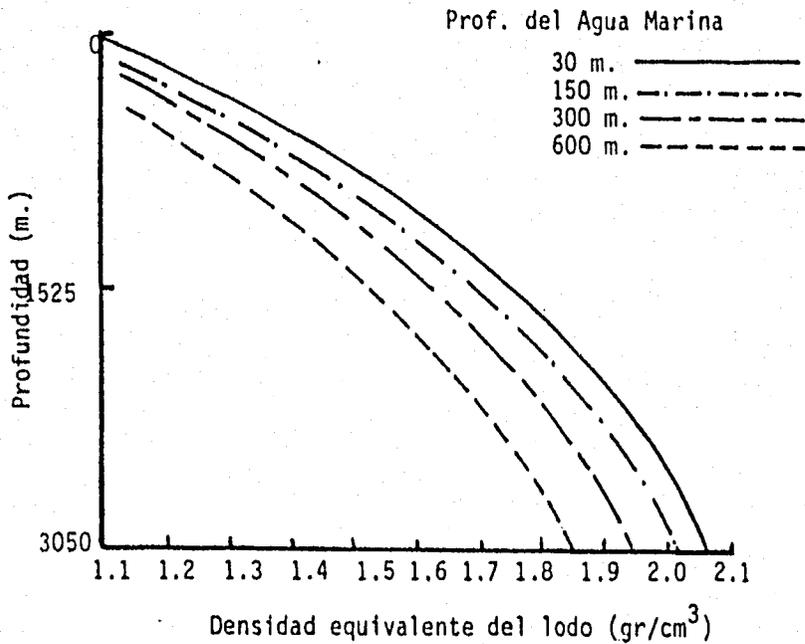


Fig. 2,3 Efecto causado por la profundidad del agua de mar en el gradiente de presión de fractura de la formación.

## C A P I T U L O III

### DESCRIPCION Y ANALISIS DE UN BROTE

#### III.1 Condiciones previas al brote

Una vez vistos los conceptos básicos de la distribución de presiones en un pozo, con lo cuál ya se tiene una idea de lo que puede ocurrir en un pozo al no tener presentes dichos conceptos; ahora se tratará de analizar y describir el fenómeno de un brote.

Para este propósito considerese que dicho brote ocurre bajo las siguientes condiciones: no se tienen tubos lastrabarrena, ni línea de estrangulación y la tubería se encuentra cementada correctamente.

El primer procedimiento que se empleará para matar el pozo será el del perforador ó de dos ciclos de circulación en este procedimiento el primer ciclo de circulación se hace con objeto de sacar el fluido invasor (fluido de la formación que entró al pozo), efectuándose posteriormente el segundo ciclo, el cuál se diferencia del primero por el hecho de que este se efectúa con lodo nuevo ó sea lodo de una densidad mayor que la del lodo usado en el primer ciclo de circulación.

Las condiciones previas al brote son:

Profundidad (h) = 3050 m

Presión reducida de circulación <sup>(1)</sup>(P<sub>rc</sub>) = 56 Kg/cm<sup>2</sup>

Peso específico del lodo ( $\gamma$ ) = 1.2 Kg/cm<sup>3</sup>

Número de emboladas para llenar la sarta de perforación = 1800

Capacidad unitaria del espacio anular (CA) = 15 lts/m

Caída de presión en el espacio anular = 7 Kg/cm<sup>2</sup>

(1) Presión reducida de circulación es la presión mínima necesaria para circular el fluido de perforación ó sea la presión medida al gasto mínimo que puede dar la bomba para circular el fluido de perforación.

Incremento de volumen en las presas de lodo =  $4.5 \text{ m}^3$

Presión de cierre en la tubería de perforación ( $P_{tp}$ ) =  $70 \text{ kg/cm}^2$

Presión de cierre en la tubería de revestimiento ( $P_{tr}$ ) =  $105 \text{ kg/cm}^2$

Presión hidrostática ( $P$ ) =  $365 \text{ kg/cm}^2$

Presión de formación ( $P_f$ ) =  $435 \text{ kg/cm}^2$

Peso específico del lodo nuevo ( $\gamma_c$ ) =  $1.4 \text{ gr/cm}^3$

$$\gamma_c = \gamma + \frac{10 P_{tp}}{h} = 1.2 + \frac{10(70)}{3050} = 1.4$$

### III.2 Tipo de fluido invasor

Para efectuar el análisis de un brote es de mucha utilidad conocer - que tipo de fluido entró al pozo, ya que conociendo el tipo de flu - ido invasor se podrá decidir acertadamente sobre las precauciones a tomar, como son tener listos separadores de gas o tirar el lodo con - taminado con agua salada.

Especial atención debe tenerse para el caso en que el fluido invasor es gas, ya que este ascendera debido a la circulación causada por - el bombeo y por su expansión, además de que como es de una densidad - mucho menor que la del lodo en el espacio anular, subira a través de este por diferencia de densidades.

Durante este ascenso ocurriran efectos de gran expansión, debido a - que la presión a la cuál estará sujeta la burbuja de gas conforme es - ta se acerque a la superficie ira disminuyendo. Deberá tomarse en cu - enta también que como el gas ofrece menor resistencia a fluir por el - estrangulador que un líquido, sera necesario reducir el tamaño de di - cho estrangulador en el momento en que el gas inicie su viaje hacia-

la superficie, de no reducir el tamaño del estrangulador sucederá - que la presión en el fondo del pozo disminuirá y un nuevo volumen de gas entrará al pozo.

Debe tenerse también cuidado de no cerrar muy rápidamente el estrangulador ya que un cierre rápido de este nos ocasionara aumentos bruscos de presión que pueden ser soportados por las conexiones superficiales o por las tuberías, más no así por las formaciones cercanas a la zapata de la última tubería de revestimiento cementada, con lo que se fracturaría la formación y los problemas se harían aún mayores.

Para lograr una operación de éxito en este periodo del brote, se recomienda estrangular lentamente e ir observando el comportamiento de la presión en la tubería de perforación.

Una indicación del volumen de fluido que entró al pozo se puede apreciar por medio del incremento de volumen de lodo en las presas, pudiéndose de esta manera conocer la altura del fluido invasor, sabiendo de antemano la capacidad unitaria del espacio anular y tomando en cuenta los cambios de sección en dicho espacio si es que existen.

Sin duda lo que nos determina el tipo de fluido que penetró al pozo, se puede decir que es su densidad, la cuál la podemos determinar con la siguiente fórmula:

$$\gamma_{fi} = \gamma - \frac{10(P_{tr} - P_{tp})}{H}$$

Donde :  $\gamma_{fi}$  es la densidad de la columna de fluido invasor

H es la altura de la columna del fluido invasor y se determina con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{\Delta V}{CA}$$

Donde:  $\Delta V$  es el incremento de volumen de lodo en las presas y

CA es la capacidad unitaria del espacio anular

Una vez conocido el valor de la densidad del fluido invasor, se compara con los rangos típicos establecidos para gas, aceite y agua, los cuales son:

valores menores que  $0.4 \text{ gr/cm}^3$  indicarán gas

valores mayores que  $0.9 \text{ gr/cm}^3$  indicarán agua salada y

valores entre  $0.4$  y  $0.9 \text{ gr/cm}^3$  indicarán una mezcla de aceite, gas y/o agua.

Para el ejemplo considerado en este capítulo se tiene que

$$H = \frac{4.5}{.015} = 300 \text{ m}$$

$$\gamma_{fi} = 1.2 - \frac{(105 - 70) 10}{300} = 0.1 \text{ gr/cm}^3$$

Por lo que se deduce que para este ejemplo el fluido invasor es gas.

### III.3 Comportamiento del gas

El comportamiento de un gas como fluido invasor esta gobernado por las leyes de Charles y Boyle y se combinan de la siguiente forma:

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

Si se considerará una masa de gas dada, bajo condiciones de presión y temperatura también dadas, nos ocuparía un cierto volumen que se

podría calcular conociendo el factor de compresibilidad (Z) en función de las condiciones de presión y temperatura a que se encontrara dicha masa; la misma masa confinada a distinta presión y temperatura nos ocupara un volumen diferente al primero.

Lo anterior es tomado en consideración para un estudio riguroso, pero para efectos de campo la siguiente relación es válida:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

donde  $P_1$  y  $P_2$  son las presiones a los tiempos 1 y 2 y los

$V_1$  y  $V_2$  serán los volúmenes a estas presiones respectivamente. Siguiendo con el ejemplo de este capítulo se tendrá que los  $4.5 \text{ m}^3$  de gas que entraron al pozo si llegan a la superficie en una forma descontrolada o sea sin controlar la expansión del gas, se tendrá que el volumen ocupado por este se incrementará conforme la presión disminuya. Por ejemplo si a la mitad de la profundidad del pozo la presión hidrostática arriba de la burbuja de gas fuera de  $180 \text{ kg/cm}^2$ , su volumen sería de :

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{435 \times 4.5}{180} = 10.8 \text{ m}^3$$

En estas condiciones el gas ocuparía en el espacio anular una altura de un poco más del doble de la que tenía originalmente. Esto hará que la presión hidrostática total en el espacio anular disminuya, permitiendo así que el gas de la formación entre al pozo con mayor facilidad que en un principio desplazando el lodo de dicho espacio, y si se permite que la presión continúe disminuyendo cuando el gas llegue a la superficie estará a la presión atmosférica ( $P = 1.033 \text{ kg/cm}^2$ ) y ocupará un volumen

de  $1900 \text{ m}^3$ , con lo que se tendrá el espacio anular completamente lleno de gas y el pozo descargando gas.

de lo anterior se puede deducir que la primera regla en control de pozos sea: " si el pozo puede cerrarse, hágalo tan rápido y seguro como sea posible, permitiendo que de esta manera entre la mínima cantidad de fluido al pozo ".

