

## CAPÍTULO 1

### CONCEPTOS GENERALES DEL CONTROL DE POZOS

#### 1.1 INTRODUCCIÓN

En los pozos petroleros, durante las etapas de perforación, terminación y mantenimiento de los mismos, existe la probabilidad de que se origine un brote. Esto se debe al desbalance entre la presión de formación y presión hidrostática del fluido de control. Figura 1-1.

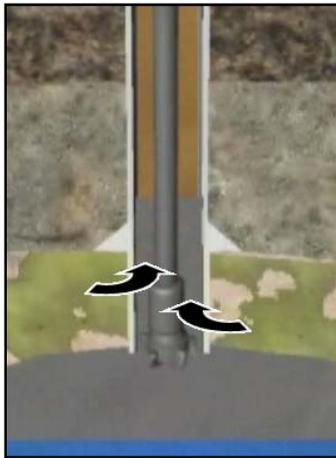


Figura 1-1. Brote de la formación al pozo.

Si los brotes son detectados a tiempo, aplicando las medidas inmediatas y correctas para manejarlo en superficie no causa daños industriales, ecológicos o al personal. Pero en caso contrario, se incrementan los tiempos y costos de la intervención.

Si el brote no es detectado a tiempo, y no se aplican las medidas correctas en superficie para manejarlo o no se tiene integridad en los sistemas superficiales de control; este puede manifestarse de forma violenta en superficie, con todo el potencial contenido en la formación productora y sin poder manejar los fluidos a voluntad. En la industria petrolera, a esta condición se le conoce como “descontrol de pozo”, figura 1-2.



**Figura 1-2. Descontrol de pozo.**

En algunos de los casos un descontrol puede alcanzar la magnitud de siniestro, figura 1-3, causando la pérdida total del equipo, del mismo pozo y daños severos al personal, al entorno social y ecológico.



**Figura 1-3. Siniestro de un descontrol de pozos en plataforma.**

Si bien, la ocurrencia de los brotes confirma la presencia de hidrocarburos, es sumamente importante que durante la intervención en un pozo, cualquiera que sea su objetivo, se eviten estos eventos mediante la aplicación de sistemas adecuados de:

- Fluidos de perforación.
- Conexiones superficiales de control.

- Equipos superficiales de medición de parámetros.
- Practicas operativas.
- Personal debidamente capacitado y entrenado.

En el control de pozos, el análisis de los principios básicos permite la solución tanto de problemas sencillos como complejos.

## **1.2 CONCEPTOS DEL CONTROL DE POZOS**

En este capítulo se presentan definiciones y conceptos básicos que se requieren para conocer las causas y orígenes de influjos que pueden provocar un brote y esto nos lleve al descontrol de un pozo. En el control de pozos el estudio de los principios básicos nos proporciona los fundamentos para la comprensión de los fenómenos que se presentan al descontrolarse un pozo y así poder tomar las decisiones correctas para su control.

### **1.2.1 CONTROL DE POZOS**

La definición de control de pozos es, mantener la presión de formación debajo de la presión ejercida por el gradiente hidrostático generado por un fluido de control.

### **1.2.2 INFLUJO O BROTE**

Es la entrada de fluidos provenientes de la formación al pozo, generado por un desbalance entre la presión de formación y la presión hidrostática del fluido de control.<sup>1</sup>

### **1.2.3 DESCENTROL**

Se le llama descontrol al influjo de fluidos que no puede manejarse a voluntad dado un problema en las conexiones superficiales de control o debido una respuesta tardía o alguna técnica mal empleada.

1. Referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

### 1.3 CONCEPTOS GENERALES DE PRESIÓN

A continuación serán descritos los conceptos que estarán involucrados en el manejo y control de las presiones.

#### 1.3.1 PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Es la presión ejercida por una columna de fluido, debido a su densidad y altura vertical. Siendo su fórmula en el sistema métrico decimal:

$$P_h = \frac{D \times H}{10} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

- P: Presión, [kg / cm<sup>2</sup>]
- D: Densidad, [gr / cm<sup>3</sup>]
- H: Profundidad, [m]

#### 1.3.2 PRESIÓN DE FORMACIÓN

Es la presión de los fluidos contenidos dentro de los espacios porosos de una roca, también se le llama presión de poro, figura 1-4.

