

**“XII CONGRESO LATINOAMERICANO DE
PERFORACION”**

***ERODABILIDAD: UN NUEVO CONCEPTO EN INGENIERIA DE
CEMENTACIONES***

AUTOR: ING. FRANCISCO J. RUEDA LIMON

**HALLIBURTON ENERGY SERVICES
MEXICO**

Introduccion

Las investigaciones recientes se han enfocado en el mejoramiento de los índices de éxito en las cementaciones primarias mejorando los métodos de remoción del enjarre o reboque que deja el lodo ó fluido de control tanto en las paredes de la formación como en la parte externa de la tubería de revestimiento. Para el mejoramiento de este proceso se han desarrollado tecnologías que han focalizado su estudio cuantificando el mecanismo de erosión del gel parcialmente prehidratado (PDG) contenido en los fluidos de perforación y el enjarre o reboque dejado en la formación por estos fluidos.

Los resultados de estos experimentos contemplan una relación entre el esfuerzo de corte y la erosión. Los geles parcialmente prehidratados contenidos en los fluidos de perforación y su enjarre depositado tanto en la formación como en la parte externa de la tubería de revestimiento serán erosionados tanto como el esfuerzo de corte en las paredes exceda el punto de cedencia del fluido de perforación. Estas investigaciones también incluyen series de ecuaciones que pueden ser usadas ó aplicadas a un fluido desplazante que erosione y remueva el fluido de perforación y su enjarre de cualquier pozo en particular. Adicionalmente, fué desarrollado un algoritmo capaz de expresar la eficiencia en la remoción del lodo, en términos de porcentaje, el cual, depende de las características reológicas de los fluidos desplazantes; este concepto es llamado **Erodabilidad**. Esta innovación ha sido implementada basada en tres procesos básicos que son:

1. Fluidos desplazantes capaces de ajustarse a los valores reológicos requeridos para la remoción del enjarre.
2. Aparatos de laboratorio que permitan ajustar valores óptimos de surfactantes para lograr el cambio de mojabilidad tanto en la formación como en la tubería.
3. Programas de cómputo que basados en las propiedades reológicas de los fluidos desplazantes, permitan cuantificar el porcentaje de remoción del enjarre tanto en las paredes de la formación como en la parte externa de la tubería de revestimiento.

Cementación Primaria

El principal objetivo en una cementación primaria es conseguir un buen aislamiento en el espacio anular y por ende de los fluidos de la formación. Este aislamiento depende en gran medida de la eficiencia de la cementación primaria afectada principalmente por la condición mecánica del agujero cuando el cemento es bombeado al pozo. La fig. 1 muestra la condición típica de un pozo al final de la perforación y después de un período de espera durante la toma de registros y la colocación de la tubería de revestimiento. La figura muestra el enjarre ubicado en las paredes de la formación, seguidas del fluido de perforación con una condición de gel parcialmente deshidratado y del fluido de perforación con gel moderado. Se define como fluido de perforación con gel moderado al fluido que ha desarrollado un esfuerzo de gel en ausencia de corte y referido como Fluido de Perforación MG. Un fluido de perforación con gel parcialmente deshidratado es aquel que aunado al que desarrolla un esfuerzo de gel en ausencia de corte, tiene también pérdida de una porción de agua; nos referiremos a este como fluido de perforación PDG. Si el cemento es bombeado al pozo como lo muestra la fig. 1, existe la posibilidad que este se canalice a través tanto del fluido de perforación MG como del PDG produciéndose con esto una cementación deficiente.

Para conseguir una cementación exitosa, el pozo debe ser acondicionado adecuadamente mediante el rompimiento del esfuerzo de gel de los fluidos de perforación MG y PDG mediante la remoción tanto como sea posible del anjarre antes de efectuar la cementación del pozo. Mucho se ha discutido que para lograr esta condición se tiene que analizar el uso de frentes lavadores y raspadores mecánicos para lograr un buen desplazamiento del lodo del pozo. Se ha dicho también que el grado de acondicionamiento alcanzado está en función del lodo de perforación utilizado. De lo que se puede concluir que para obtener un trabajo de cementación exitoso, este trabajo debe ser diseñado específicamente para cada pozo y para cada lodo de perforación en particular. Esto, únicamente puede ser alcanzado si el mecanismo de erosión del fluido de perforación PDG y el enjarre o reboque son conocidos.