Por otra parte, hace algún tiempo los encargados de control de pozos sugirían que el fluido invasor fuera sacado manteniendo constante el volumen de lodo en las presas para evitar que entrara más fluido al pozo, lo que funcionaba de el fluido invasor era agua salada, pero no para el caso que se tratara de gas, ya que en este último hay que controlar su expansión - para poder circular con seguridad el pozo.

Ahora considerese que la burbuja de gas llega a la superficie sin expandirse, entonces tendrá el volumen y la presión original.

Esto es:

de  $P_1 V_1 = P_2 V_2$  se tiene que

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2}$$

y como  $V_2 = V_1$  se tendrá que  $P_2 = P_1$

Continuando con el ejemplo presentado en este capítulo, se tendrá que --- cuando la burbuja de gas alcance la superficie sin expandirse, la presión en el contacto lodo - gas será de  $435 \text{ Kg/cm}^2$  que es su presión original, pero como debajo de la burbuja de gas se tiene una columna de  $2748 \text{ m}$  de lodo de  $1.2 \text{ gr/cm}^3$ , entonces la presión en el fondo del pozo será de:

$$435 + \frac{1.2 \times 2748}{10} = 760 \text{ kg/cm}^2$$

que es una presión demasiado alta y se induciría alguna fractura en las formaciones expuestas, de hecho en las formaciones cercanas a la zapata de la última tubería de revestimiento cementada.

De lo anterior se puede deducir que una segunda regla en control de pozos sea: "Después de cerrar el pozo, no permita que la burbuja de gas sea llevada a la superficie sin controlar su expansión".

También algunas personas desplazan el lodo nuevo del pozo manteniendo la presión en el espacio anular constante.

Supongase que se mantiene la presión en el espacio anular constante hasta que el gas llegue a la superficie y solo se ha circulado lodo original entonces tendríamos que el volumen de gas se incrementaría, en el caso del ejemplo que se ha venido analizando a:

$$V_2 = \frac{4500 \times 435}{105} = 18.6 \text{ m}^3$$

Con lo que la burbuja de gas ocupará ahora una longitud de 1248.8 m, causando que la presión de el fondo del pozo disminuya el valor de 334 kg/cm<sup>2</sup> (105 de la presión en el espacio anular más 12.4 kg/cm<sup>2</sup> de la columna de gas más 216.6 kg/cm<sup>2</sup> de la columna de lodo) o sea 101 kg/cm<sup>2</sup> menor que la presión de formación, lo que permitiría que una segunda burbuja entre al pozo.

En realidad considerando los tubos lastrabarrena el efecto sería menor pero también disminuiría la presión de fondo del pozo.

De lo que se puede deducir que una tercera regla en control de pozos sea: "Incrementar la presión superficial de tal manera que conforme

la burbuja de gas viaje hacia la superficie, se tenga una expansión controlada y se mantenga la presión de fondo constante " .

## CAPITULO IV

### METODOS DE CONTROL

#### IV.1 Método del Perforador

A través de los años se le han dado muchos nombres a los métodos de control de un pozo, pero los más populares que han y siguen siendo empleados son los métodos del perforador y del ingeniero.

El método del perforador como se dijo anteriormente es un método de dos ciclos de circulación y se puede describir mediante una secuencia de eventos que es la siguiente:

- (1) Se cierra el Pozo
- (2) Se arranca la bomba y se empieza a bombear
- (3) Se lleva el gas hasta la superficie y se saca
- (4) Se inicia la circulación del lodo nuevo
- (5) El lodo nuevo alcanza la barrena
- (6) El lodo nuevo regresa a la superficie

Al llegarse a este último punto el pozo deberá estar muerto.

A través de toda la secuencia es importante interpretar el comportamiento de la presión estática de la tubería de perforación en la superficie. Esta presión se observa solamente con el pozo cerrado y sin bombear lodo.

La presión estática de la tubería de perforación sumada a la presión hidrostática del lodo causada en el fondo del pozo que es conocida representa la presión interior en el mencionado fondo del pozo y deberá equilibrar o contrarrestar la presión de formación para evitar que entre más fluido de la formación al pozo.

con lo anterior se puede apreciar que no se toman en cuenta otras presiones o caídas de presión relacionadas con condiciones de flujo.

Sean los mismos 3050 m de profundidad y un lodo de  $1.2 \text{ gr/cm}^3$  del ejemplo del capítulo anterior. Como se tiene toda la tubería de perforación llena con lodo de  $1.2 \text{ gr/cm}^3$  y en virtud de que la presión de formación es de  $435 \text{ kg/cm}^2$  y la hidrostática de  $365 \text{ kg/cm}^2$  una presión estática de  $70 \text{ kg/cm}^2$  será necesaria durante el periodo comprendido por los eventos (1) a (4). Además de que solo lodo de esta densidad entra y sale del pozo.

Entre los eventos (4) y (5) la presión estática necesaria se reducirá gradualmente conforme el lodo nuevo viaje hacia la barrena y cuando este lodo llegue a esta última la tubería de perforación estará muerta.

Durante los eventos (5) y (6) la presión en la tubería de perforación permanecerá en el valor de cero.

Las caídas de presión por fricción en un principio serán igual a la presión reducida de circulación determinada al iniciarse la circulación -- que para este caso será de  $56 \text{ kg/cm}^2$ , permaneciendo en este valor hasta que se empiece a circular lodo nuevo por la tubería de perforación, evento (4). En este momento la presión por fricción empezará a incrementarse poco a poco conforme el lodo nuevo sea desplazado por la tubería de perforación, llegando a su valor máximo justo cuando este lodo alcance la barrena, evento (5).

La presión por fricción total al final del evento (5) será ahora de 67 kg/cm<sup>2</sup> (56 x 1.4/1.2), y permanecerá en este valor hasta el evento (6).

La presión de fondo se incrementará 7 kg/cm<sup>2</sup>, una cantidad igual a la caída de presión en el espacio anular, incluida en la presión reducida de circulación observada.

Este aumento de la presión de fondo se hará presente conforme el pozo sea circulado; pero esta presión caerá en el valor de la presión de fondo estático cerrado cuando la circulación cese.

La presión de bombeo se determina ahora sumando la presión estática y la presión por fricción requerida a un tiempo dado o sea:

$$P_{\text{bombeo}} = P_{\text{estática}} + P_{\text{fricción}}$$

Una vez que la bomba este trabajando al gasto mínimo de circulación la presión de bombeo inicial será de 126 kg/cm<sup>2</sup> (70 de la presión estática más 56 de la presión de fricción), y permanecerá en este valor hasta el evento (4). Entre los eventos (4) y (5) la presión de bombeo decrecerá gradualmente de 126 a 70 kg/cm<sup>2</sup> cuando el evento (5) se alcance.

Generalmente un pequeño ajuste del estrangulador es necesario entre los eventos (4) y (5), pudiendo ser que la velocidad de la bomba tienda a incrementarse conforme la presión de bombeo se reduce.

Durante este periodo el perforador deberá efectuar correcciones al obser-

var que la velocidad de la bomba se incrementa.

Si el perforador descuida esto, se incrementará la presión por fricción, debido al aumento de velocidad de flujo, ocasionando así una disminución en la presión estática.

Debe cuidarse que las variaciones de presión ocasionadas por este fenómeno tanto en el fondo del pozo como en todas las formaciones expuestas no alcancen a permitir la entrada de más fluido al pozo ni la pérdida de fluidos a formaciones débiles.

La relación entre la presión de fondo y la de bombeo se puede apreciar en la figura Iv.1 .

Ahora por lo que se refiere al espacio anular, en un principio la presión quedará en el valor de la presión de cierre inicial de la tubería de revestimiento. Esta presión se incrementará muy lentamente al principio, pero conforme el gas se acerque a la superficie se incrementará con mayor rapidez; finalmente cuando el gas llegue a la superficie, la contrapresión ejercida sobre la tubería de revestimiento estará en un máximo ya que el gas se expandió a su máximo volumen y desplazo el máximo volumen de lodo de el espacio anular.

Durante este periodo el volumen de lodo en las presas también aumentará reflejándose con esto la expansión controlada del volumen de gas que entró al pozo en un principio, conforme este último sea expulsado del pozo.

La suma de la presión del estrangulador, más la presión hidrostática

De la columna de lodo arriba del gas más la presión hidrostática de la columna de lodo abajo del gas más la caída de presión por fricción en el espacio anular deberá ser igual a la presión de fondo: y esta deberá ser --- aproximadamente igual a la presión estática de fondo cerrado inicial más las caídas de presión en el espacio anular. Lo anterior se puede apreciar en la figura IV.2

Durante el período del evento (2) a (3) el gas es arrojado de el espacio anular y conforme este es sacado es reemplazado por lodo que como se sabe posee una densidad mucho mayor, incrementándose de esta manera la presión hidrostática, requiriéndose menos presión en el espacio anular, por lo que ésta irá disminuyendo.