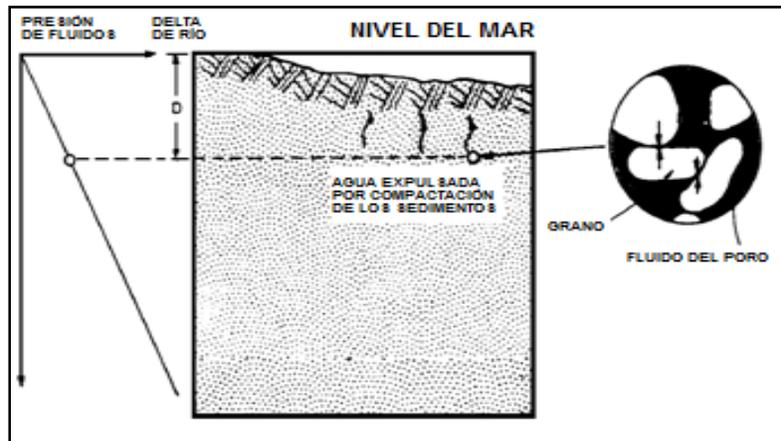


Figura 1-4. Presión de formación.

Las presiones de formación se clasifican en, figura 1-5:

- a) Normales.
- b) Subnormales.
- c) Anormales.

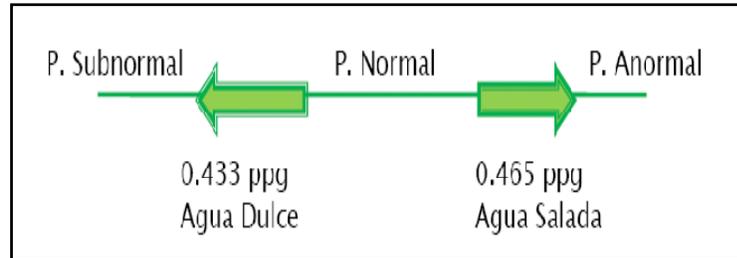


Figura 1-5. Clasificación de las presiones de formación.

La severidad de un brote depende de varios factores, uno de los más importantes es la permeabilidad de la roca. Una roca con alta permeabilidad y porosidad tendrá más posibilidad de provocar un brote que una roca con baja permeabilidad y porosidad.

#### a) FORMACIONES CON PRESIÓN NORMAL

Son aquellas que se pueden controlar con densidades del agua salada. Las densidades del fluido requerido para controlar estas presiones es el equivalente a un gradiente de 0.100 a 0.108 [(kg / cm<sup>2</sup>) / m].

Para conocer la "normalidad" o "anormalidad" de las presiones en cierta área, se deberá establecer el gradiente del agua congénita en las formaciones de esa región, conforme el contenido de sales disueltas.

#### b) FORMACIONES CON PRESIÓN SUBNORMAL

Son aquellas que se pueden controlar con una densidad menor que la de agua dulce, equivalente a un gradiente menor de 0.100 [(kg / cm<sup>2</sup>) / m].

Una posible explicación de la existencia de tales presiones en las formaciones, es considerar que el gas y otros fluidos han escapado por fallas u otras vías del yacimiento, causando su depresionamiento.

**c) FORMACIONES CON PRESIÓN ANORMAL**

Son aquellas en que la presión de formación es mayor a la que se considera como presión normal. Las densidades de fluidos requeridos para controlar estas presiones equivalen a gradientes hasta de  $0.224 \text{ [(kg / cm}^2\text{) / m]}$ .

Estas presiones se generan usualmente por:

- a) La compresión que sufren los fluidos de la formación debido al peso de los estratos superiores, debido a la baja compactación.
- b) La compresión que sufren los fluidos de la formación debido a la compresibilidad de la roca, esto se presenta después de la zona de transición.