Estudios y Teorías de la Erodabilidad

La depositación y la erosión de los fluidos de perforación PDG y el enjarre han sido objeto de estudio en las áreas de ultra filtración de proteínas a través de membranas. Porter¹ propuso un transporte de fluido convectivo a través de una torre compuesta de membranas para su depositación y una concentración inducida mediante el transporte de partículas en el fluido de perforación PDG y en el enjarre para su erosión. Davis and Leighton² proponen un corte hidrodinámico inducido mediante un mecanismo de difusión para la migración de partículas tanto del fluido de perforación PDG y como del enjarre mediante el fluido de corte. Fordham³ estudió la filtración de los fluidos de perforación con bentonita sin poder verificar el mecanismo de difusión-convección para los sistemas con bentonita. Para describir la erosión de los fluidos de perforación y el enjarre, Outmans⁴ de propuso un coeficiente de fricción entre las partículas.

Cuando se tienen fluidos de perforación no existen datos disponibles para soportar claramente el mecanismo que existe para la erosión entre el fluido de perforación y el enjarre. Existe una necesidad para comprender el mecanismo que controla la erosión del fluido de perforación PDG y el enjarre a condiciones de fondo de pozo. Una vez que este mecanismo es conocido, luego entonces, un trabajo de cementación puede ser diseñado específicamente para un pozo y un fluido de perforación en particular.

Se han desarrollado estudios para mostrar cómo los fluidos de perforación y el enjarre pueden ser erosionados y mediante que mecanismos se pueden alcanzar niveles satisfactorios en el desplazamiento de estos fluidos. Estos experimentos tuvieron el objetivo de mostrar los siguientes puntos:

1. Determinar, experimentalmente, un mecanismo que demuestre el control de la erosión de un fluido de perforación PDG y el enjarre.
2. Desarrollar un modelo matemático para la erosión de un fluido de perforación PDG y el enjarre.
3. Definir la erodabilidad de un fluido de perforación PDG y el enjarre.

4. Recomendar procedimientos para el mejoramiento de la remoción un fluido de perforación PDG y el enjarre de un pozo para incrementar las posibilidades de éxito en trabajos de cementación primaria.

Aún cuando el objetivo de este trabajo no es profundizar en la obtención de los puntos antes mencionados, creímos conveniente mencionar la base o fundamento del fenómeno de erodabilidad. Por lo que, para el caso específico de este estudio, nos enfocaremos en los procesos y sistemas existentes para determinar este fenómeno previo a la realización de trabajos de cementación primaria.

Mecanismo de Erosión

Los fluidos de perforación PDG y el enjarre son erosionados tanto cuando las caídas de presión en el espacio anular exceden cierto valor. La resistencia a la erosión y las fuerzas de corte generadas por los fluidos de perforación y el enjarre en las paredes de la formación definen el mecanismo de erosión. En los fluidos de perforación PDG y el enjarre, se adhieren partículas, unas encima de otras que significan fuerzas de resistencia para desplazarlas ó removerlas del pozo. La adherencia de estas partículas es debido a fuerzas superficiales y el desplazamiento de las mismas es debido a fuerzas hidrodinámicas. La adherencia está definida como la agregación de partículas y el desplazamiento está definido como la disgregación de partículas.

La caída de presión está relacionada al esfuerzo de corte en la pared de la formación, t_w por la ecuación:

$$t_w = (D_e * D_p) / 4L$$

Donde D_p es la caída de presión en la longitud L y D_e es el diámetro equivalente através del cual el fluido está fluyendo.

Las fuerzas superficiales que ocasionan que las partículas se adhieran una a otras pueden ser expresadas como el esfuerzo cedente de las partículas empacadas en los fluidos de perforación ó en el enjarre. La erosión se lleva a cabo cuando el esfuerzo cortante t_w en la pared de la formación (siendo la pared de la formación el punto de contacto entre el fluido erosionante y el fluido de perforación ó el enjarre), excede el esfuerzo cedente t_o del fluido de perforación ó el enjarre depositado tanto en las paredes de la formación como en la parte externa de la tubería. Fig. 2.