Al mismo tiempo el volumen de lodo en las presas disminuirá también conforme el lodo sea succionado de las mencionadas presas para sustituir al gas que está siendo arrojado del espacio anular. Cuando todo el gas haya sido arrojado la presión en el espacio anular tendrá un valor muy cercano a la presión de cierre inicial de la tubería de perforación, ya que ahora el espacio anular estará lleno de lodo de densidad original. El volumen de lodo en las presas también estará muy cercana al nivel que tuvo antes de la entrada de fluido al pozo, siempre y cuando no haya sucedido algún cambio -- apreciable en la presión de fondo.

Cualquier presión incluyendo las presiones en la tubería de perforación -- (estática), de bombeo de fricción, de fondo y en el cabezal de la tubería de revestimiento permanecieran constantes conforme el lodo de densidad original esté siendo circulado a un ritmo de bombeo constante y hasta que el lodo nuevo este listo para circularse por la tubería de perforación (evento 4).

Como se mencionó la presión estática en la tubería de perforación disminuirá conforme el lodo nuevo vaya llenando la tubería de perforación, disminuyendo también la presión de bombeo y cuando este lodo llegue a la barrena la presión en la tubería de perforación (estática) será cero y continuará siéndolo, lo que equivale a decir que la tubería de perforación está muerta.

Las presiones de fondo en el espacio anular permanecieran constantes, no obstante que solo lodo original está siendo circulado en el espacio anular en estos momentos.

Del evento (5) al (6) cuando se desplaza el lodo nuevo por el espacio anular la presión en éste disminuirá lentamente hasta que el lodo nuevo haya alcanzado la superficie, en este instante el espacio anular estará muerto. Ahora que el comportamiento de presiones ha sido examinado queda clara la forma en que debe ejercerse el control.

El bombeo puede ser iniciado y ajustado a una cierta velocidad, conservando la presión en el espacio anular constante hasta que se alcance la velocidad de bombeo adecuada.

A partir de este momento debe tomarse como parámetro de control la presión en la tubería de perforación misma que deberá mantenerse constante entre los eventos (2) a (4).

Este cambio en el control debe ser hecho antes de que la burbuja de gas se expanda apreciablemente.

Una vez que el lodo nuevo esté listo nuevamente el parámetro de control será la presión en el espacio anular y ésta se mantendrá en un valor igual a la presión de cierre de la tubería de perforación, hasta el momento en que ésta tubería esté llena de lodo nuevo (evento 4 a 5).

Una vez sucedido lo anterior el control deberá regresarse a la tubería de perforación, mientras el espacio anular esté siendo desplazado con el lodo nuevo (evento 5 a 6). La presión de bombeo ahora será igual a la presión reducida de circulación corregida por el incremento al peso del lodo.

Nota: mientras la presión en la tubería de perforación disminuye entre los eventos 4 y 5 se notará que a través del estrangulador la densidad del lodo no cambiará es decir tendremos pasando lodo original y el gasto será constante, manteniéndose por lo tanto constante la presión en el mencionado estrangulador.

La ecuación para la caída de presión por fricción a través de un estrangulador es la siguiente:

$$P = k \times \gamma \times \left( \frac{Q^2}{A^2} \right)$$

donde: P es la caída de presión, Q es el gasto, k es una constante que depende de las unidades usadas,  $\gamma$  es la densidad del lodo y A es el área de sección transversal del estrangulador.

Como P,  $\gamma$  y Q permanecerán constantes, el área de sección transversal también quedará constante y ningún ó un muy pequeño ajuste en el estrangulador será necesario durante este intervalo y el control podrá cambiarse al espacio anular en esta fase del método del perforador mientras se llena la tubería de perforación con lodo nuevo.

#### IV.2 Método del Ingeniero.

En el método del Ingeniero ó de un ciclo de circulación las operaciones son un poco retrasadas, ya que después de cerrado el pozo hasta que no se ha -- preparado un volumen suficiente de lodo nuevo no se circula el fluido invasor para sacarlo del pozo.

En este método se combinan los dos ciclos de circulación del método del perforador en uno solo, es decir al mismo tiempo que se circula el lodo preparado para matar el pozo ó lodo nuevo por la tubería de perforación el fluido invasor se circula hacia afuera del pozo.

El comportamiento de las presiones en la tubería de perforación, estática, de fricción y de bombeo se muestran en la figura IV.3 pero ahora los eventos se describen para el método del ingeniero de la siguiente manera:

- (1) Se cierra el pozo.
- (2) Se inicia el bombeo del lodo nuevo por la tubería de perforación.
- (3) El lodo nuevo alcanza la barrena.
- (4) El gas llega a la superficie.
- (5) El gas termina de salir del pozo.
- (6) El lodo nuevo alcanza la superficie y el pozo deberá estar muerto.

El comportamiento de la presión en el espacio anular se describe en los párrafos siguientes bajo estas premisas: El volumen en la tubería de perforación es 4 ó 5 veces mayor que el volumen en el espacio anular, el volumen de fluido son (supongase gas) es relativamente pequeño, no hay tubos lastra barrenas ni existen cambios en el área de sección transversal del espacio anular y el fluido invasor está aún en el fondo del pozo. Bajo estas premisas la gráfica de presión en el espacio anular será horizontal, mientras la

tubería de perforación está siendo llenada con el lodo nuevo durante el período comprendido por los eventos (1) a (3).

Estas limitaciones o premisas se analizarán una por una y se discutirán en los párrafos siguientes.

Por lo que se refiere a la presión de fondo cerrado permanecerá constante - en el valor inicial de cierre más las caídas de presión por fricción en el espacio anular.

El comportamiento de las presiones en el espacio anular contra el tiempo se ilustra en la figura IV.4, así como también con la presión de fondo, el volumen de lodo en las presas y la presión de bombeo en la tubería de perforación.

Una vez que el lodo para matar el pozo a alcanzado la barrena (evento 3) la presión hidrostática en el espacio anular se incrementará conforme este lodo continúe subiendo por el espacio aludido.

Como consecuencia la presión observada en el estrangulador declinará hasta que el efecto de la expansión del gas sea sentido, conforme el gas se acerque a la superficie. La declinación en la presión cesará y la presión en el espacio anular puede incrementarse hasta un máximo, que ocurrirá cuando el gas haya alcanzado la superficie.

Esto ocurrirá cuando se tenga el máximo volumen de lodo en las presas. La máxima presión de superficie registrada será menor que cuando se emplea el método del perforador.

Durante los eventos (4) y (5) el gas será expulsado del pozo, con la presión de superficie ahora declinado rápidamente. En el evento (5) la presión en el espacio anular será igual a la presión de cierre inicial de la tubería de perforación multiplicada por la capacidad de esta tubería y dividida

entre la capacidad del espacio anular (si el lodo nuevo fue bombeado rápidamente y la burbuja de gas no ha ascendido por el espacio anular).

Para el ejemplo que se ha venido considerando la presión estaría entre los 14 y 17 Kg/cm<sup>2</sup>.

Durante los eventos (5) y (6) el volumen de lodo originalmente contenido en la tubería de perforación es expulsado del espacio anular y la presión en éste caerá a cero quedando el pozo así finalmente muerto.

Bajo las premisas establecidas ó sea no se tienen tubos lastrabarrena, flujo invasor en el fondo del pozo, etc., deberá de emplearse algún método de control para mantener la presión en el espacio anular en un valor igual a la presión de cierre de la tubería de revestimiento, usando ahora como parámetro de control la presión en la tubería de perforación y el pozo matado mediante la conservación de la presión en esta última tubería en un valor constante.

Por otra parte sin ninguna de las premisas anteriormente mencionadas se aplican la presión en la tubería de perforación puede hacerse bajar lentamente y la presión en el espacio anular puede ser observada pero no usada para controlar.

Muchas personas consideran que el método del Ingeniero puede usarse como control en cualquier caso, conservando la presión en el espacio anular constante cuando se está llenando la tubería de perforación con lodo nuevo. Esto puede causar que se aplique demasiada presión a las formaciones expuestas.

Muchos pozos se han perdido por no haber tomado en cuenta las restricciones de este método, generalmente ocurren pérdidas de circulación sin que se sepa porque, en casos más críticos puede ser que se presente un descontrol

subterráneo ó superficial.

Como el método del ingeniero es el procedimiento comunmente recomendado y - mantener la presión en el espacio anular constante es una práctica común se le dará especial atención a las limitaciones de este método y a como ir disminuyendo la presión en la tubería de perforación durante este mismo.

A continuación se expone una secuencia de cálculos para programar el proceso de disminución de presión en la tubería de perforación.

1. Presión inicial de bombeo  $P_i = P_{rc} + P_{ctp}$

2. Presión final de bombeo  $P_f = P_{rc} + \frac{\gamma_c}{\gamma}$

3. Determinar el número de emboladas para desplazar el lodo nuevo hasta la barrena.

4. Dividir el número de emboladas entre algún número conveniente N (por -- conveniencia usar N = 10)

5. Determinar la reducción de presión necesaria para cada incremento de emboladas.

$$p = \frac{P_i - P_f}{N}$$

6. Construir una tabla para dar al operador del estrangulador.

<u>Nº ACUMULATIVO DE EMBOLADAS</u>	<u>PRESION DE BOMBEO EN LA TUB. DE PERF.</u>
0	126
180	120
360	114
540	108
720	102
900	96
1080	90
1260	84
1440	78

<u>Nº ACUMULATIVO DE EMBOLADAS</u>	<u>PRESION DE BOMBEO EN LA TUB. DE PERF.</u>
1620	72
1800	66

Después de efectuado el cálculo anterior una gráfica de los valores de emboladas contra presión puede usarse.

