

LA REOLOGÍA APLICADA A LOS FLUIDOS USADOS EN PERFORACIÓN DE POZOS DE PETRÓLEO

CARLOS MARIO SIERRA RESTREPO

Ingeniero de Petróleos

Profesor Asistente - Facultad de Minas

RESUMEN

Las propiedades de flujo de los fluidos de perforación deben ser controladas, pues juegan un papel muy importante en la perforación de un pozo y un mal comportamiento puede ocasionar serios problemas. Estas propiedades son en gran parte consecuencia de su viscosidad o más exactamente de su reología.

Los fluidos de perforación son demasiado complejos y la relación entre tensión de corte y velocidad de corte no está dada por una recta que pase por el origen, como es el caso de los fluidos Newtonianos, por lo que son clasificados como "no Newtonianos". Además, deben vencer un cierto grado de resistencia interna para comenzar a fluir.

No hay una ecuación matemática que describa exactamente la reología de todos los fluidos no-Newtonianos. En cambio, se han propuesto varias ecuaciones que se aproximan a la verdadera relación tensión de corte - velocidad de corte. Las que han mostrado resultados más satisfactorios son: el Modelo Plástico de Bingham, la Ley de Potencia, y la Ley de Potencia Modificada.

PALABRAS CLAVES

Reología, Fluidos de Perforación, Modelos Reológicos.

ABSTRACT

The properties of flow of the drilling fluids should be controlled, because they play a very important paper when we are drilling a well and a wrong behavior

could occasion serious problems. These properties are in great part consequence of their viscosity or more exactly of their rheology.

The drilling fluids are too complex and the relationship between shear stress and shear rate is not considered as a linear relation that passes for the origin, like it is the case of the Newtonian fluids, for the one which they are classified like "non Newtonian fluids". Also, they should conquer a certain grade of internal resistance in order to begin to flow.

There is not a mathematical equation that describes the rheology of all the non-Newtonian fluids exactly. On the other hand, they have proposed several equations that approach the true relationship shear stress - shear rate. Those that have shown more satisfactory outputs are: the Bingham Plastic Model, the Power-Law Model, and the Power-Law Modified Model.

KEY WORDS

Rheology, Drilling Fluids, Rheological Models.

1. INTRODUCCIÓN

Día a día los fluidos utilizados durante la perforación de un pozo, conocidos como lodos de perforación, son más investigados. La estática y la dinámica de estos fluidos son factores muy importantes, haciéndose necesario que se desarrollen ecuaciones y métodos de trabajo que permitan calcular las grandes presiones que se generan a lo largo del hueco y de las sartas de perforación. Estas presiones deben ser consideradas

en casi todos los problemas que se presentan durante la operación.

La determinación de las propiedades de flujo puede ser muy complicada en varios puntos del pozo cuando el fluido o la sarta se están moviendo. Las fuerzas friccionales pueden ser difíciles de representar matemáticamente. Sin embargo hay que hacerlo, pues de ello depende el cálculo de las presiones de circulación en el fondo del pozo, la presión en el fondo durante un viaje de tubería, la capacidad de arrastre de los cortes, las presiones en superficie y en el fondo durante operaciones de control de pozos, las presiones de la bomba, la tasa de circulación y el tamaño óptimo de las boquillas de la broca.

La viscosidad ó las propiedades reológicas, como propiedades relacionadas con la deformación de la materia, tienen mucho que ver en todo esto.

2. CONDICIONES DINÁMICAS EN EL POZO

El ingeniero de perforación debe preocuparse por los efectos interrelacionados de la viscosidad, el caudal y las presiones de circulación, sobre el desempeño del fluido en sus varias funciones. Lamentablemente las propiedades de flujo que serían ideales para cumplir con una función, son frecuentemente perjudiciales para otra. Por lo tanto, las propiedades seleccionadas deben representar una transacción o acuerdo. Por ejemplo, el lodo debe ser lo suficientemente viscoso y de flujo rápido en el anular para que pueda levantar los cortes que se generan durante la perforación (limpieza del pozo). Sin embargo, velocidades demasiado altas pueden producir turbulencia. El flujo turbulento es indeseable en el anular pues genera altas pérdidas de filtrado, grandes presiones de circulación y lavados del pozo.

