

Metodología para la selección de los fluidos espaciadores y limpiadores óptimos en las operaciones de cementación

Jorge Andrés Mireles Villamarín y Nicolás Alejandro Rodríguez Mota

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director:

Raúl Villamizar Durán

Ingeniero de Petróleos

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería de Petróleos  
Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

*Dedico este logro principalmente a mi madre, la cual ha estado a mi lado siempre dándome su apoyo incondicional, brindándome su conocimiento y su orientación, por ser una persona tan amorosa y paciente conmigo, de todo corazón a mi madre la cuál amo mucho*

*Dedico este logro a mi padre el cuál ha estado a la distancia apoyándome en mi carrera universitaria en todo momento, brindándome amor y acompañamiento en este proceso, muchas gracias, padre*

*A mi hermana Paola, la cuál ha sido un gran ejemplo para seguir como hermana mayor, la cual me ha dado su apoyo emocional en los momentos más difíciles de mi trayecto.*

*A mí por no rendirme y luchar hasta el final, por perseverar y llevar el camino adecuado, por darme fuerzas para seguir adelante y concluir esta etapa de mi vida*

*A mi pareja Andrea, por brindarme amor y acompañamiento durante esta etapa de mi vida, por recordarme lo que valgo y lo que sé, por no dejarme desfallecer y poder concluir con mi carrera profesional*

*A mis amigos Jorge, Sophia y Sebastián, por ayudarme a crecer como amigo y persona, por compartir momentos fuera del ámbito universitario que son necesarios para el crecimiento personal, por todas esas salidas que marcaron mi vida y por ser mis futuros colegas profesionales.*

*Muchas gracias*

***Jorge Andrés Mireles Villamarin***

### **Dedicatoria**

*A Dios por permitirme afrontar este gran reto con toda dedicación, por darme salud, paciencia y sabiduría y por permitirme estar rodeado de grandes personas.*

*A mi papá por darme un apoyo constante en cada decisión que tomo, por ser esa persona que siempre está alentándome a ser alguien en la vida, por siempre estar presente en cada decisión que tomo y por ser ese gran ejemplo de quien siempre puede guiarme.*

*A mi mamá por ser siempre una persona llena de amor y comprensión, por siempre estar presente en cada uno de los momentos de mi vida, por demostrarme constantemente que la vida está llena de decisiones difíciles y que solo las voluntades fuertes permiten salir adelante y por siempre inculcarme valores de respeto y responsabilidad para cada cosa que haga en mi vida.*

*A mi hermano, un gran amigo y una de las grandes razones por las que cada día me levanto para salir adelante.*

*A mi primo Sebastián Cabas por ser siempre ese apoyo emocional durante la mayor parte de mi vida universitaria, por ser mi confidente, mi amigo y una persona con la que sé que puedo confiar toda mi vida.*

*A toda mi familia por siempre apoyarme, ayudarme y estar presente en los momentos más importantes.*

*A mis amigos y compañeros de la universidad, Danna Noguera, Margarita Flórez, Gean Franco Zuleta, Edwar Sequeda y muchos más que no nombré, por brindarme su amistad y estar a mi lado durante este proceso.*

*Y a todas aquellas personas que han hecho parte de mi vida que siempre han estado presentes y brindándome su apoyo.*

*Muchas gracias.*

***Nicolas Alejandro Rodríguez Motta***

### **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento:

A nuestras familias, por darnos apoyo incondicional y motivarnos en cada paso que dimos durante este proyecto, por apoyarnos económica y emocionalmente, por estar presentes en cada momento durante toda nuestra carrera universitaria e incentivándonos cada día a ser mejores personas y profesionales.

A nuestros compañeros y amigos, por brindarnos su amistad y su colaboración durante estos años que estuvimos juntos en la universidad y por su apoyo y motivación durante el desarrollo de este proyecto.

A la escuela de Ingeniería de Petróleos, por permitirnos estudiar en un ambiente propicio para poder desarrollar los conocimientos adecuados para desarrollar este proyecto y permitirnos conocer personas que nos acompañaron y acompañaran durante mucho tiempo.

Al ingeniero Raúl Villamizar, por guiarnos durante el desarrollo este proyecto, por estar pendiente en cada momento en que lo necesitamos y por brindarnos sus conocimientos y experiencia profesional durante todo el proceso.

A la Universidad Industrial de Santander, por darnos un espacio en su alma mater y brindarnos las herramientas y la formación necesarias para poder llevar a cabo este proyecto y poder afrontar nuestro futuro como ingenieros de petróleo íntegros.