Erodabilidad de un fluido de perforación (E_{df})

Para aplicaciones prácticas, valores altos de erodabilidad E_{df} , permiten erosionar más fácilmente tanto los fluidos de perforación como el enjarre depositado en las paredes de la formación y en la parte externa de la tubería de revestimiento. Así pues, E_{df} debe ser inversamente proporcional al esfuerzo de corte en la pared de la formación:

$$E_{df} = 1 / t_{w, bne}$$

ó

$$E_{df} = C / t_{w, bne}$$

Donde **C** es una constante de proporcionalidad

Aplicación

El objetivo de una cementación primaria es la de desplazar eficientemente el fluido de perforación y enjarre del espacio anular y llenarlo con cemento. Para conseguir esto, las fuerzas de corte actuando en las paredes de la formación deben de mayores a los esfuerzos cedentes del fluido de perforación y del enjarre. Si la erodabilidad de un fluido es conocida, entonces el esfuerzo de corte en la pared necesario para desplazar el fluido de perforación y el enjarre puede ser calculado. Si se conoce el diámetro del agujero, entonces la reología y el gasto del fluido pueden ser diseñados para conocer el esfuerzo de corte requerido en la pared tanto de la formación como en la parte externa de la tubería de revestimiento.

Diseño de Fluidos Desplazantes

Uno de los factores clave en la obtención de un trabajo exitoso de cementación primaria, es primeramente que los fluidos a utilizarse en un trabajo de cementación sean reológicamente adecuados para alcanzar un eficiente desplazamiento del fluido de perforación. Para alcanzar los valores de erodabilidad deseados es muy importante diseñar los valores reológicos de los frentes lavador y espaciador que nos permitan alcanzar altos índices de remoción del lodo, minimizando con esto que la creación de canales y con esto un trabajo deficiente. Ahora bien, tan importante es el diseño reológico de los fluidos como obtener una condición de mojabilidad adecuada tanto en las paredes de la formación como en la parte externa de la tubería de revestimiento. Este cambio de mojabilidad nos permitirá una mejor adhesión del cemento tanto al tubo como a la formación. En pozos con alta temperatura y presión, estos factores se hacen mas críticos. Un sistema adecuado de espaciadores, puede ayudarnos a efectuar un trabajo de cementación de calidad.

Un eficiente sistema de fluidos desplazantes debe poseer las siguientes características:

- Separar Fluidos
- Remover el fluido de perforación y el exceso de enjarre sobre la formación y el tubo.
- Proteger la formación
- Controlar la presión de formación

- Remover películas de aceite
- Inhibir el daño hacia arcillas sensibles al agua
- No afectar adversamente las propiedades de la lechada y/o fluido de perforación

Actualmente existen sistemas capaces de ajustarse a cada tipo fluido de perforación y a cada pozo en especial. Fig. 3.

Aparatos de Laboratorio

Hoy en día existen aparatos de laboratorio que nos permite diseñar fluidos desplazantes en los cuales se requiere de un cambio de mojabilidad en las paredes de la formación y de la tubería de revestimiento. Estos aparatos nos permiten determinar la cantidad exacta de surfactantes para que una vez que se lleva a cabo el desplazamiento de los fluidos de perforación PDG y el enjarre, a su vez éstos mismos dejen las superficies mojadas por agua provocando con esto una mejor adherencia del cemento.

Problemas de compatibilidad con lodos base agua ocurren ocasionalmente cuando estos tienen una densidad elevada. Los lodos base aceite poseen un problema adicional durante las operaciones de cementación, debido a que exhiben una pobre compatibilidad interfacial con los espaciadores base agua. Esto representa un problema potencial ya que se pueden formar mezclas extremadamente viscosas y no bombeables. Una película de

aceite remanente sobre la superficie del tubo formada por el lodo, puede evitar una buena adherencia del cemento.

Uno de los aspectos más importantes que se debe cuidar durante una operación de cementación, es conseguir un excelente cambio de mojabilidad tanto en la formación como en la cara externa de la tubería de revestimiento. En pozos donde el fluido de perforación es de emulsión inversa, la adherencia del cemento hacia la formación y tubería está en función directa de la efectividad de los surfactantes adicionados al espaciador. La elección de surfactantes para espaciadores base agua, es crítica. La gran mayoría de los lodos de perforación base aceite, que actualmente se usan, están formados por cualquiera de los siguientes fluidos: diesel, aceite mineral, ésteres de aceite obtenidos de aceites olefínicos. La mezcla resultante entre espaciador y lodo varía con el tipo de lodo. La respuesta puede ser desde la formación de mezclas no bombeables, alta viscosidad, hasta el rompimiento de la emulsión del lodo. Cuando la emulsión se rompe, se presenta una separación de fluidos y precipitación de sólidos. En cambio otras mezclas pueden exhibir facilidad para su bombeo, homogeneidad, fuerte tendencia a dejar mojada en aceite la formación y superficie externa del tubo.