Dentro del sistema circulatorio de un equipo de perforación (1), la velocidad de corte depende de la velocidad promedio del lodo en la sección a través de la cual está pasando en ese momento. Así, las velocidades de corte son muy altas en las boquillas de la broca, son bajas en la sarta y muy bajas en el anular. La deformación que sufra el fluido depende

de la velocidad de corte. Una velocidad de corte alta corresponde a una mayor resistencia, por lo tanto la tensión de corte en el anular es menor que en la sarta. Un cambio en la velocidad de la bomba afectará las velocidades de corte en todo el sistema, y por tanto las tensiones de corte.

El término de pérdidas de presión es el más difícil de evaluar en un balance de energía, sin embargo es un término muy importante ya que grandes fuerzas viscosas deben ser sobreestimadas para mover un fluido de perforación a lo largo de un conducto delgado. Una descripción matemática de las fuerzas viscosas (o de la relación entre tensión de corte y velocidad de corte) es necesaria para el desarrollo de la ecuación de pérdidas friccionales de presión. Este tipo de ecuación se conoce como "modelo reológico". Un buen modelo reológico debe aproximarse estrechamente a la verdadera relación entre la tensión de corte y la velocidad de corte, debe basarse en mediciones que puedan hacerse en forma rutinaria, y debe ser lo suficientemente simple para poder ser aplicado en el campo.

3. REOLOGÍA

La mayoría de los fluidos de perforación son demasiado complejos por lo que la relación entre tensión de corte (τ) y velocidad de corte (γ) no está dada por una recta que pase por el origen como es el caso de los fluidos Newtonianos, por ello son clasificados como "no Newtonianos". Además, estos fluidos exhiben una tensión de cedencia, es decir, deben vencer un cierto grado de resistencia interna para comenzar a fluir.

Debido a que el reograma de un fluido no-Newtoniano no es una recta que pase por el origen y a la definición de la viscosidad, estos fluidos no tendrán una viscosidad constante. Acá, dependiendo de la velocidad de corte, se tendrá una viscosidad diferente cada vez. La viscosidad que un fluido de estos tiene si lo confundimos con un fluido Newtoniano, esto es la viscosidad calculada por la relación τ/γ , se denomina "viscosidad aparente". Es evidente que en un fluido no-Newtoniano, ésta depende de la velocidad de corte a la que ha sido determinada.

Los fluidos no-Newtonianos pueden ser pseudoplásticos o dilatantes. Son pseudoplásticos si la viscosidad aparente disminuye con aumentos en la velocidad de corte y son dilatantes si la viscosidad aparente aumenta con aumentos en la velocidad de corte. Los fluidos de perforación y las lechadas de cemento son generalmente de naturaleza pseudoplástica. Para determinar exactamente el reograma de un fluido Newtoniano basta conocer la tensión de corte a una velocidad de corte. Se grafica este punto en papel normal y se traza una recta que lo une con el origen. Para determinar exactamente el reograma de un fluido no Newtoniano sería necesario tener un aparato (viscosímetro) que a un gran número de velocidades de corte, midiera sus correspondientes tensiones de corte. No hay una ecuación matemática que describa exactamente la reología de todos los fluidos no-Newtonianos, pues son muy variados y complejos. En cambio, se han propuesto varias ecuaciones que se aproximan a la verdadera relación tensión de corte - velocidad de corte. A continuación se muestran los modelos matemáticos que han mostrado mejores resultados.