**Tabla de Contenido**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Introducción .....                                      | 12          |
| 1. Objetivos.....                                       | 14          |
| 1.1. Objetivos General.....                             | 14          |
| 2. Generalidades del completamiento de pozos.....       | 15          |
| 2.1. Cementación .....                                  | 15          |
| 2.2. Fluido de perforación .....                        | 15          |
| 2.2.1. Funciones del fluido de perforación.....         | 16          |
| 2.2.2. Clasificación de los fluidos de perforación..... | 16          |
| 2.2.2.1. Fluidos base agua.....                         | 17          |
| 2.2.2.2. Fluidos base aceite.....                       | 17          |
| 2.2.3. Aditivos usados en fluidos de perforación .....  | 18          |
| 2.2.3.1. Densificantes.....                             | 18          |
| 2.2.3.2. Viscosificantes .....                          | 19          |
| 2.2.3.3. Surfactantes.....                              | 19          |
| 2.2.3.4. Adelgazantes.....                              | 20          |
| 2.3. Lechadas de cemento.....                           | 21          |
| 2.3.1. Lechada Inicial.....                             | 21          |
| 2.3.2. Lechada de Cola.....                             | 21          |
| 2.3.3. Aditivos usados en la lechada de cemento.....    | 22          |
| 2.4. Revoque o torta.....                               | 22          |

|  |    |
|--|----|
| 3. Propiedades de los fluidos limpiadores y espaciadores. .... | 23 |
| 3.1. Fluido espaciador.....                                    | 25 |
| 3.1.1. Viscosificantes .....                                   | 26 |
| 3.1.1.1. Polímeros Solubles en Agua.....                       | 26 |
| 3.1.1.2. Arcillas.....   | 30 |
| 3.1.2. Densificantes.....                                      | 33 |
| 3.1.3. Surfactantes y Dispersantes.....                        | 37 |
| 3.2. Fluido limpiador.....                                     | 37 |
| 3.2.1. Dispersantes .....                                      | 38 |
| 3.2.2. Surfactantes.....                                       | 41 |
| 3.2.2.1. Clasificación de los surfactantes.....                | 42 |
| 3.3. Viscosidad.....   | 47 |
| 3.4. Densidad.....   | 48 |
| 3.5. Reología.....   | 49 |
| 3.6. Punto de cedencia.....                                    | 50 |
| 3.7. Temperatura.....  | 51 |
| 3.8. Número de Reynolds.....                                   | 51 |
| 3.9. Nanotecnología en los limpiadores y espaciadores.....     | 52 |
| 4. Problemáticas durante la limpieza.....                      | 53 |
| 4.1. Incompatibilidad.....                                     | 55 |
| 4.2. Reología Inadecuada.....                                  | 57 |
| 4.3. Densidad Inadecuada.....                                  | 58 |
| 4.4. Química inadecuada.....                                   | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 4.5. Daño a la formación. ....   | 59 |
| 5. Metodología para seleccionar los fluidos espaciadores y limpiadores. .... | 60 |
| 5.1. Guía de limpieza. ....  | 60 |
| 5.2. Primera fase. ....  | 62 |
| 5.3. Segunda fase. ....  | 64 |
| 5.4. Tercera fase ....   | 66 |
| 6. Conclusiones. ....  | 69 |
| 7. Recomendaciones. ....   | 71 |
| Bibliografía. ....   | 72 |

**Lista de Tablas**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Tabla 1. Clasificación HLB .....                      | 43          |
| Tabla 2. Efectividad de los Aditivos.....             | 45          |
| Tabla 3. Selección del Fluido Espaciador Inicial..... | 63          |
| Tabla 4. Selección del Fluido Limpiador.....          | 66          |
| Tabla 5. Selección del Fluido Espaciador Final.....   | 68          |

**Lista de Imágenes**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 1. Proceso de Cementación.....                  | 25          |
| Figura 2. Goma Xantana.....                            | 28          |
| Figura 3. Goma Welan.....                              | 29          |
| Figura 4. Goma Diutan.....                             | 30          |
| Figura 5. Bentonita.....                               | 31          |
| Figura 6. Atapulgita.....                              | 31          |
| Figura 7. Caolinita.....                               | 32          |
| Figura 8. Sepiolita.....                               | 33          |
| Figura 9. Carbonato de Calcio.....                     | 34          |
| Figura 10. Barita.....                                 | 35          |
| Figura 11. Hematita.....                               | 36          |
| Figura 12. Ilmenita.....                               | 37          |
| Figura 13. Sulfonato de Polinaftaleno.....             | 39          |
| Figura 14. Lignosulfonatos.....                        | 40          |
| Figura 15. Tanatos.....                                | 41          |
| Figura 16. Monobutilico de Etilenglicol.....           | 42          |
| Figura 17. Sales grasas de Amonio del Cuaternario..... | 43          |
| Figura 18. Glucósidos de Alquilo.....                  | 44          |
| Figura 19. Registro CEL.....                           | 55          |
| Figura 20. Guía de Limpieza.....                       | 61          |
| Figura 21. Primera Fase.....                           | 62          |
| Figura 22. Segunda Fase.....                           | 65          |
| Figura 23. Tercera Fase.....                           | 67          |