#### IV.3 Limitaciones del control de la presión

Lo anteriormente analizado toma en consideración el concepto del tubo en U y se considera que solo tiene una entrada y una salida, en el momento en que ésta condición se pierde en sitios como el fondo del pozo ó la zapata de la última tubería de revestimiento el sistema deja de ser un tubo en U por haberse abierto nuevas vías de flujo.

La mayoría de las fallas de control de un pozo son debidas a una sobre --- aplicación de presión y no a una falta de ella y ocurren a consecuencia de que el operador no toma en cuenta las condiciones reales del pozo.

Es decir el operador en su afán de estar seguro de que ya no está entrando más gas de la formación al pozo, aplica demasiada presión a las formaciones expuestas y fractura en alguna de estas creando problemas aún mayores. En este capítulo todos los análisis y suposiciones fueron hechas basadas --- en sistemas totalmente en equilibrio (condición de tubo en U), si este --- equilibrio se pierde deberán analizarse y discutirse por separado cada uno de los factores que intervienen en la pérdida de equilibrio del sistema.

SIMBOLOGIA

- (1) Se cierra el Pozo
- (2) Se arranca la bomba y se empieza a bombear
- (3) Se lleva el gas hasta la superficie y se saca
- (4) Se inicia la circulación del lodo nuevo
- (5) El lodo nuevo alcanza la barrena
- (6) El lodo nuevo regresa a la superficie

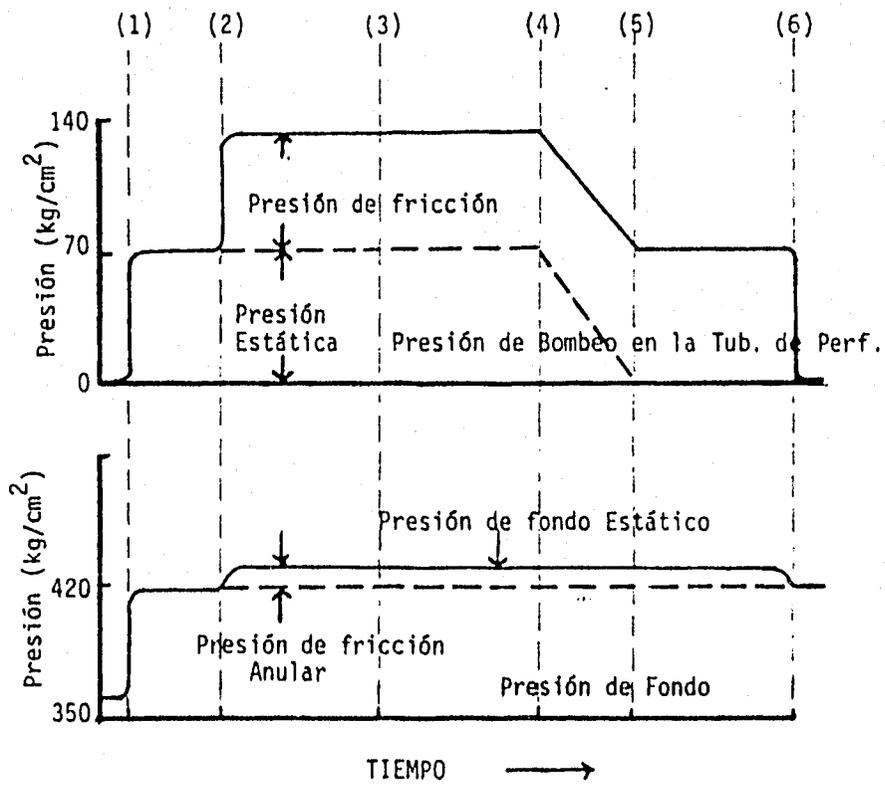


FIG. IV.1 Método del Perforador - Presión de bombeo en la Tub. de Perforación.

SIMBOLOGIA DE LA FIG. IV.2

- (1) Se cierra el pozo
- (2) Se arranca la bomba y se empieza a bombear
- (3) Se lleva el gas hasta la superficie y se saca
- (4) Se inicia la circulación del lodo nuevo
- (5) El lodo nuevo alcanza la barrena
- (6) El lodo nuevo regresa a la superficie y el pozo muerto

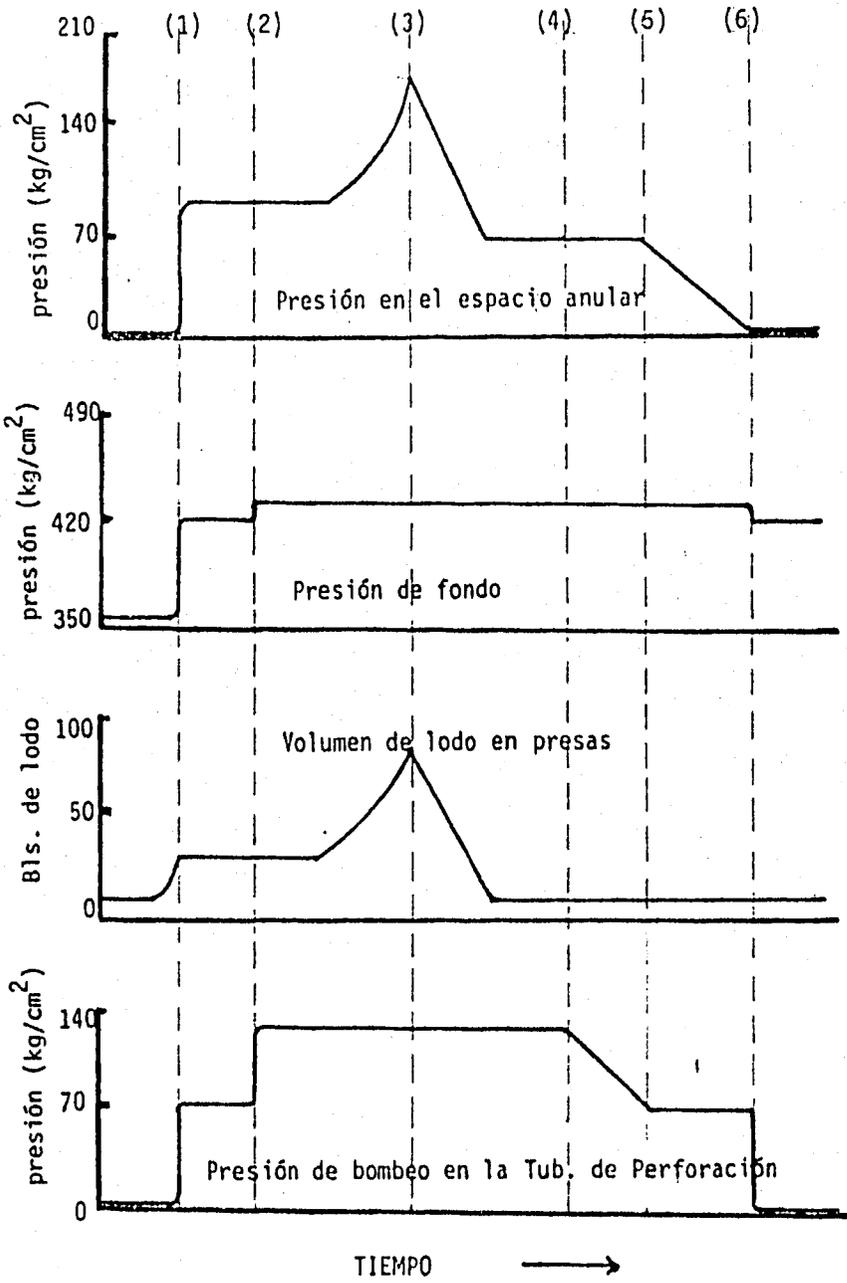


Fig. IV.2 Método del Perforador

- SIMBOLOGIA :
- (1) Se cierra el pozo
  - (2) Se inicia el bombeo del lodo nuevo por la tub. de perforación.
  - (3) El lodo nuevo alcanza la barrena.
  - (4) El gas llega a la superficie
  - (5) El gas termina de salir del pozo
  - (6) El lodo nuevo alcanza la superficie y el pozo muerto