3.1. MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM (2)

Los lodos arcillosos tienen un alto contenido de sólidos y se comportan aproximadamente de conformidad con la teoría de los fluidos plásticos, la cual postula que una fuerza finita debe ser aplicada para iniciar el flujo. Un fluido plástico Bingham no fluirá hasta que la tensión de corte no exceda un cierto valor mínimo τ_0 conocido como "punto de cedencia". Después de que τ_0 ha sido excedido, los cambios en tensión de corte son proporcionales a los cambios en la velocidad de corte. La constante de proporcionalidad en este caso es llamada viscosidad plástica, μ_p . Por lo tanto el modelo está definido por la siguiente ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \left(\frac{\delta v}{\delta y} \right)$$

Esta ecuación es válida solamente para flujo laminar. Este es el modelo más simple para fluidos no Newtonianos, pero es muy usado en el campo pues

es muy sencillo y provee una base excelente para el tratamiento de lodos.

La viscosidad plástica es generalmente explicada como la parte de la resistencia al flujo causada por fricción mecánica. Es principalmente afectada por la concentración de sólidos, el tamaño y forma de las partículas y la viscosidad de la fase fluida. Un aumento en la viscosidad plástica generalmente significa un aumento en el porcentaje volumétrico de sólidos, una reducción en el tamaño de las partículas sólidas, un cambio en la forma de las mismas o una combinación de estos factores. Todo aumento en la superficie total expuesta de los sólidos se reflejará en una viscosidad plástica mayor.

El punto de cedencia es la parte de la resistencia al flujo causada por la fuerza de atracción entre partículas. Esta fuerza de atracción es una consecuencia de las cargas eléctricas que hay en la superficie de los sólidos dispersos en la fase fluida. La magnitud de esa fuerza depende del tipo de sólidos y las cargas eléctricas asociadas con ellos, de la cantidad de sólidos y de las concentraciones iónicas de las sales contenidas en la fase fluida del lodo. Un punto de cedencia excesivo puede tener varias causas:

- La presencia de contaminantes como sal o cemento puede provocar la floculación de las partículas de arcilla.
- La acción trituradora rompe las partículas, dejando expuesto un número mayor de cargas de superficie.
- Un aumento de la concentración de sólidos aumenta el número de cargas de superficie y disminuye la distancia entre ellas.

Para reducir el punto de cedencia se pueden añadir sustancias químicas que anulan el efecto de las cargas eléctricas sobre las arcillas (fosfatos, lignitos, etc). Un aumento puede lograrse adicionando un buen viscosificante.

Las unidades de la viscosidad plástica son las mismas de la viscosidad Newtoniana o aparente. Para ser consistentes, las unidades del punto de cedencia deben

ser las mismas de τ . Sin embargo, el punto de cedencia es expresado más corrientemente en lbf/100 pies².

3.2. LEY DE POTENCIA (2)

A pesar del hecho de que la viscosidad plástica y el punto de cedencia han demostrado ser parámetros muy importantes en los lodos, el modelo plástico de Bingham presenta algunos defectos. A bajas velocidades de corte, las tensiones de corte dadas por el modelo plástico exceden, a veces considerablemente, las verdaderas tensiones verificadas en los fluidos. Es decir los cálculos hidráulicos han dado a menudo resultados muy diferentes con respecto a las condiciones reales del pozo. Esto es particularmente cierto en fluidos que contienen polímeros y en lodos no dispersos con bajo contenido de sólidos. Estos fluidos se comportan a altas velocidades de corte como si tuvieran un punto de cedencia, pero realmente el reograma pasa por el origen. Esto se explica porque las velocidades de corte en el espacio anular son más bajas de las que se usan para describir este modelo. Ese es un rango en el que el modelo plástico de Bingham no se aproxima a los verdaderos valores de la reología del lodo.