## Resumen

**Título:** Metodología para la selección de los fluidos espaciadores y limpiadores óptimos en las operaciones de cementación \*

**Autor:** Jorge Andrés Mireles Villamarín y Nicolás Alejandro Rodríguez Motta \*\*

**Palabras Clave:** Cementación, Surfactante, Dispersantes, Viscosificantes, Densificantes.

### Descripción:

El presente trabajo inicia con una introducción, en la cual se encuentra un análisis sobre la industria petrolera que sirve de fundamento para su desarrollo; se encuentra la idea general, como lo es el desarrollo de una metodología óptima para la selección de fluidos limpiadores y espaciadores, el cómo se divide en diversas fases y como aplicar dicha información en operaciones de cementación.

El primer paso para poder desarrollar la metodología es tener un conocimiento sobre los fluidos que se usan en la perforación, por lo cual, se revisan sus generalidades, estudiando las características de estos fluidos como lo son su densidad, su viscosidad y los aditivos. Gracias a esta información se puede tener un conocimiento más amplio de los fluidos limpiadores y espaciadores que se usan en la cementación, que servirá para el desarrollo y entendimiento de las distintas fases que ayudaran a una correcta selección de los fluidos.

Para poder seleccionar correctamente los fluidos primero debemos conocerlos, por lo tanto, en el presente proyecto se hace una investigación detallada de las propiedades más importantes, esta información es esencial a la hora del desarrollo de las fases para la correcta selección, con este conocimiento se procede a hablar de las problemáticas que pueden llegar a suceder en una operación de cementación, así como también, indicar como actuar frente a estas situaciones.

El siguiente y último ítem es el desarrollo de la metodología para la correcta selección de los fluidos, la cual se divide en 3 fases, en la primera fase se revisan los químicos usados para los fluidos espaciadores con sus respectivas propiedades y mejores compatibilidades según el lodo de perforación; en la segunda fase se analizará lo mismo que en la anterior pero con los químicos usados para el fluido limpiador; la tercera fase es análoga a la primera, teniendo en cuenta que el espaciador es menos complejo y que se hará el análisis con base a la lechada de cemento, y por último se puede encontrar una tabla con cada aditivo y las condiciones adecuadas para usarlos, teniendo en cuenta las diferentes propiedades del pozo.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingeniería fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Raúl Villamizar Durán. Ingeniero de Petróleos

### Abstract

**Title:** Methodology for selecting optimal spacer and cleaner fluids in cementing operations. \*

**Author (s):** Jorge Andrés Mireles Villamarín and Nicolás Alejandro Rodríguez Motta\*\*

**Key Words:** Cementing, Surfactant, Dispersant, Viscosifiers, Densifiers.

### Description:

The present work begins with an introduction, in which there is an analysis of the oil industry that serves as the basis for its development; The general idea is found, such as the development of an optimal methodology for the selection of cleaning and spacer fluids, how it is divided into different phases and how to apply said information in cementing operations.

The first step to be able to develop the methodology is to have knowledge about the fluids used in drilling, for which their generalities are reviewed, studying the characteristics of these fluids such as their density, viscosity and additives. Thanks to this information, it is possible to have a broader knowledge of the cleaning and spacer fluids used in cementation, which will serve for the development and understanding of the different phases that will help a correct selection of fluids.

In order to correctly select the fluids, we must first know them, therefore, in this project a detailed investigation of the most important properties is made, this information is essential when developing the phases for the correct selection, with this knowledge proceeds to talk about the problems that can happen in a cementing operation, as well as indicating how to act in these situations.

The next and last item is the development of the methodology for the correct selection of fluids, which is divided into 3 phases. In the first phase, the chemicals used for the spacer fluids are reviewed with their respective properties and best compatibilities according to the mud. drilling; in the second phase, the same as in the previous phase will be analyzed, but with the chemicals used for the cleaning fluid; the third phase is analogous to the first, taking into account that the spacer is less complex and that the analysis will be done based on the cement grout, and finally a table can be found with each additive and the appropriate conditions to use them, taking into account the different properties of the well.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineers. Petroleum Engineer School. Director: Raúl Villamizar Durán. Petroleum Engineer.

### **Introducción**

En la actualidad de la industria petrolera, el proceso de cementación es de vital importancia en el momento del desarrollo de un pozo petrolífero, dentro de esta operación encontramos un punto característico y clave a la hora de llevarla a cabo: la adecuación del pozo posterior a la perforación; este es un proceso al que se le resta importancia sin tener en cuenta que es de las partes más importantes y decisivas a la hora de cementar, puesto que es un paso que nos permitirá controlar y evitar futuros problemas con el cemento y/o la formación. Para adecuar de manera correcta el pozo se deben utilizar dos fluidos principales, los cuales son limpiadores y espaciadores.