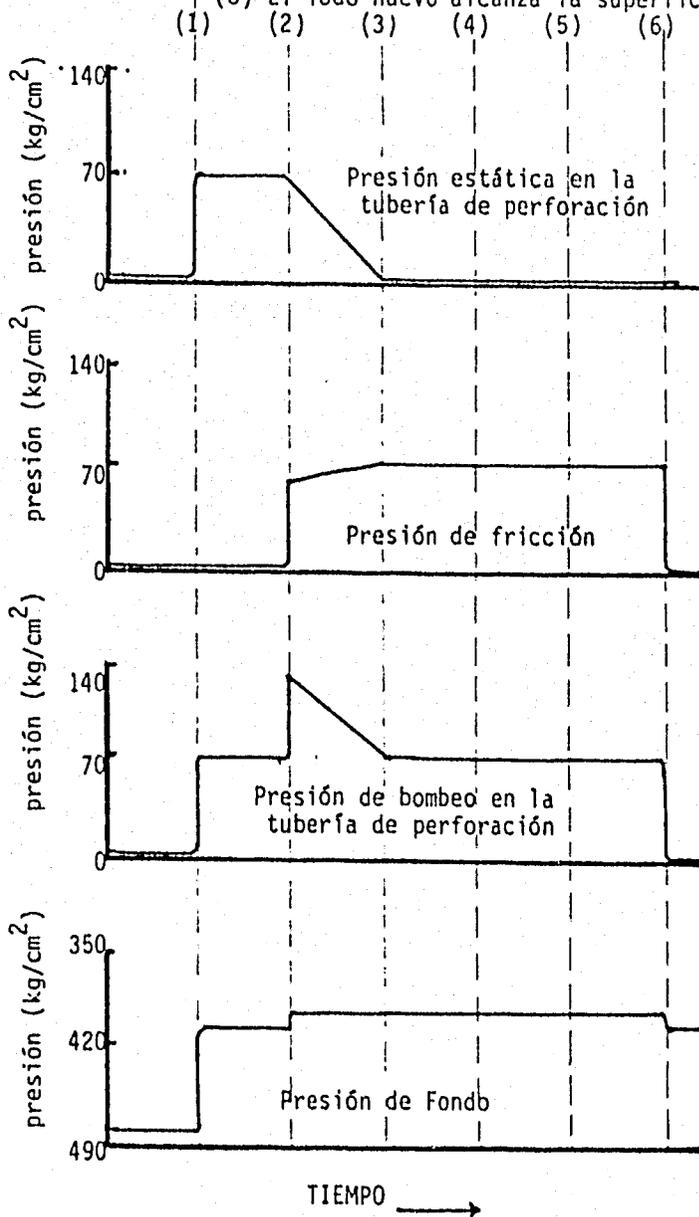


Fig. IV.3 Método del Ingeniero - Presión en la tubería de Perforación

SIMBOLOGIA

- (1) Se cierra el pozo
- (2) Se inicia el bombeo del lodo nuevo por la Tub. de perforación
- (3) El lodo nuevo alcanza la barrena
- (4) El gas llega a la superficie
- (5) El gas termina de salir del pozo
- (6) El lodo nuevo alcanza la superficie y el pozo esta muerto.

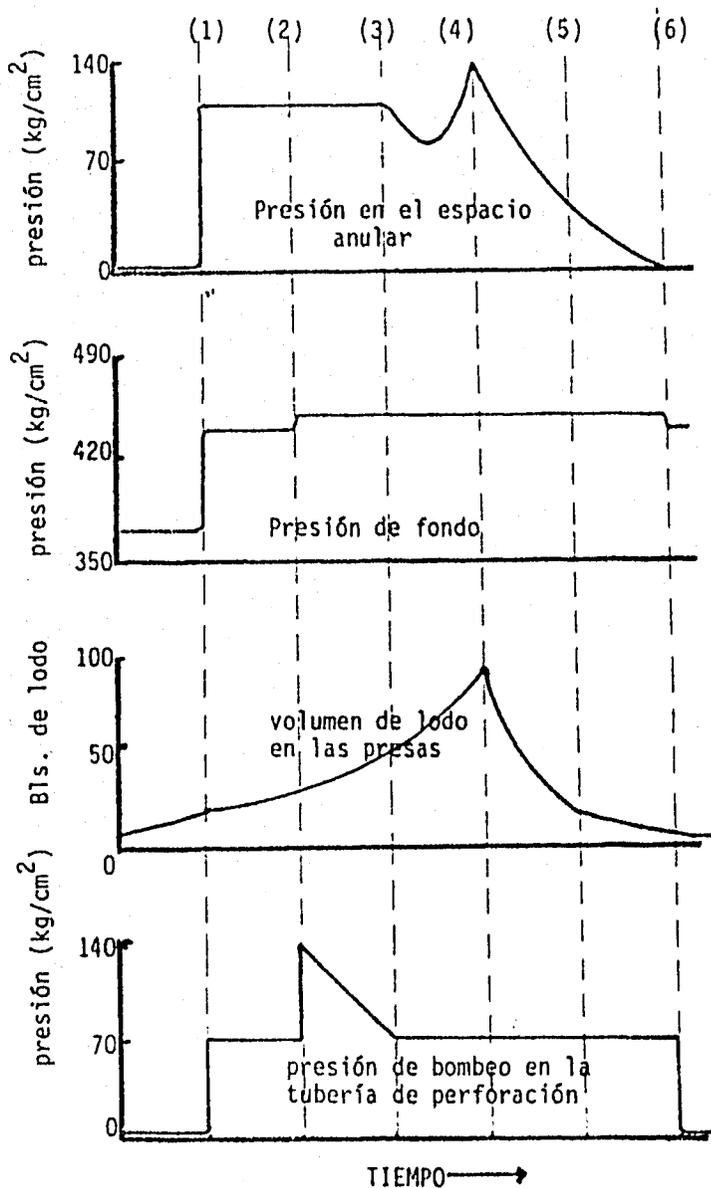


Fig. IV.4 Método del Ingeniero - Presiones en el espacio anular, en la Tub. de perforación, de fondo y volumen de lodo en las presas.

## CAPITULO V

### OPERACION DEL EQUIPO

En las operaciones de control de un pozo es necesario conocer todas y cada una de las características en que se encuentra el equipo, así como el estado mecánico del pozo.

Desafortunadamente la mayoría de la gente le da poca o ninguna importancia a las condiciones reales en que se encuentra el pozo al suceder un brote cuando se está perforando.

En los párrafos siguientes se comentaran y discutirán algunas de las condiciones y consideraciones que son necesarias para llevar a cabo una exitosa operación de control de un brote.

La operación de la bomba en un equipo de perforación es lo que más se debe cuidar en lo que se refiere a su operación, es decir se debe tener cuidado especial en ver que la bomba este trabajando a la velocidad adecuada y proporcionando la presión necesaria para circular el fluido de perforación, siendo por esto que los instructores en control de pozos recomienda llegar a la velocidad optima de bombeo lentamente y que poco a poco se alcance le número de emboladas previsto.

En la realidad mucha gente acostumbra mantener el espacio anular cerrado hasta que es notado un incremento de presión en la superficie, descargando hasta entonces la presión en el espacio anular a través del estrangulador seleccionado.

Otros acostumbran arrancar la bomba llevarla a la velocidad prevista permitiendo que la presión inicial de cierre en la tubería de revestimiento se incremente aproximadamente unos  $10 \text{ kg/cm}^2$  antes de abrir la descarga. Con este método debe tenerse cuidado de no fracturar en la zapata de la última tubería de revestimiento cementada.

Otros opinan que al tenerse un brote de gas la compresibilidad de este permitira a la bomba trabajar lo suficiente una vez arrancada, antes de que se incremente la presión en el sistema apreciablemente.

Un pozo en que se ha controlado la presión del fluido invasor en un sistema cerrado y cualquier cantidad aún pequeña de fluido que se inyecte por la tubería de perforación incrementará la presión en todo el sistema pudiendo fracturar alguna formación débil.

El bombear rápidamente puede ocasionar que la densidad equivalente del todo se incremente pudiendo dar lugar a inducir una fractura en alguna de las formaciones expuestas, siendo entonces inevitables las pérdidas de circulación.

Una sugerencia para evitar lo anterior es abrir el estrangulador y arrancar la bomba llevandola a la velocidad prevista muy lentamente; después ir cerrando el estrangulador hasta alcanzar la presión prevista para controlar el brote.

Siempre debe tenerse extremo cuidado al empezar a bombear en un sistema cerrado sin importar el método que se este empleando.

### V.1 Colapso de la burbuja de gas

Al colapso de la burbuja de gas normalmente no se le da la debida importancia al controlar el brote de un pozo. Como esto puede no tener consecuencias, puede ser que ocasione un problema mayor.

El colapso de la burbuja de gas se manifiesta en su longitud al pasar de un area de sección transversal a otra distinta y no en su cambio de volumen.

Este colapso puede ser de poca importancia si la presión en la tubería de perforación es disminuida, en cambio puede tener un efecto drástico si se mantiene constante la presión en el espacio anular mientras se llena la tubería con lodo nuevo cuando se emplea el método del ingeniero.

Como un caso ejemplo tenemos el colapso de la burbuja de gas que sufre cuando se perfora bajo una tubería corta o cuando una sarta de perforación con muchos estabilizadores se esta empleando. En estos casos sucede que se presentan presiones mayores a las esperadas en el espacio anular, indiferentemente del método empleado para controlar la presión de fondo.

Para visualizar el concepto con mayor claridad considerese el siguiente ejemplo:

Se tiene un pozo bajo las condiciones expuestas a continuación:

Longitud de la tubería de perforación = 2700 m.

Longitud de los tubos lastrabarrena = 300 m.

Boca de la tubería corta = 2700 m.

Presión de cierre inicial en la tubería de perforación =  $70 \text{ kg/cm}^2$ .

Presión de cierre inicial en la tubería de revestimiento =  $103 \text{ kg/cm}^2$

Densidad del lodo =  $1.2 \text{ gr/cm}^3$

Profundidad de la zapata de la tubería corta = 2895 m

Capacidad anular entre los tubos lastrabarrena y la tubería corta =  $0.01 \text{ m}^3/\text{m}$ .

Capacidad entre la tubería de perforación y la tubería de revestimiento =  $0.05 \text{ m}^3/\text{m}$ .