Las zonas de presión de formación anormales se originaron durante el proceso de depositación y compactación, formándose una barrera impermeable que impidió la liberación del agua de la formación por debajo de esta barrera. Esta barrera impermeable se formó debido a que el proceso de sedimentación y compactación ocurrió a un ritmo más rápido que el movimiento ascendente del agua. Consecuentemente, la porosidad de la formación abajo de esta barrera impermeable difiere de la tendencia normal, figura 1-6.

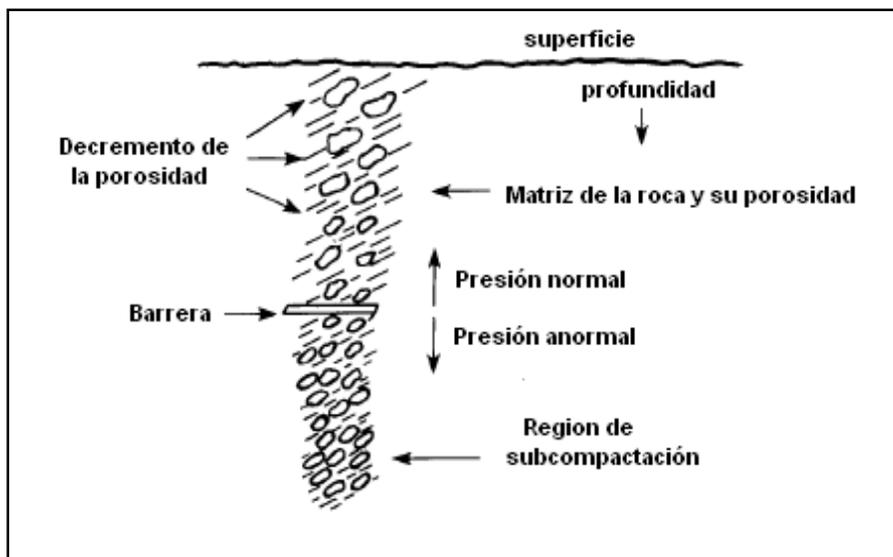


Figura 1-6. Distribución de porosidades y presiones en la formación.

### 1.3.3 PRESIÓN DE SOBRECARGA O PRESIÓN TOTAL DE FORMACIÓN

Es el peso de los materiales que se ejerce en un punto determinado en la profundidad de la tierra.

La fórmula para conocer la presión de sobrecarga,  $\sigma_{SC}$ , es:

$$\sigma_{SC} = \frac{(\text{PESO DEL MINERAL}) + (\text{PESO DEL AGUA})}{\text{AREA QUE LO SOPORTA}} \quad \text{Ec. 1.2}$$

En donde los valores empleados son el promedio de la densidad del agua contenida en los poros y el promedio de la densidad de los granos minerales.

Esta presión se debe al peso de las rocas junto con los fluidos que contienen. Es conveniente su determinación, ya que con frecuencia ocurren variaciones considerables.<sup>2</sup>

Las rocas dentro del subsuelo promedian de 2.16 a 2.64 [gr / cm<sup>3</sup>]

### 1.3.4 PRESIÓN DE FRACTURA

Es la presión a la cual se presenta una falla mecánica de una formación, originando pérdida de lodo hacia la misma, esta puede ser parcial o total.

Aunque los términos presión de fractura y gradiente no son técnicamente lo mismo, a menudo se emplean para designar lo mismo. La presión de fractura se expresa como un gradiente en [(kg / cm<sup>2</sup>) / m], [psi / pie] ó en [kg / cm<sup>2</sup>], [psi]. Los gradientes de fractura usualmente se incrementan con la profundidad.

Existen métodos directos e indirectos para calcular los gradientes de fractura de la formación. Los directos son propuestos por los autores:

- Hubert y Willis.
- Matthews y Kelly.
- Eaton.

Por otro lado el método indirecto se evalúa en campo para determinar el gradiente de fractura, denominado "Prueba de Goteo".

### **PRUEBA DE GOTEO**

Para determinar el gradiente de fractura de la formación se realiza la prueba denominada "de goteo", con la finalidad de proporcionar con bastante confianza el gradiente de fractura de la formación, y así definir la máxima presión permisible en el pozo cuando ocurre un brote, densidad de lodo máxima a usarse y el asentamiento de las subsecuentes tuberías de revestimiento.