Este trabajo se realiza con el fin de desarrollar una metodología óptima para la selección y utilización de fluidos espaciadores y limpiadores para la correcta adecuación de los pozos en procesos de cementación, la necesidad de esta metodología surge en el momento de entender la importancia de dichos fluidos. Los espaciadores, tienen la función principal de evitar la contaminación del cemento con el fluido de perforación y arrastrar el fluido de perforación hasta la superficie, mientras que los limpiadores son los encargos de remover la torta y mejorar la humectabilidad para que el cemento pueda adherirse correctamente.

Con el fin de desarrollar una buena metodología se realizarán diversas fases, inicialmente se llevará a cabo una investigación para determinar las propiedades más importantes de los fluidos espaciadores y limpiadores, posteriormente se realizará una caracterización de dichas propiedades para luego proceder a seleccionar las que más impacto tienen durante las operaciones de cementación, y por último, a partir del análisis de las propiedades evaluadas anteriormente, se desarrollará una metodología para la optimización de la limpieza en el proceso de cementación. El

trabajo está pensado para desarrollar una metodología que pueda evitar futuros problemas y sobre costos en los pozos petrolíferos.

La metodología está pensada para poder ser aplicada en cualquier campo sin ser necesariamente muy específica para problemas relativos a cada uno de estos, ya que resulta imposible desarrollar un método específico para solucionar cada problema de cada uno de los campos.

## **1. Objetivos.**

### **1.1. Objetivos General.**

Desarrollar una metodología para seleccionar los fluidos espaciadores y limpiadores para optimizar las operaciones de limpieza en la cementación.

### **1.2. Objetivo Específico.**

- Revisar e identificar las fuentes bibliográficas que traten sobre los fluidos limpiadores y espaciadores usados en las operaciones previas a la cementación.
- Identificar las propiedades de los fluidos espaciadores y limpiadores.
- Categorizar las problemáticas durante la limpieza en operaciones de cementación.
- Plantear una metodología para seleccionar los fluidos espaciadores y limpiadores en las operaciones de cementación.

## 2. Generalidades del completamiento de pozos

### 2.1. Cementación

Es un proceso que consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua, para formar una mezcla conocida como lechada, esta se bombea al pozo a través de la sarta de revestimiento y se ubica en el espacio anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor. (Nelson & Guillot, 2006).

Según (Nelson y Guillot, 2006) la cementación de los pozos petroleros consiste en dos operaciones principales:

- **Cementación primaria.** La cual consiste en la colocación de una lechada de cemento en el espacio anular existente entre la tubería de revestimiento y la formación.
- **Cementación con fines de remediación (secundaria).** Esta tiene lugar después de la cementación primaria. Consiste en inyectar cemento en posiciones estratégicas dentro del pozo, ya sea para la reparación del pozo o su abandono.

### 2.2. Fluido de perforación

El fluido de perforación o lodo como comúnmente se le llama, puede ser cualquier sustancia o mezcla de sustancias con características físicas y químicas apropiadas, como, por ejemplo: aire o gas, agua, petróleo o combinaciones de agua y aceite con determinado porcentaje de sólidos.

El fluido no debe ser tóxico, corrosivo, ni inflamable, pero sí inerte a las contaminaciones de sales solubles o minerales y estable a las altas temperaturas, también, debe mantener sus

propiedades según las exigencias de las operaciones y, además, debe ser inmune al desarrollo de bacterias, también (Rabia, 2001) menciona las funciones del fluido de perforación, como se muestra a continuación..

### ***2.2.1. Funciones del fluido de perforación***

- Retirar los recortes del fondo del pozo, transportarlos y liberarlos en la superficie.
- Enfriar y lubricar la broca y la sarta de perforación.
- Depositar un revoque (cake) de pared impermeable.
- Controlar las presiones del subsuelo.
- Sostener los recortes y el material pesado en suspensión cuando se detenga la circulación.
- Soportar parte del peso de las sargas de perforación y de revestimiento.
- Evitar daños de permeabilidad en la zona productiva.
- Permitir la obtención de información de las formaciones perforadas.
- Transmitir caballaje hidráulico a la broca.
- Proteger la sarta de perforación contra la corrosión.

### ***2.2.2. Clasificación de los fluidos de perforación***

Según (Rabia, 2001) antes de conocer la clasificación de los fluidos de perforación, es necesario saber cuáles con los principales factores que determinan la selección de estos fluidos, dichos factores se mencionan a continuación:

1. Tipos de formaciones a ser perforadas.
2. Rango de temperaturas, esfuerzos, permeabilidad y presiones exhibidas por las formaciones.