Incremento de volumen de lodo en las presas =  $3.2 \text{ m}^3$

Densidad del gas =  $0.12 \text{ gr/cm}^3$

Presión de fondo =  $435 \text{ kg/cm}^2$

Para analizar el ejemplo propuesto se tomará en cuenta que el método del ingeniero que es el más recomendado puede emplearse en dos formas que son : La primera consiste en controlar con base en la presión en la tubería de perforación usando la tabla de presiones que se explicó en el capítulo anterior mientras se desplaza el lodo nuevo a través de la mencionada tubería , manteniendo la presión en esta constante, en el valor de la presión final de circulación.

Una segunda forma sería controlar la presión en el espacio anular usando la presión inicial de cierre en la tubería de revestimiento como una guía mientras por la tubería de perforación se desplaza lodo nuevo, usando como parámetro de control la presión en la tubería de perforación cuando dicho lodo alcance la barrena.

Esta última forma es más sencilla y puede emplearse sin arriesgar -

el pozo sin embargo el uso de este método como frecuentemente no es bien entendido a dado lugar a que en el pasado se hayan ocasionado perdidas de circulación y en ocasiones la pérdida del pozo.

Para proseguir se analizará el ejemplo comparando las dos formas, es decir el control en la tubería de perforación y el control de la presión en el espacio anular, durante el período en que la burbuja de gas es llevada hasta la boca de la tubería corta mientras solo se bombea lodo original por la tubería de perforación.

Método usando como parámetro de control la presión en la tubería de perforación.

Considerese que se han bombeado  $3.2 \text{ m}^3$  de lodo para desplazar la burbuja de gas hasta que la parte inferior de esta se encuentra en la boca de la tubería corta (parte superior de la tubería corta), bajo las condiciones del ejemplo propuesto se tendrá que la presión estática en la tubería de perforación aún continuará en el valor de la presión inicial de cierre y ningún cambio se habrá sucedido en la presión de bombeo.

En el espacio anular la presión hidrostática se habrá incrementado de  $327.5$  a  $353 \text{ kg/cm}^2$ , siendo que solo son necesarios  $77 \text{ kg/cm}^2$  en el cabezal de la tubería de revestimiento para balancear el sistema, es decir se tendrá un incremento de  $25.5 \text{ kg/cm}^2$  debido a que la burbuja de gas ha sido colapsada al pasar de una sección transversal menor a una mayor o sea su altura original que era de  $320 \text{ m}$  se redujo a solo  $64 \text{ m}$  al localizarse -

esta entre la tubería de revestimiento y la de perforación situadas arriba de los tubos lastrabarrena en este caso. Por lo que se refiere a la presión de fondo se mantuvo en el valor de  $435 \text{ kg/cm}^2$  más las caídas de presión en el espacio anular debidas a la fricción. Mientras se esta bombeando se considera que las caídas de presión por fricción son bajas comparadas con las presiones estáticas ya que la sección anular es amplia.

Para proseguir se compara este método con el usado controlando con base en la presión en el espacio anular.

Método usando como parámetro de control la presión en el espacio anular.

Mucha gente piensa que al controlar por presión en el espacio anular cuando se desplaza un cierto volumen de lodo en la tubería de perforación no afecta la presión de fondo.

Para el caso que se ha propuesto como ejemplo la presión en el espacio anular ha sido mantenida constante mientras se ha desplazado la burbuja de gas hasta que su parte inferior quedó en la boca de la tubería corta.

Después de desplazada la burbuja de gas a la boca de la tubería corta el incremento de  $25.5 \text{ kg/cm}^2$  en la presión hidrostática en el espacio anular también se hará manifiesta en la presión de fondo y por lo tanto también en la presión estática en la tubería de perforación y en la presión de bombeo, incrementándose estas presiones la misma cantidad o sea

la presión de fondo ahora tendrá un valor de  $460.5 \text{ kg/cm}^2$  más la -  
caída de presión por fricción en el espacio anular y la presión en  
la superficie será ahora de  $95,5 \text{ kg/cm}^2$ .

En realidad se puede controlar la presión en un solo lado, ya sea en  
la tubería de perforación o en el espacio anular y en el otro lado la  
presión tenderá a equilibrarse debido al balance natural de la presión  
en el sistema.

El incremento en la presión en la tubería de perforación es real y su-  
cederá si se mantiene la presión en el espacio anular constante ya sea  
que lodo nuevo o lodo original sea circulado.

Por lo que se refiere a la burbuja de gas desplazada se tendrá que en  
cualquier punto abajo de la mencionada burbuja la presión se habrá in-  
crementado y por lo consiguiente se pueden crear problemas.

Para el ejemplo que se está analizando como la zapata de la tubería cor  
ta se encuentra a 2895m y la presión original al cierre en dicha za -  
pata fue de  $434 \text{ kg/cm}^2$  que corresponde a una densidad equivalente del lo  
do de  $1.5 \text{ gr/cm}^3$  se tendrá que reducir tanto la presión en la zapata co  
mo la densidad equivalente tan pronto la parte inferior de la burbuja  
de gas haya alcanzado la boca de la tubería corta es decir la haya pa-  
sado y si se mantuvo la presión en la tubería de perforación constante.

Si se mantuviera constante la presión en el espacio anular la presión en  
la zapata se incrementaría a  $443 \text{ kg/cm}^2$  y la densidad equivalente del lo  
do se tendrá que incrementar a  $1.53 \text{ gr/cm}^3$  al desplazar la burbuja de

gas. Conforme este incremento puede ser de poca importancia, podría resultar peligroso y se fracturaría alguna de las formaciones expuestas, propiciándose pérdidas de circulación que demorarían los trabajos y hasta podrían ocasionar la pérdida del pozo.

Es recomendable calcular el efecto del colapso de la burbuja para pronosticar se es de importancia o no, si se piensa mantener constante la presión en el espacio anular.

Por lo general no es importante si se trata de un pozo muy profundo y la longitud de los tubos lastrabarrena es muy pequeña. Será aún de menor importancia si la capacidad anular abajo de la tubería corta es equivalente a dos veces o más el volumen de la capacidad de toda la tubería de perforación. Si el incremento en la presión hidrostática es de peligro, se pueden bombear unos cuantos barriles de lodo y cerrar el pozo para -- permitir que la presión se estabilice, lo que hará que la presión en el espacio anular tome un valor menor que el que tuvo originalmente.

Repitiendo este procedimiento de bombear unos cuantos barriles de lodo, deteniendolos y permitiendo que la presión se estabilice se logrará -- que la presión en el espacio anular continúe disminuyendo hasta alcanzar un valor de equilibrio el cuál puede ser usado como referencia al desplazar el lodo nuevo por la tubería de perforación.

## V.2 La fricción en el espacio anular

El fenómeno de la fricción en el espacio anular si es bien entendido

puede ser utilizado ventajosamente sin embargo si su mecanismo no se interpreta bien puede llevarnos a grandes fracasos.

Al calcular las caídas de presión por fricción el no tomar en cuenta las caídas de presión en la sarta de perforación o en la barrena ocasionara que se tenga una presión de circulación inadecuada.

Un pequeño error en cualquiera de los cálculos o una pequeña discrepancia en el gasto usado en dichos cálculos y el verdadero puede resultar en algo irreparable y llevarnos a una conclusión totalmente errónea de la caída de presión por fricción en el espacio anular.

Los rangos típicos para las caídas de presión por fricción en el espacio anular son de 4 a 14 kg/cm<sup>2</sup> y representan solo el 5% aproximadamente de la presión total de circulación.

En circunstancias tales como cuando se usa una barrena común o de diamantes para perforar, cuando se emplean lodos viscosos y pesados o cuando se perfora bajo una tubería corta con un pequeño diámetro deberá efectuarse un cálculo exacto de la caída de presión por fricción en el espacio anular. En general se debe tomar en cuenta la caída de presión en el espacio anular pues esto aunado al colapso de la burbuja de gas puede llevarnos a resultados desastrosos.

### V.3 Presión en el múltiple de estrangulación

Después de que el fluido que entró al pozo a sido sacado del mismo y el lodo para matar completamente circulado, menos y menos presión se requere-

rira en el estrangulador. Siempre existe una cierta caída de presión por fricción en las líneas de estrangulación aunque se tenga el estrangulador completamente abierto.

La mínima presión que puede ser impuesta está limitada por la caída de presión por fricción en la línea de estrangulación. Una vez que este valor es alcanzado la presión en el espacio anular no podrá caer a algún valor posterior, y la presión en la tubería de perforación y la presión de fondo empezarán a incrementarse hasta que finalice el procedimiento de matar el pozo, sufriendo un incremento igual a la caída de presión por fricción en la línea de estrangulación, si esto ocurre la presión en el múltiple puede ser reducida usando una o más líneas de estrangulación en paralelo. Bajo estas condiciones las presiones observadas serán por efecto dinámico solamente esto es que si se suspende el bombeo caerán a el valor de cero.

Por lo dicho anteriormente se puede apreciar que la caída de presión en la línea de estrangulación afecta las presiones de fondo y en la tubería de perforación, sin embargo como este concepto generalmente es mal entendido y se hace de mayor importancia en los equipos marinos conforme el tirante de agua sea mayor, se analizará en detalle.

La caída de presión en la línea de estrangulación es sentida kg a kg en todo el sistema de circulación o sea desde la línea de descarga delodo hasta la bomba.

Normalmente una medición de la presión reducida de circulación es hecha circulando a través de la línea de estrangulación, al hincar una tube-

ría de revestimiento o efectuar algún cambio en las propiedades del lodo como cambiar su densidad o cambiar de un lodo base agua a uno de base a ceite.