La razón fundamental de la prueba de goteo es encontrar la presión a la cual la formación inicia a admitir fluido de control sin provocar fracturamiento de la formación. El resultado será la suma de la presión ejercida por la columna hidrostática del fluido empleado más la presión del manómetro al represionar.

La presión a manejar en la superficie dependerá del valor de la columna hidrostática que se utilice en el pozo; a mayor densidad del lodo, menor presión se requerirá en la superficie.

La máxima presión permisible a la fractura es una limitante en lo referente a control de pozos. Si ésta se rebasa cuando ocurre un brote puede ocurrir un reventón subterráneo, pudiendo alcanzar la superficie por fuera de la TR.<sup>3</sup>

#### **1.3.5 PRESIÓN DE FONDO EN EL POZO**

Cuando se perfora un pozo se imponen presiones sobre los costados del agujero y la mayor presión es la que ejerce la presión hidrostática del lodo de perforación. Sin embargo, la presión requerida al circular el lodo por el espacio anular también actúa sobre las paredes del agujero. Esta presión a condiciones dinámicas pocas veces excede los 14 [kg/cm<sup>2</sup>]. Pero otras presiones adicionales se originarán por la contrapresión del lodo del

espacio anular por efectos de gravedad o por el movimiento de tubería causado por suaveo y surgencia.<sup>4</sup>

### **1.3.6 PRESIONES DE CIERRE, PCTP Y PCTR**

Cuando se cierra un pozo, el intervalo aportado seguirá fluyendo hasta que las presiones hidrostática y de formación se equilibren y estabilicen, lo cual puede llevar algunos minutos, dependiendo del tipo de fluido invasor y de la permeabilidad de la roca. Una vez estabilizado el pozo, las presiones de cierre serán el resultado de la diferencia entre la presión hidrostática y la presión de formación.

En la mayoría de los casos, la Presión de cierre en la tubería de revestimiento (PCTR) será más alta que la Presión de Cierre en la Tubería de Perforación (PCTP). Esto se debe a que los fluidos de la formación con mayor facilidad fluyen al espacio anular, desplazando al lodo y disminuyendo su columna hidrostática, lo que no ocurre comúnmente con el lodo del interior de la sarta, por lo que generalmente se toma el valor de PCTP como el más confiable para calcular la densidad de control. Sin embargo, debe señalarse que existen situaciones ocasionales, donde la presión de cierre en la TP no es muy confiable. Tal caso ocurre cuando se presentó un brote al estar perforando y no fue detectado oportunamente.

La descompensación de columnas puede ser tan grande que al cerrar el pozo, la columna de la TP esté parcialmente vacía y no haya presión ( $PCTP = 0$ ). Posteriormente, al ser rellenada la TP (con el fluido invasor) se tendrá una represión ( $PCTP$  distinta de cero) que al calcular la densidad de control dará un valor erróneo. Cómo se observa, este control estará destinado, desde sus inicios, a generar problemas adicionales.<sup>5</sup>

## **1.4 CAUSAS E INDICADORES DE UN BROTE**

Al momento de ocurrir un brote, el lodo en primera instancia es desplazado fuera del pozo, si el brote no es detectado ni corregido a tiempo, el problema se puede complicar hasta llegar a producir un reventón.

En la detección oportuna del brote, se puede tener hasta un 98 % de probabilidades de controlarlo.

#### 1.4.1 CAUSAS DE LOS BROTES

Durante las operaciones de perforación, se conserva una presión hidrostática ligeramente mayor a la de formación. De esta forma se previene el riesgo de que ocurra un influjo. Sin embargo, en ocasiones, la presión de formación excederá la hidrostática y ocurrirá un influjo, esto se puede originar por diversas causas<sup>6</sup>:

- Suaveo del pozo al sacar tubería.
- Densidad insuficiente del lodo.
- Perdidas de circulación.
- Contaminación del lodo con gas.
- Llenado insuficiente durante los viajes.