3. Procedimiento de evaluación de formaciones usado.
4. Calidad de agua disponible.
5. Consideraciones ecológicas y ambientales.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, (Rabia, 2001) menciona que los fluidos de perforación se pueden clasificar en dos tipos:

#### **2.2.2.1. Fluidos base agua.**

- Consisten en la mezcla de agua con sólidos, líquidos y químicos, siendo el agua la fase continua.
- Algunos de los sólidos reaccionan con el agua y químicos disueltos, por lo tanto, son llamados ‘sólidos reactivos’. La mayoría de estos son arcillas hidratables.
- Los químicos agregados al lodo restringen la actividad de estos, permitiendo que ciertas propiedades del fluido de perforación se mantengan dentro de límites deseados.
- Los otros sólidos presentes en un lodo de perforación que no reaccionan con el agua y químicos de manera significativa son conocidos como ‘sólidos inertes’.
- Cualquier aceite que se agregue a un lodo base agua, será emulsificado dentro de esta, manteniéndose como pequeñas y discontinuas gotas (emulsión aceite en agua).

#### **2.2.2.2. Fluidos base aceite.**

- Son similares en composición a los lodos base agua, excepto que la fase continua es aceite en lugar de agua, y en este caso, son las gotas de agua quienes se encontrarán emulsificadas en el aceite.

- Otra diferencia importante es que todos los sólidos son considerados inertes, debido a que no reaccionan con el aceite.
- Evitan la corrosión a la broca y la sarta.
- Evitan problemas de arcillas sensibles.
- Desventaja: alto costo inicial y mantenimiento.

### ***2.2.3. Aditivos usados en fluidos de perforación***

Existen muchos aditivos para fluidos de perforación que se utilizan para desarrollar las propiedades clave del lodo.

Según lo planteado por (Rabia, 2001) la variedad de aditivos para fluidos refleja la complejidad de los sistemas de lodo actualmente en uso. La complejidad también aumenta diariamente a medida que se encuentran condiciones de perforación más difíciles y desafiantes.

#### **2.2.3.1. Densificantes**

De acuerdo con lo mencionado por (Rabia, 2001) los materiales densificantes o densificadores son materiales sólidos que, cuando se suspenden o disuelven en agua, aumentan el peso del lodo. La mayoría de los materiales densificantes son insolubles y requieren viscosificantes para poder suspenderlos en un fluido.

Dentro de la variedad de densificantes existentes, la barita es el más común, con una gravedad específica mínima de 4,20 g/cm<sup>3</sup>. Al estar suspendidos en el fluido, los agentes densificantes proporcionan presión hidrostática para balancear las presiones en el fondo del pozo.

### **2.2.3.2. Viscosificantes**

Teniendo en cuenta lo descrito por (Rabia, 2001), la capacidad del lodo de perforación para mantener suspendidos los recortes de perforación y los materiales densificantes, depende completamente de su viscosidad, sin esta todo el material densificante y los recortes de perforación se depositarían en el fondo del pozo tan pronto como se detuviera la circulación. Se puede pensar en la viscosidad como una estructura construida dentro de la fase de agua o aceite que suspende el material sólido.

En la práctica, existen muchos sólidos que se pueden utilizar para aumentar la viscosidad del agua o del aceite, cuyos efectos se pueden sentir por el incremento en la resistencia al flujo de los fluidos. En la perforación, esto se manifiesta por mayores pérdidas de presión en el sistema de circulación.

### **2.2.3.3. Surfactantes.**

Una sustancia química que se adsorbe preferentemente en una interfaz, disminuyendo la tensión superficial o la tensión interfacial entre los fluidos o entre un fluido y un sólido. Este término abarca una multitud de materiales que funcionan como emulsionantes, dispersantes, mojantes del petróleo, mojantes del agua, espumantes y antiespumantes. El tipo de comportamiento del surfactante depende de los grupos estructurales en la molécula (o mezcla de moléculas). El número de balance hidrófilo-lipófilo (HLB) ayuda a definir la función que tendrá un grupo molecular (Shlumberger, 1998).

(Norma & Trombetta, 2007) indican que los surfactantes cuentan con las siguientes propiedades fundamentales:

- **Adsorción.** Causado por la disminución de energía libre del surfactante, gracias a la ubicación del surfactante en la interfase y satisfacer su doble afinidad polar-no polar-
- **Asociación.** Cuando se añade más surfactante a una solución acuosa ocurre este fenómeno, gracias a los efectos hidrofóbicos.

Adicionalmente (Shlumberger, 1998) indican que gracias a estas propiedades los surfactantes tienen diversas aplicaciones y usos, como por ejemplo la capacidad de adsorberse a las interfases y su tendencia a asociarse para formar estructuras organizadas.