La selección de surfactantes está basada en una selección de alícuotas del lodo base aceite y el espaciador base agua, para encontrar una combinación de surfactantes que reduzca la viscosidad interfacial entre los fluidos base agua y base aceite, mantener la mezcla estable y homogénea, y cambiar efectivamente la mojabilidad del tubo de aceite a agua.

Actualmente se cuenta con equipos de nueva tecnología como el **Apparent Wettability Test Apparatus**, que nos permite definir con precisión y confiabilidad el tipo de surfactante y concentración de este, a usar para cualquier lodo de perforación de emulsión inversa. El principio en el que se basa este equipo para hacer la determinación es bastante simple. Normalmente, los fluidos base externa aceite no son conductores eléctricos, pero sí lo son los fluidos espaciadores base agua; de tal suerte que el equipo lo que mide es la intensidad de la carga eléctrica del espaciador. La conductividad eléctrica del espaciador dependerá de la naturaleza química de los surfactantes adicionados. Fig. 4

Programas de Cómputo

En la actualidad este es un campo en donde más se ha desarrollado en la Ingeniería de Cementaciones, estos programas nos permiten diseñar y predecir los fenómenos que se lleva a cabo durante un trabajo de cementación.

Específicamente para el caso que nos atañe, estos programas tienen la versatilidad de crear bases de datos de diferentes fluidos desplazantes con reologías a diferentes condiciones de temperatura de igual manera con diferentes fluidos de perforación con sus respectivos valores reológicos.

Una vez que se tienen estos valores, estos programas nos pueden dar los valores de erodabilidad de cada uno de los fluidos desplazantes basados en sus características reológicas es decir, podemos determinar antes de un trabajo que tan eficiente será el desplazamiento del fluido de perforación y del enjarre depositado en la pared de la formación y en la tubería de revestimiento. Esta característica nos permite diseñar desde el laboratorio las características de los fluidos desplazantes y con esto incrementar las posibilidades de éxito durante el trabajo de cementación.

Finalmente para lograr que los índices de erodabilidad alcancen valores deseados podemos mencionar los siguientes puntos:

1. Viajes periódicos de acondicionamiento para remover los residuos de geles prehidratados del fluido de perforación y su enjarre.
2. Para los fluidos de perforación que están dentro del agujero, estimar el esfuerzo de corte arriba del cual la erosión o remoción de estos fluidos se lleva a cabo. Esto puede ser llevado a cabo dependiendo de la erodabilidad del fluido de perforación.
3. Diseño de los gastos de circulación y del espaciador en los cuales el esfuerzo de corte del fluido delantero en el anular es por lo menos igual al esfuerzo de corte determinado en el punto 2.

4. Si el esfuerzo de corte no puede ser determinado, entonces se recomienda mover la tubería ó en su defecto utilizar métodos mecánico.

References

1. Porter, MC. "Contraction Polarization with Membrane Ultrafiltration," Ind. Eng. Chem., Prod Res. Dev., Vol 11, No. 3, 1972.
2. Leighton, D. and Acrivos, A. "The Shear Induced Migration of Particles Concentrated Suspensions," J. Fluid Mech., Vol 181, 1987.
3. Fordhman, E.J., Ladva, HKJ and C. Hall "Dynamic Filtration of Bentonite Muds Under Different Flow Conditions", SPE 18038 presented at the 1988 annual meeting.
4. Outmans, H.D. "Mechanics of Static And Dynamic Filtration in the Bore Hole" SPE 491
5. Ravi, Beirute, Covington. "Erodability of Partially Dehydrated Gelled Drilling Fluid and Filter Cake"