##### 1.4.1.1 SUAVEO DEL POZO AL SACAR LA TUBERÍA

El efecto de suaveo o sondeo se refiere a la acción que ejerce la sarta de perforación dentro del pozo, cuando se mueve hacia arriba a una velocidad mayor que la del lodo. Esto origina que el efecto sea mucho mayor. Si esta reducción de presión es lo suficientemente grande como para disminuir la presión hidrostática efectiva a un valor por debajo del de la formación, dará origen a un desequilibrio que causara un influjo, figura 1-7.

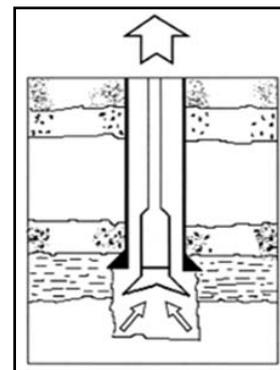


Figura 1-7. Efecto de suaveo en la tubería.

##### 1.4.1.2 DENSIDAD INSUFICIENTE DEL LODO

Esta es una de las causas predominantes que originan los brotes. En la actualidad se ha enfatizado en perforar con densidades de lodo mínimas necesarias de control de presión

de formación, con el objetivo de optimizar las velocidades de perforación. Pero se deberá tener un especial cuidado cuando se perforen zonas permeables ya que, los fluidos pueden dar alcance al pozo y producir un influjo.

Los influjos causados por densidades insuficientes de lodo pudieran ser fáciles de controlar con solo incrementar la densidad del lodo de perforación, pero a continuación se mencionan las razones por las cuales no es lo más adecuado:

- Se puede exceder el gradiente de fractura.
- Se incrementa el riesgo de pegaduras por presión diferencial.
- Se reduce significativamente la velocidad de penetración.

Las variables que influyen en el efecto de suaveo son:

- Velocidad de extracción de la tubería.
- Reología del lodo.
- Geometría del pozo.
- Estabilizadores de la sarta.

#### 1.4.1.3 PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN

Son uno de los problemas más comunes durante la perforación. Si la pérdida de circulación se presenta durante el proceso de perforación, se corre el riesgo de tener un influjo y este se incrementa al estar en zonas de alta presión o en el yacimiento, en pozos delimitadores y exploratorios. Al perder la columna de lodo, la presión hidrostática disminuye al punto de permitir la entrada de fluidos de la formación al pozo, ocasionando un influjo.

La pérdida de circulación es la reducción o ausencia total de flujo de fluido por el espacio anular comprendido entre la formación y la tubería de revestimiento, o entre la tubería de revestimiento y la tubería de producción, cuando se bombea fluido en sentido descendente por la columna de perforación o la tubería de revestimiento.

La pérdida de circulación de fluido constituye un peligro conocido durante las operaciones de perforación efectuadas en yacimientos de alta permeabilidad, en zonas agotadas, y en formaciones débiles o naturalmente fracturadas, figura 1-8. La circulación puede deteriorarse incluso cuando las densidades de los fluidos se mantengan dentro de los márgenes de seguridad habituales; gradiente menor que el gradiente de fracturamiento de la formación. Detener las pérdidas de circulación antes de que estén fuera de control es crucial para el logro de operaciones seguras.