#### **2.2.3.3.1. Clasificación de los surfactantes.**

La presencia de grupos formalmente cargados en sus cabezas o grupos polares, nos ayudan a clasificarlos, por ejemplo, los NO iónicos no tienen grupos con carga en sus cabezas y la cabeza de un iónico sí lleva una carga neta, aunque es necesario tener en cuenta que si la carga en la cabeza es negativa se convierte en aniónico y si es positiva entonces será catiónico.

- Aniónicos.
- Cationicos.
- Anfotéticos.
- No iónicos.

#### **2.2.3.4. Adelgazantes.**

(Norma & Guillot. 2006) indican que el objetivo fundamental de los adelgazantes es el de reducir la viscosidad del lodo. En la industria, los adelgazantes que sobresalen por su extenso uso son los fosfatos-pirofosfato ácido de sodio (SAPP), Hexametafosfato de sodio (SHMP) y el fosfato tetrasódico (TSPP). Como ejemplo para cada uno de los adelgazantes antes mencionados, se tienen los extractos de quebrachos y de abeto para los tanatos, los ácidos húmicos y demás lignitos

modificados con compuestos básicos para los lignitos, y de los lignosulfonatos pueden ser los de sodio y calcio.

Los fosfatos se degradan térmicamente a los 150°F aproximadamente, los tanatos y los lignosulfonatos resisten temperaturas hasta de unos 250°F y los lignitos son estables hasta por encima de los 400°F, situación que los hace recomendables para control de las características en lodos sometidos a altas temperaturas.

### 2.3. Lechadas de cemento

Según lo descrito por (Álvarez & Márquez, 2016) la lechada de cementación se forma combinando cemento seco, agua y los aditivos necesarios en un mezclador. Este proceso puede realizarse de forma continua o por baches. El fluido de mezcla (agua más los aditivos del cemento) puede prepararse antes o durante, mediante un sistema de aditivos líquidos. En algunas locaciones, los aditivos se mezclan en seco con el cemento.

(Álvarez & Márquez, 2016) indican que según el tipo de lechada y el momento de la cementación en la que se bombea, existen dos tipos:

2.3.1. **Lechada Inicial.** Es un tipo de lechada de baja densidad y alto rendimiento diseñada para llenar y cubrir la sección superior del anular. Este material se bombea después del lavador y el espaciador y antes de la lechada de cola. Su densidad es superior a la del fluido de perforación y menor que la lechada de cola.

2.3.2. **Lechada de Cola.** Es una lechada de mayor densidad, diseñada para cubrir la sección inferior del anular desde el fondo del agujero. Normalmente, la lechada de cola presenta unas propiedades superiores a las de la lechada inicial. Es esencial que la lechada de cementación tenga la densidad correcta para que sus propiedades sean las deseadas.

### 2.3.3. *Aditivos usados en la lechada de cemento*

(Rabia, 2001) describe que los aditivos modifican el comportamiento de la lechada de cemento, lo que permite su colocación en una amplia gama de condiciones de fondo de pozo. Hay más de 100 aditivos para cemento disponibles y estos se pueden clasificar en una de las siguientes categorías:

- **Aceleradores:** Productos químicos que reducen el tiempo de espesamiento de una lechada y aumentan la tasa de desarrollo de resistencia inicial.
- **Retardantes:** Productos químicos que prolongan el tiempo de espesamiento de una lechada para ayudar a la colocación del cemento.
- **Extendedores:** Materiales que disminuyen la densidad de la lechada y aumentan el rendimiento.
- **Agentes Densificantes:** Materiales que aumentan la densidad de la lechada.
- **Dispersantes:** Productos químicos que reducen la viscosidad de la lechada y también pueden aumentar el agua libre.
- **Aditivos para pérdida de fluidos:** Materiales que evitan la deshidratación de la lechada y reducen la pérdida de fluidos hacia la formación.
- **Agentes de control de pérdida de circulación:** Materiales que controlan la pérdida de lechada de cemento hacia formaciones débiles o fracturadas.

## 2.4. **Revoque o torta**

El Revoque o torta se forma cuando la porción sólida insoluble de la suspensión líquida se deposita sobre un material permeable a medida que la suspensión entra en contacto con ese material bajo presión. Así es como se forma la torta de filtrado: Inicialmente, cuando ésta se

deposita sobre la superficie del material permeable, el material primero sirve como filtro y permite que las porciones de líquido (filtrado) pasen y atrapen la parte sólida insoluble como una torta.

La formación del revoque evita una mayor pérdida de fluido de perforación en la formación y ayuda a minimizar la invasión de sólidos. En otras palabras, la torta de filtración ayuda a prevenir la pérdida de la circulación y el daño de la formación a través de los sólidos finos y la invasión del filtrado a las rocas del yacimiento.