Una medición exacta y confiable de la presión reducida de circulación puede ser hecha como frecuentemente se hace, abriendo la línea de estrangulación y bombeando a través de esta el lodo, el cuál circulara por la mencionada línea y despues hacia el fondo del pozo por el espacio anular, subiendo postiriormente por la tuberfa de perforación, como sise tratara de una circulación inversa.

Al efectuarse esta medición se podrá dar cuenta uno de la caída de presión que se tiene en la línea de estrangulación, pudiendose usar dicha medición de la caída de presión como referencia para los cálculos usados en el control de un pozo. Un volumen suficiente de lodo debe ser bombeado para estar seguros que la entrada de la línea ha sido desplazada con lodo nuevo antes de registrar datos de presión y gastos, tambien es importante que la presión hidrostática en la línea de estrangulación y en el tubo conductor de lodo esten balanceadas antes de efectuar la prueba. Por otra parte si las compuertas en el preventor son cerradas y el lodo se circula por la tuberfa de perforación regresa a la superficie por la línea de estrangulación, cualquier caída de presión en esta línea se hara presente en todos y cada uno doe los puntos del sitema de circulación incluyedo las formaciones expuestas, y si en el multiple una valvula a sido cerrada accidentalmente las formaciones a bajo de la zapata de la úl-

tima tubería de revestimiento cementada pueden ser fracturadas antes de que sea notado algún incremento de presión en la superficie.

Tomando en cuenta las razones anteriormente expuestas se ve que es necesario que el personal de operaciones marinas tenga una idea clara de como actúa la caída de presión por fricción en la línea de estrangulación y sus efectos.

La figura V.1 nos muestra la presión de fondo cuando se circula a través de un tubo conductor abierto es decir circulación normal y cuando se circula a través de la línea de estrangulación.

Si se usara el método del ingeniero manteniendo la presión en el espacio anular constante mientras se circula lodo nuevo por la tubería de perforación, se tendrá que la presión por fricción en la entrada de la línea de estrangulación es sumada a la presión de fondo y a la presión de bombeo por lo consiguiente la presión en el fondo del pozo ahora será la suma de la presión estática de cierre más la caída de presión por fricción en el espacio anular, más la caída de presión por fricción en la línea de estrangulación. La presión de bombeo será igual a la presión de cierre en la tubería de perforación más la presión reducida de circulación con el tubo conductor abierto más la caída de presión en la línea de estrangulación.

Este aumento en la presión de fondo y en la tubería de perforación es de una importancia secundaria comparado con el que ocurre en la zapata de la última tubería cementada

## CAPITULO VI

### CONTROL DE BROTES

En este último capítulo se tratará de concluir sobre el tema del control de un brote así como su relación con la presión de formación.

Por otra parte no obstante que la mayoría de los brotes ocurren al estar sacando la tubería para algún cambio de barrena, el control de dicho brote sería más fácil si al ocurrir este, la sarta de perforación pudiera regresar al fondo del pozo.

Si por alguna razón se intentará controlar un brote cuando la barrena estuviera a la profundidad de 1830 m. y en ese momento se hubiera en el pozo un lodo de densidad de  $1.2 \text{ gr/cm}^3$  y la presión de formación a la profundidad total del pozo que se tiene en el momento del brote fuera de  $435 \text{ kg/cm}^2$ , un lodo de una densidad de  $1.58 \text{ gr/cm}^3$  a la profundidad mencionada de 3050 m sería necesario en lugar de uno de  $1.44 \text{ gr/cm}^3$  y el valor de la presión leída en la superficie significaría muy poco, debido a que el tipo de fluido que entró al pozo y su grado de expansión se desconocen.

Antes de regresar la tubería de perforación al fondo del pozo se debe instalar una válvula de contrapresión en la tubería de perforación para evitar que el lodo brote por ella, procediéndose después a cerrar el espacio anular y evitándose así que el lodo salga del pozo.

Mientras se realiza el viaje de introducción de tubería debe abrirse la línea de descarga de lodo del espacio anular dejando que salga una can

tividad de lodo igual a la capacidad de la tubería de perforación más el desplazamiento de la misma, conforme dicha tubería sea introducida dentro del pozo.

Este volumen de lodo deberá medirse con exactitud e incluir el posible volumen de lodo que pueda perderse a través de los preventores.

Por lo que se refiere a la presión en la superficie esta se incrementará si la tubería de perforación es introducida dentro de una burbuja de gas, haciéndose esta última de una longitud mayor.

La disminución de la presión hidrostática debido a la elongación de la burbuja de gas será compensada por los incrementos de presión que se aprecian en la superficie.

Si se manifiesta el ascenso de gas mientras se introduce la tubería de perforación en el pozo lo cual se puede apreciar al observar que se tienen incrementos de presión mayores a los esperados, deberá dejarse que salga del pozo un volumen adicional de lodo para tener una expansión controlada de la burbuja de gas si es que no se desea fracturar en la zapata de la última tubería cementada.

Sin embargo el ascenso de la burbuja de gas normalmente es más lento que la introducción de la tubería dentro del pozo.

Generalmente es peligroso detenerse en parte del camino cuando se regresa al fondo del pozo, ya que la tubería puede pegarse por presión diferencial. Si ya la formación se fracturo en la zapata no es conveniente descargar lodo del espacio anular.

Por otra parte si el brote ocurriese cuando la tubería de perforación - estuviese afuera o casi afuera del pozo, pudiera ser que la presión ejercida en el area de sección transversal de la tubería de perforación fuera tal que no permitiera bajarla.

Si esto sucede deberá cargarse el peso suficiente a la tubería e iniciar a bajarla.

#### VI.1 Tolerancia al brote

Una total comprensión de la presión de fondo de un pozo no estaría completa sin el análisis del calculo de la tolerancia de un brote y como es empleada.

La tolerancia es el aumento de presión que puede soportar la formación al ocurrir el brote y se refiere a formaciones débiles .

Esta tolerancia puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{h}{H} (\gamma_{ez} - \gamma_2)$$

Donde: T es la tolerancia expresada en  $\text{gr/cm}^3$

h es la profundidad vertical en metros de la última zapata

H es la profundidad considerada en metros

$\gamma_{ez}$  es la máxima densidad equivalente del lodo que la zapata puede soportar antes de que ocurra una perdida de circulación y se da en  $\text{gr/cm}^3$

$\gamma_2$  es la densidad del lodo que se tiene al ocurrir el brote en  $\text{gr/cm}^3$

Por otra parte el gradiente de presión de formación a que puede perforarse con el lodo en uso se determina de la suma de T y la densidad de

dicho lodo. La máxima densidad equivalente del lodo que la zapata -- puede soportar se determina con la fórmula siguiente:

$$\gamma_{ez} = 1 + 10 \frac{P_{10}}{h}$$

Donde  $P_{10}$  es la presión residual de inyección o presión de leak off obtenida al efectuarse la prueba de presión máxima para concluir acerca de la profundidad correcta donde debe cementarse una tubería de revestimiento,  $h$  es la profundidad vertical de la zapata,  $\gamma_1$  es la densidad del lodo que se usó al realizarse la prueba de presión máxima.

La máxima presión de formación  $P_f$  que puede ser alcanzada al cerrar el pozo se determina con la siguiente fórmula:

$$P_f = \frac{(T + \gamma_2) H}{10}$$

La máxima presión de superficie  $P_s$  será igual a :

$$P_s = \frac{T \times H}{10}$$

Esto no significa que si se encuentra una presión de formación igual a la determinada con la fórmula anterior, el pozo pueda cerrarse con mucha seguridad, sino que es conveniente analizar minuciosamente la situación.

A continuación se puntualiza en como varía la tolerancia .

Para una densidad del lodo dada, la tolerancia se reduce conforme el intervalo de agujero descubierto debajo de la zapata se hace mayor.

Para una profundidad considerada el valor de la tolerancia aumenta conforme la densidad del lodo es menor.

Sin embargo el valor absoluto de  $(T + \gamma_2)$  y por lo tanto el de la presión de formación aumentará conforme  $\gamma_2$  se incremente.

Lo anterior se puede apreciar en los ejemplos siguientes:

Dados  $h = 1460$  m.  $\gamma_{ez} = 1.74$  gr/cm<sup>3</sup>, se tiene que :

Profundidad (H)	Tolerancia (T) en gr/cm <sup>3</sup>		
	$\gamma_2 = 1.08$	1.32	1.56
1830 m	0.53	0.34	0.14
2440 m	0.39	0.25	0.11
3050 m	0.32	0.20	0.09

Para la presión de formación tendríamos lo siguiente :

Profundidad (H)	Presión de Formación (equivalente a gr/cm <sup>3</sup> )		
	$\gamma_2 = 1.08$	1.32	1.56
1830 m	1.60	1.66	1.70
2440 m	1.47	1.57	1.66
3050 m	1.40	1.52	1.65

Aunque la mayor parte de las veces que ocurre un brote el fluido que entra al pozo es de una densidad de 0.1 gr/cm<sup>3</sup> o menor (gas), también pueden suceder brotes con fluido de una densidad mayor a 1.0 gr/cm<sup>3</sup> --

cuando se encuentran inesperadamente zonas de agua salada con presiones anormalmente altas al estar perforando con un lodo de densidad normal.

Las posibilidades de controlar un brote aumentan conforme la densidad del lodo en el pozo es tal que esta muy cerca de poder controlar la presión de los fluidos contenidos en la formación, sucediendo lo contrario si se usan lodos ligeros o de baja densidad.