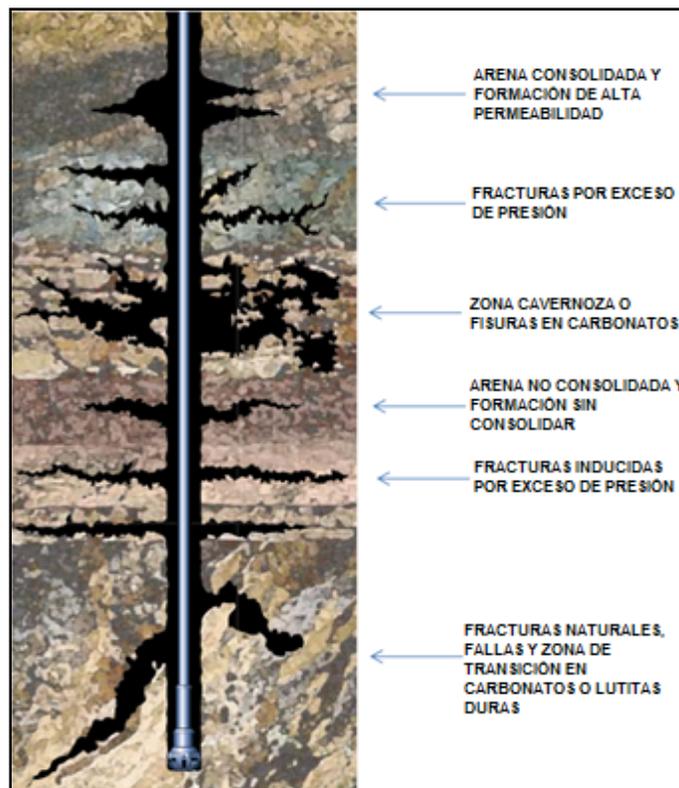


Figura 1-8. Zonas potenciales donde pueden ocurrir las pérdidas de circulación.

Si bien en la industria definen a la pérdida de circulación de distintas maneras, en general puede ser clasificada como filtración cuando las pérdidas son inferiores a 1.5 [m<sup>3</sup> / h]. Las pérdidas de retorno parciales implican pérdidas de más de 10 [Bl / h], pero algo de fluido retorna a la superficie.<sup>7</sup>

Durante la pérdida de circulación total, no sale ningún fluido del espacio anular. En este caso extremadamente severo, el pozo quizás no retenga una columna de fluido aunque se detengan las bombas de circulación.

Si el pozo no permanece lleno de fluido, la altura vertical de la columna de fluido se reduce y la presión ejercida sobre la formación expuesta disminuye. En consecuencia, otra zona puede fluir dentro del pozo mientras la zona de pérdida primaria está admitiendo fluido. En casos extremos, puede producirse la pérdida del control del pozo, con consecuencias catastróficas.

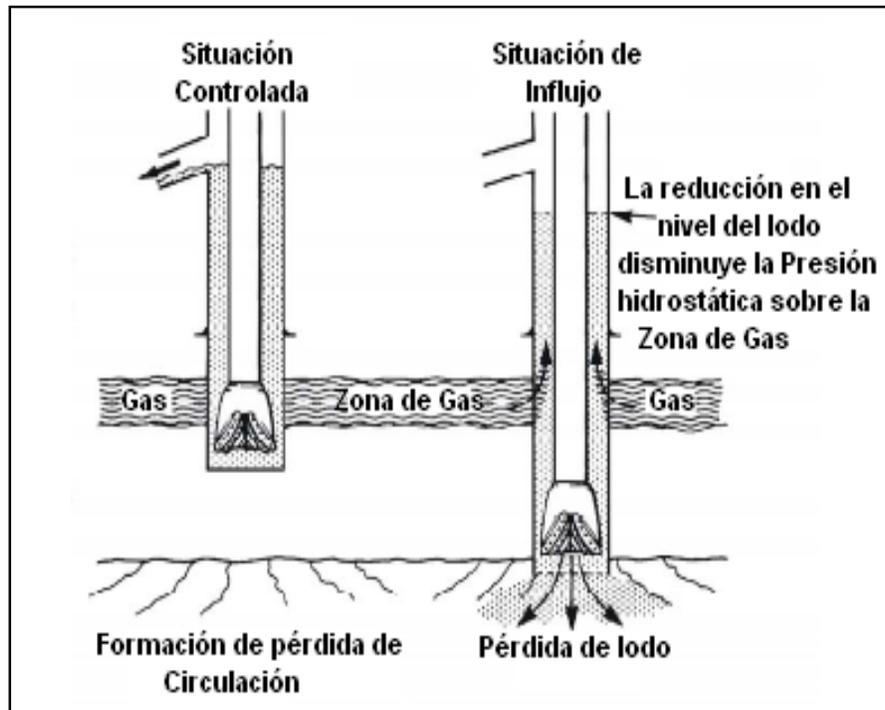


Figura 1-9. Influjo por pérdidas de circulación.