La estructura del revoque formado para el lodo base aceite es diferente de la formada por el lodo base agua. Para el lodo a base de aceite, además de la deposición sólida insoluble, también se formarán gotas de agua que están presentes en la fase dispersa en el aceite en las gargantas de poros de la torta del filtro.

Pero si la presión de equilibrio del fluido de perforación llega a ser más alta que la presión capilar necesaria para forzar las gotas de agua a través de los poros, entonces estas serán forzadas a través de los poros de la torta del filtro dejando solo la capa sólida (Perfoblogger, 2020).

### **3. Propiedades de los fluidos limpiadores y espaciadores.**

Según (Nelson & Guillot, 2006) la cementación después de la perforación de una zona es uno de los procesos más importantes en el completamiento de pozos, su buena realización nos dará una vida útil del pozo más amplia; lo que se traduce en mayor rentabilidad para la empresa encargada. La correcta cementación permite tener una mayor estabilidad del pozo evitando colapsos de este, prevenir la intrusión de fluidos lo cual causaría un daño en la cementación y el correcto aislamiento de zonas requeridas como por ejemplo acuíferos o formaciones problemáticas; para garantizar la correcta cementación se usan los fluidos conocidos como espaciador y limpiador durante el proceso visto en la Figura 1.

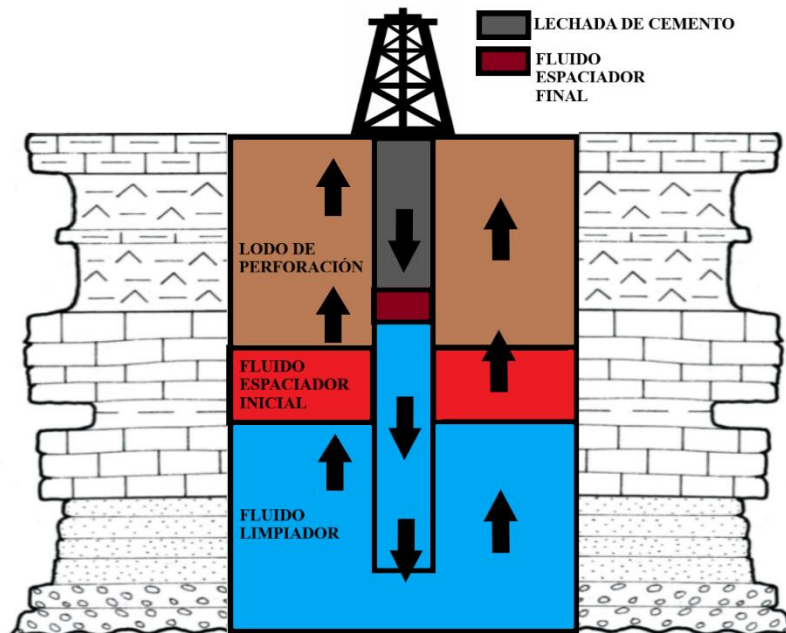
El fluido espaciador inicial tiene como objetivo principal evitar que los fluidos de perforación y la lechada de cemento se mezclen, para así evitar la contaminación de esta al entrar en contacto con sustancias usadas en el lodo, son fluidos que no necesariamente deben caer en un régimen turbulento, se pueden usar propiedades de viscosidad y densidad para asegurar un correcto desplazamiento en flujo laminar.

El espaciador final se usa para desplazar los fluidos restantes en la formación garantizando un correcto avance de la lechada por el espacio anular de la formación, además de prevenir una contaminación de la lechada de cemento generada por cualquier agente externo, actuando como un separador entre el fluido limpiador y la lechada de cemento antes de entrar en acción la misma.

Los limpiadores arrastran y remueven los residuos de los fluidos de perforación como el cake en la cara de la formación que los han precedido en los procesos de bombeo, además de esto tienen la función de humectar esta misma para una correcta adherencia de la lechada de cemento, estos fluidos pueden ser tan simples como agua ordinaria o pueden contener agentes químicos para darle propiedades especiales y mejorar su efectividad. Los limpiadores se diferencian de los espaciadores en que estos normalmente diluyen el fluido de perforación y lo remueven a través de condiciones altas de flujo turbulento

Aun así, como diferencia primordial entre los espaciadores y limpiadores, es posible mencionar que los primeros están diseñados con un punto de cedencia específico que le permite incorporar materiales densificantes y controladores de pérdida de circulación, también cabe resaltar el hecho de que los espaciadores son más complejos a nivel químico que los limpiadores (Nelson & Guillot, 2006).