Normalmente no es prudente continuar perforando si el valor de la tolerancia calculado es menor de  $0.06 \text{ gr/cm}^3$ .

## VI.2 Limitaciones

La ecuación expuesta en el punto anterior para la tolerancia de un brote no toma en consideración las caídas de presión en el espacio anular ó en la línea de estrangulación, por lo que deberán hacerse algunas correcciones.

La caída de presión en el espacio anular es causada por la fricción que --- existe desde la formación más débil hasta la superficie y dicha caída puede ser determinada a partir del gasto y de las propiedades del lodo usando las ecuaciones de Bingham ó la de Ley de Potencias.

La caída de presión en el espacio anular  $P_a$  se puede convertir en unidades equivalentes a las de densidad mediante la siguiente ecuación:

$$F_L = \frac{P_a \times 10}{h}$$

Donde  $F_L$  es la caída de presión en el espacio anular en unidades equivalentes a densidad, por lo que el valor de la tolerancia se reducirá a:

$$T = \frac{h}{H} (\gamma_{ez} - \gamma_2) - F_L$$

Además si se usa el método del ingeniero manteniendo la presión en el espacio anular constante mientras por la tubería de perforación se circula el lodo nuevo, la caída de presión en la línea de estrangulación expresada en unidades equivalentes a densidad deberá también restarse al valor de la tolerancia, quedando finalmente la ecuación de tolerancia igual a:

$$T = \frac{h}{H} (\gamma_{ez} - \gamma_2) - F_L - F_C$$

Donde  $F_C$  es la caída de presión en la línea de estrangulación en unidades equivalentes a densidad de lodo medida a la profundidad de la zapata.

Ahora considerese el ejemplo anterior donde  $h = 1460$  m.,  $\gamma_{ez} = 1.74$  gr/cm<sup>3</sup>  
 $H = 3050$ m,  $\gamma_2 = 1.32$  gr/cm<sup>3</sup> y supóngase que las caídas de presión en el espacio anular y en la línea de estrangulación en unidades equivalentes son

---

0.03 y 0.05 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente, entonces la tolerancia efectiva se verá reducida del valor de 0.20 al de 0.12 gr/cm<sup>3</sup> y la densidad del lodo equivalente a la profundidad de 3050 m., para contener la presión de formación se reducirá de 1.52 a 1.45 gr/cm<sup>3</sup>.

Por razones obvias es preferible no usar el método del Ingeniero manteniendo la presión en el espacio anular constante, siendo más prudente emplear este método usando como parámetro de control la presión en la tubería de perforación para compensar los cambios en la densidad del lodo que sucedan en la mencionada tubería.

### VI.3 Correcciones por altura de fluido.

Como se dijo en uno de los capítulos anteriores la cantidad de fluido que entra a un pozo al tenerse un brote, se puede cuantificar observando el incremento de volumen en las presas de lodo.

Con el dato anterior y conociendo el conjunto de herramienta que se tiene y el diámetro del agujero se puede calcular la altura a que se encuentra el fluido que entró al pozo.

Por otra parte siempre deberá asumirse que el fluido invasor es gas, a menos que la experiencia ó el total conocimiento de la zona nos indique que se trata de agua salada.

Considerese que el volumen de fluido que entró al pozo son 2.4 m<sup>3</sup>, y se tiene un conjunto de fondo constituido por 15 tubos lastrabarrena de 8 pg. en agujero de 12.25 pg., entonces el fluido invasor ocupará una longitud de 60 m ó sea aproximadamente 6 tubos lastrabarrena (se considera que la capacidad anular entre la tubería de perforación y la pared del pozo es de 0.04 m<sup>3</sup>/m).

Pero si el conjunto de fondo estuviera constituido por 15 tubos lastrabarrena de 4.75 pg. en agujero de 5.875 pg., tendríamos que el espacio anular en

entre los tubos lastrabarrena y la pared del pozo estaría ocupada por --  $0.8 \text{ m}^3$  del fluido que entró al pozo y los restantes  $1.6 \text{ m}^3$  se encontrarían en el espacio anular arriba de los tubos lastrabarrena entre la tubería de perforación (en este caso de 3.5 pg.) y la pared del pozo, ocupando una altura de 138 m y por lo tanto el fluido invasor ocupará una altura total de 280 m aproximadamente.

La presencia de gas en el espacio anular reducirá la tolerancia y por lo tanto la máxima presión que puede ser impuesta para contener la presión que puede ser impuesta para contener la presión de los fluidos de la formación.

El valor de la presión de superficie en el espacio anular dependerá de donde se encuentre la parte superior de la burbuja de gas.

En fin el efecto que puede causar el fluido invasor y su altura en el espacio anular se hace más importante conforme la profundidad del pozo aumenta con la consecuente reducción del diametro del mismo.

A continuación considerese dos casos, el primero cuando la parte superior del fluido entró al pozo este debajo de la zapata de la última tubería de revestimiento cementada y el segundo cuando la parte superior del fluido invasor este por encima de la mencionada zapata.

CASO I La parte superior del fluido que entró al pozo está debajo de la zapata.

La máxima presión de formación sin tomar en cuenta el volumen de fluido invasor es igual a :

$$P_f = \left( \frac{\gamma_{ez} - \gamma_2}{10} \right) h + \frac{\gamma_2 \times H}{10}$$

La presión de formación admisible ahora se verá reducida por:

$$\frac{(\gamma_2 - \gamma_{fi}) H_{fi}}{10}$$

donde  $H_{fi}$  es la altura del fluido que entró al pozo y  $\gamma_{fi}$  es la densidad del fluido invasor.

Reduciéndose entonces la presión de formación admisible a:

$$P_{fa} = \frac{h}{10} (\gamma_{ez} - \gamma_2) + \frac{(H - H_{fi})}{10} \gamma_2 + H_{fi} \gamma_{fi}$$

La cual puede ser convertida en unidades de densidad de lodo ( $\gamma_3$ ) con la siguiente fórmula:

$$\gamma_3 = \frac{h (\gamma_{ez} - \gamma_2) + (H - H_{fi}) \gamma_2 + H_{fi} \gamma_{fi}}{10}$$

Con lo que el valor de la tolerancia efectiva ( $T_e$ ) será de

$$T_e = \gamma_3 - \gamma_2$$

Sustrayendo de  $T_e$  las respectivas caídas de presión en la línea de estrangulación y en el espacio anular en unidades equivalentes.

Por lo que se refiere a la máxima presión de superficie permitida no cambiará y permanecerá en el valor de

$$P_s = \frac{h (\gamma_{ez} - \gamma_2)}{10}$$

menos las correcciones por caídas de presión en la línea de estrangulación y en el espacio anular.

CASO II La parte superior del fluido que entró al pozo está arriba de la zapata.

Para este caso la máxima presión de formación sin que el fluido que entró al pozo sea tomado en cuenta es como en el caso anterior.

$$P_f = \frac{(\gamma_{ez} - \gamma_2) h}{10} + \frac{\gamma_2 \times H}{10}$$

Pero la presión de formación admisible en este caso será reducida por la cantidad de:

$$\frac{(H-h)}{10} (\gamma_2 - \gamma_{fi})$$

por lo que dicha presión finalmente será:

$$P_{fa} = \frac{h \gamma_{ez}}{10} + \frac{(H-h) \gamma_{fi}}{10}$$

y esta presión puede ser expresada en unidades equivalentes a densidad de lodo con la fórmula siguiente:

$$\gamma_3 = \frac{h(\gamma_{ez}) + (H-h) \gamma_{fi}}{H}$$

por lo que el valor efectivo de la tolerancia será:

$$T_e = \gamma_3 - \gamma_2$$

y como en el caso anterior deberá corregirse por los efectos de las caídas de presión en el espacio anular y en la línea de estrangulación.

Por lo que se refiere a la máxima presión de superficie se verá incrementada y ahora será igual a:

$$P_s = \frac{h(\gamma_{ez} - \gamma_{fi})}{10} + \frac{H \gamma_{fi}}{10} (\gamma_2 - \gamma_{fi}) - \frac{H}{10} (\gamma_2 - \gamma_{fi})$$

y también deberá corregirse por efectos de caída de presión en el espacio anular y en la línea de estrangulación.

En fin la tolerancia es una característica o propiedad de la formación que debe tomarse en cuenta para no presuponer situaciones irreales, ya que --- siendo representativa de la resistencia de la formación a ser fracturada --- debe calcularse e interpretarse debidamente a fin de evitar algún descontrol interno.

BIBLIOGRAFIA:

- 1.- Fundamentals of pressure Control.  
por H.A. Kendall, Petroleum Engineer, Noviembre 1977
- 2.- Offshore Fracture Gradients.  
Stan A. Christman, SPE-AIME, EXXON Company, U.S.A.
- 3.- Pressure Control in drilling.  
por Bill Rehm., The Petroleum Publishing Co. (pags. 31 a 36 y 58 a 62)
- 4.- How to run casing and open - hole pressure test,  
por Martin E. Chenevert y Leo J. McClure; Oil and Gas.  
Journal; 6 marzo 1978 pag. 66
- 5.- A Mathematical Model of a gas kick.  
J.L. LeBlanc y R.L. Lewis, miembros del AIME
- 6.- Detecting and controlling abnormal pressure  
por D.I. Wilkie and W.F. Bernard, World Oil, Julio 1981  
(pags. 136 a 144).