#### 1.4.1.4 CONTAMINACIÓN DEL LODO CON GAS

Los influjos también se pueden originar por la reducción en la densidad del lodo en la presencia del gas de la roca cortada con la barrena. Al perforar demasiado rápido, el gas contenido en los recortes, se libera ocasionando la reducción en la densidad del lodo. Eso reduce la presión hidrostática en el pozo, permitiendo que una cantidad considerable de gas entre al pozo.

El gas se detecta en la superficie bajo la forma de lodo "cortado" y una pequeña cantidad de gas en el fondo representa un gran volumen en la superficie. Los influjos que ocurren

por esta causa terminan transformándose en un descontrol por lo que al detectar este influjo se recomienda<sup>8</sup>:

- Reducir el ritmo de penetración.
- Aumentar el gasto de circulación.
- Circular el tiempo necesario para desgasificar el lodo.

#### 1.4.1.5 LLENADO INSUFICIENTE DURANTE LOS VIAJES

A medida que la tubería se saca del pozo, el nivel de lodo disminuye por el volumen que desplaza el acero en el interior del pozo. Conforme se extrae la tubería y el pozo no se llena con lodo, el nivel del mismo decrece y por consecuencia también la presión hidrostática. Esto se torna crítico cuando se saca herramienta de mayor desplazamiento como lo son: los lastrabarrenas y la tubería pesada de perforación (Heavy Weight).

De acuerdo con las normas API-16D y API-RP59, al estar sacando la tubería, debe llenarse el espacio anular con lodo antes de que la presión hidrostática de columna de lodo acuse una disminución de 5 [kg / cm<sup>2</sup>], en términos prácticos cada cinco lingadas de tubería de perforación.

#### 1.4.2 INDICADORES DE LOS BROTES

Al momento de ocurrir un brote, el lodo es desplazado fuera del pozo. Los indicadores definidos de que el lodo está fluyendo fuera del pozo son: aumento del volumen en presas, aumento en el gasto de salida mientras se está circulando con gasto constante, flujo del pozo teniéndose la bomba parada y el hecho de que el pozo acepte menos lodo o fluya de él más lodo que el calculado para el viaje. Otros indicadores de la presencia de un brote son:

- El pozo acepta menos lodo o desplaza más en los viajes.
- Flujo sin circulación.
- Aumento de volumen en presas.
- Aumento en el gasto de salida.

#### 1.4.2.1 EL POZO ACEPTA MENOS LODO O DESPLAZA MAS EN LOS VIAJES

Cuando se realiza un viaje (introducción o extracción de tubería) es más difícil detectar un brote. En cualquiera de los dos casos, para poder detectar un brote en sus inicios, es necesario llevar un control de la cantidad de tubería introducida o sacada del pozo y el correspondiente volumen de lodo desplazado o requerido para su llenado correspondiente.

Al meter tubería dentro del pozo, se desplazará lodo hacia fuera. El volumen de lodo desplazado deberá ser igual al volumen de acero de la tubería introducida. Si el volumen desplazado es mayor que el volumen del acero, entonces fluidos de la formación estarán entrando al pozo forzando el lodo hacia afuera, es decir estará ocurriendo un brote. Si el volumen del lodo desplazado es menor que el volumen de acero de la tubería introducida, entonces se tendrá pérdida de circulación. En caso de que se esté sacando tubería del pozo, se debe añadir lodo para que vaya ocupando el espacio previamente ocupado por la tubería que ya se sacó. El volumen de lodo requerido para llenar el pozo, debe ser igual al volumen de acero que ha sido extraído. Si por el contrario, se requiere una cantidad menor para llenar el pozo, entonces se tendrá una indicación de que está ocurriendo un brote. Ahora bien si la cantidad de lodo necesaria para llenar el pozo es mayor que el volumen de acero extraído, entonces se tendrá una pérdida de lodo. La extracción de tubería es una operación más crítica que su introducción, debido a los efectos de suaveo y de llenado del pozo. En otras palabras, tanto el efecto de suaveo como el de llenado ocasional del pozo, reducen la presión en el fondo y esto puede originar que ocurra un brote. Ambas operaciones de viaje, requieren que se determine el volumen del acero de la tubería. El método que se prefiere para su cálculo es a partir de las tablas de desplazamiento, para el tamaño y peso de la tubería en particular que se va a sacar o meter. Otra manera es aplicando la formula correspondiente.