El comportamiento de estos fluidos se describe por la "ley de potencia". El reograma de un fluido que se acomode a este modelo corresponde a una ecuación matemática de la forma:

$$\tau = K \cdot \left(\frac{\delta v}{\delta y} \right)^n$$

Como el anterior modelo, éste requiere dos parámetros para caracterizar el fluido y es válido únicamente para flujo laminar. El parámetro n se conoce como el "índice de comportamiento de flujo laminar". Para lodos no dispersos n está entre 0.4 y 0.7 y para lodos altamente dispersos entre 0.7 y 0.9. El parámetro K se conoce como el "factor de consistencia del flujo laminar". Se considera como similar a la viscosidad plástica, dado que un aumento de K indica generalmente un aumento en la concentración de sólidos o una disminución en el tamaño

de las partículas. K tiene unidades de dyna-seg/cm² o grm/cm-seg². Se acostumbra usar el centipoise equivalente (1 cp-eq=0.01 dyna-seg/cm²).

Este modelo sirve también para representar un fluido Newtoniano ($n=1$ y $k=\mu$). Los fluidos Newtonianos tienen una viscosidad constante con cambios en la velocidad de corte. Los fluidos de perforación por ser fluidos pseudoplásticos presentan altas viscosidades a bajas velocidades de corte. El grado en el que este fenómeno ocurre depende de n . Un fluido con n menor a 0.45 es muy no-Newtoniano. Cuanto más bajo es el valor de n , menos Newtoniano es el fluido.

Sacando logaritmo a ambos lados de la ecuación se puede escribir:

$$\log(\tau) = \log(K) + n \log\left(\frac{\delta v}{\delta y}\right)$$

Esta forma de la ecuación es muy usada ya que corresponde a una línea recta si se grafica en papel log-log. Solo se requieren dos puntos para definir una línea recta de pendiente n y con intercepto en $\log(k)$.

3.3. LEY DE POTENCIA MODIFICADA (3)

Cuando algunos fluidos no Newtonianos son sometidos a velocidades de corte de cero o cercanas a cero, tienden a desarrollar una estructura de gel rígida o semirígida. A estos fluidos se les denomina tixotrópicos. Más exactamente un fluido tixotrópico es aquel en el que la viscosidad aparente aumenta con el tiempo después de cambiar la velocidad de corte a un nuevo valor constante.

El modelo plástico de Bingham y la ley de potencia no tienen en cuenta el comportamiento tixotrópico de los fluidos. De hecho, la mayor parte de los fluidos de perforación poseen un cierto grado de resistencia interna que debe ser vencido para que comiencen a fluir. Esta fuerza que hay que vencer se denomina "resistencia de gel". Obviamente esta propiedad depende del tiempo que el fluido esté en reposo. La resistencia del gel, mide las fuerzas de atracción estáticas entre las partículas mientras que el punto de cedencia mide las fuerzas de atracción dinámicas. La

ley de potencia modificada es similar a la ley de potencia, excepto que tiene en cuenta una tensión de cedencia positiva G_0 :

$$\tau = G_0 + K \cdot \left(\frac{\delta v}{\delta y} \right)^n$$

Tal como ocurre en la ley de potencia, n es una medida de la capacidad del fluido para reducir la viscosidad con velocidad de corte y k es una medida de los sólidos. Sin embargo, los valores de n y k serán usualmente diferentes para las dos leyes.

La ley de potencia modificada es un modelo ligeramente más complicado que los otros, pero se aproxima más estrechamente al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de lodos. El reograma de este modelo es una curva, pero a diferencia de la ley de potencia, no pasa por el origen.

4. BIBLIOGRAFÍA

1. SIERRA, Carlos. Hidráulica de la Perforación Rotatoria, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 1990.
2. BOURGOYNE Jr., Adam y otros. Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series, Vol. 2, Richardson, Texas, 1986, 502 p.r.
3. IMCO Services. Tecnología Aplicada de Lodos, Halliburton Company.

FACULTAD DE MINAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

1887 - 1997

110 Años
*sirviendo al
desarrollo de
la Ingeniería
Colombiana*