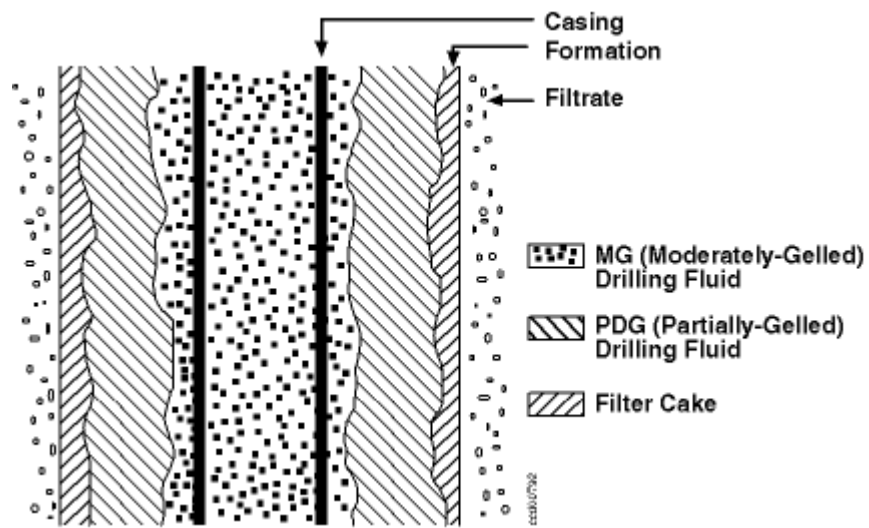


Fig. 1

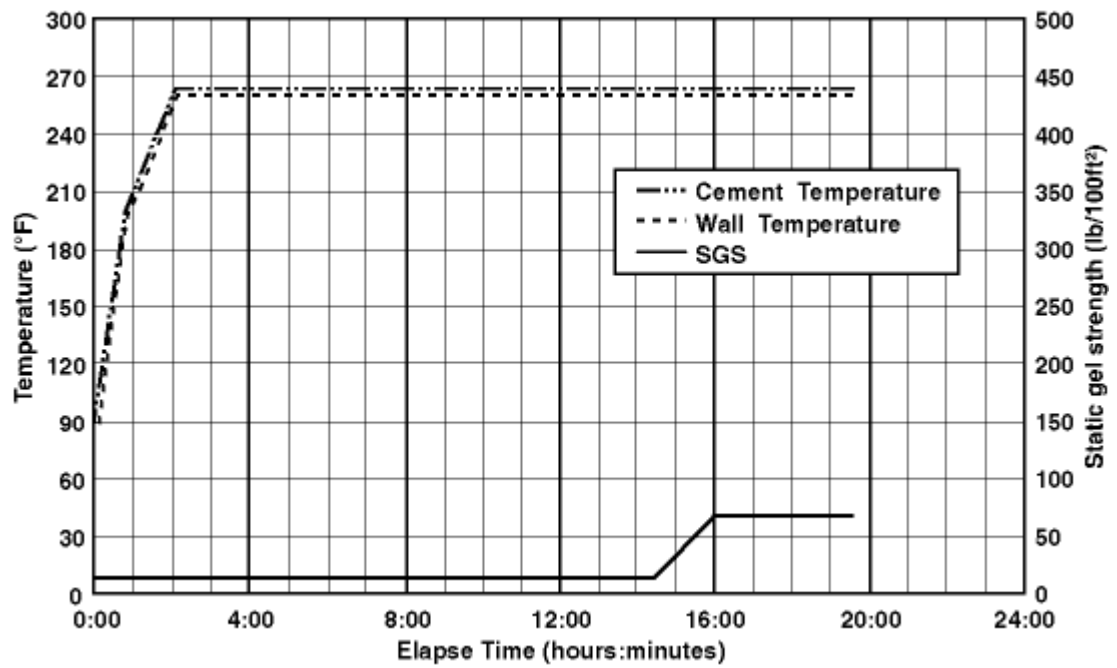


Fig. 2

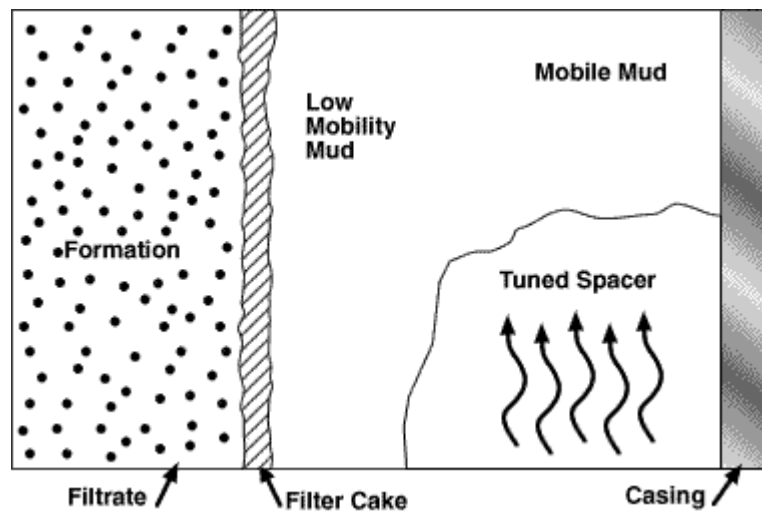


Fig. 3



Fig. 4