El volumen real requerido para llenar al pozo puede medirse mediante:

- 1) Tanque de viajes.
- 2) Medidor de gasto.

- 3) El cambio en el nivel en las presas.
- 4) El contador de emboladas.

Cuando se mete tubería, el tanque de viajes deberá utilizarse, para medir el volumen de lodo desplazado del pozo, dependiendo de la forma en que estén hechas las conexiones. Es aconsejable que el tanque de viajes esté dispuesto de tal manera que se pueda utilizar para medir el volumen de lodo llenado o desplazado del pozo. Pueden instalarse medidores de gasto de tal manera que midan el volumen bombeado dentro del pozo o el volumen de lodo desplazado. El nivel de la presa de lodos debe ser sensible a los cambios en el volumen de lodo; sin embargo debe recalarse que se necesita un volumen grande de lodo para que el cambio pueda ser notorio, especialmente en presas con un área bastante grande. El determinar el volumen de lodo contando el número de emboladas puede hacerse solamente cuando se está llenando el pozo. No puede utilizarse cuando se está metiendo tubería y ésta desplaza lodo del pozo, puesto que este lodo no pasa a través de la bomba.

#### 1.4.2.2 FLUJO SIN CIRCULACIÓN

La indicación más definida de un brote, es un pozo fluyendo teniendo las bombas paradas. Si el indicador así se manifiesta, es seguro que un brote está en camino; atender un pozo de esta manera se le conoce como "observar el pozo". Las bombas de lodo son detenidas y el espacio anular es observado para determinar si el pozo fluye. Cuando se observa el pozo, la práctica normal consiste en subir la sarta de perforación de manera que la flecha se encuentre arriba de la mesa rotatoria. Antes de poder observar si existe flujo, debe llenarse con lodo el espacio anular, en caso de que no esté lleno.

#### 1.4.2.3 AUMENTO DE VOLÚMEN EN PRESAS

Suponiendo que no se añada fluido ni a los tanques ni a las presas de lodo, una ganancia en el volumen de cualquiera de estos, al estar perforando, es un signo seguro de que se tiene un brote. Existe equipo de medición de volumen que debe tenerse en las presas y los tanques de lodo y que hace sonar una alarma indicadora si el nivel de lodo aumenta o disminuye una cantidad prefijada. También hay disponible, accesorios que mantienen un

registro constante del volumen en presas. A estos se les conoce como totalizadores de volumen en presas y los hay en diferentes marcas y modelos.

#### 1.4.2.4 AUMENTO EN EL GASTO DE SALIDA

Un aumento en el gasto normal de salida es también una indicación de que está ocurriendo un brote, que a su vez está empujando lodo adicional fuera del pozo. Esta situación puede ser detectada observando el flujo del lodo a través de la temblorina y cualquier cambio fuera de lo normal; existen equipos medidores de gasto, que pueden detectar esas variaciones en forma automática.<sup>9</sup>

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Petróleos Mexicanos. Pemex Exploración y Producción. **Un Siglo de la Perforación en México. Tomo 13 - Control de Brotes.**
2. Adams, Neal. **Drilling Engineering.** Pennwell Books, 1985.
3. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
4. Petróleos Mexicanos. Pemex Exploración y Producción. **Un Siglo de la Perforación en México. Tomo 13 - Control de Brotes.**
5. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
6. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
7. Raafat Abbas Haitham Jarouj, Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos. Steve Dole, EnCana Corporation. Effendhy Hendri Junaidi, P.T. Caltex Pacific Indonesia, Duri Indonesia. Steve McCraith, Nigel Shuttleworth, Klass van der Plas. Shell U.K. Exploration and Production, Aberdeen Escocia. **Una red de seguridad para controlar las pérdidas de circulación.** Schlumberger. 2004.
8. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.
9. Petróleos Mexicanos PEP-UPMP. **Programa de Acreditación en Control de Pozos,** Wellcap.