Figura 1. Proceso de Cementación



*Nota.* Elaboración propia

### 3.1. Fluido espaciador.

Un fluido espaciador es cualquier líquido utilizado para separar físicamente un líquido con una función especial de otro. Los líquidos con funciones especiales tienden a contaminarse, por lo que entre ellos se utiliza un fluido espaciador compatible con cada uno, con densidades y propiedades reológicas cuidadosamente diseñadas (Shlumberger, 1998). Estos fluidos se ubican entre el fluido de perforación y el fluido limpiador, o, entre el fluido limpiador y la lechada de cemento, esto depende del fluido espaciador que se vaya a trabajar, ya sea durante una cementación primaria o secundaria, con el fin de eliminar completamente los fluidos de perforación del anular antes de inyectar la lechada de cemento o para retirar el fluido limpiador. Un espaciador puede ser diseñado para usarse con lodos de base agua o aceite, como por ejemplo una lechada de cemento

con baja densidad y tasa de pérdida de flujo; se usan para dejar preparado el pozo y la formación para efectuar la operación de cementación.

El espaciador es un fluido pseudoplástico con un perfil de tensión de corte relativamente plano en un amplio rango de velocidad de corte, Un perfil de esfuerzo cortante casi constante produce una distribución más uniforme de la fuerza hidráulica que incide sobre las superficies del pozo, lo que mejora la eliminación del lodo de perforación y los sólidos parcialmente deshidratados o gelificados del pozo.

Los espaciadores son fluidos con una densidad relativamente alta, dependiendo del tipo de espaciador que se vaya a trabajar, en caso de ser el primer espaciador, varía en función del lodo de perforación, pues este debe cumplir una función de desplazamiento, por lo cual generalmente suelen fluir en régimen laminar, sin embargo, si se tiene en cuenta que la complejidad de estos fluidos radica en que sus propiedades reológicas dependen de muchos factores como concentración del viscosificante, densificante, temperatura y fluido base, se puede cambiar su régimen de flujo a uno turbulento disminuyendo su viscosidad sin alterar su estabilidad (Nelson & Guillot, 2006).

### ***3.1.1. Viscosificantes***

(Nelson & Guillot, 2006) describen que los fluidos espaciadores necesitan de viscosificantes para controlar las propiedades reológicas y suspender partículas, los viscosificantes se pueden dividir en: arcillas y polímeros solubles en agua.

#### **3.1.1.1. Polímeros Solubles en Agua**

- **Poliacrilamidas.** Polímero con un elevado peso molecular. La unidad de repetición básica o monómero de poliacrilamida es una combinación de carbono, hidrógeno,

oxígeno y nitrógeno. Las poliacrilamidas aumentan la viscosidad de los bolsones de agua que preceden a la inyección final de agua y son usados frecuentemente como reductores de movilidad en operaciones de inundación con polímeros micelares (Nelson & Guillot, 2006).

- **Guar y derivados del Guar.** El Guar se usa principalmente para espesar soluciones acuosas y para controlar la movilidad de materiales dispersados o disueltos. La característica del Guar como fijador de agua, la hace ideal como agente de hidratación rápida en la formación de soluciones coloidales viscosas, además es versátil como espesante o modificador de viscosidad (Nelson & Guillot, 2006).
- **Goma Xantana (Biopolímero).** Es de un polvo color crema, evidenciado en la Figura 2, que se disuelve en agua caliente o fría produciendo soluciones de viscosidad relativamente alta a concentraciones bajas. La viscosidad es alta en un amplio intervalo de concentraciones y las soluciones son estables en un amplio rango de 2.5 a 11 pH, concentración de sales y temperaturas, estas características son muy favorables para la economía de operaciones donde se la usa como espesante (Nelson & Guillot, 2006).

**Figura 2. Goma Xantana**

*Nota.* Tomado de Chocosolutions. (s.f). *Goma Xanthan (xantana)* [Imagen].  
<https://chocosolutions.com/products/goma-xanthan-xantana>.

- **Escleroglucano (Biopolímero).** El escleroglucano es un exopolisacárido (EPS) de estructura triple helical, cuyas propiedades fisicoquímicas lo convierten en un atractivo para diferentes industrias. Su aplicación inicial fue en la recuperación de aceite donde mostro mayor eficiencia y estabilidad que el xantano, también se utilizó para espesar lodos de perforación y fluidos de completamiento (Nelson & Guillot, 2006).
- **Goma Welan (Biopolímero).** La goma de Welan es un polisacárido aniónico con excelente estabilidad térmica y retención de viscosidad a altas temperaturas, esta goma también presenta una estabilidad de temperatura superior a 200 ° F en agua dulce y fluidos de bajo pH. Es un polvo seco de color bronceado, mostrado en la Figura 3, con una densidad de 26,25 lbs/ft<sup>3</sup> y se utiliza en varias industrias donde los biopolímeros de alto peso molecular son útiles.

El biopolímero de goma de welan es un viscosificante pseudoplástico de alta eficiencia y un agente de suspensión que se utiliza en perforaciones a base de agua, controles y fluidos de completamiento (Nelson & Guillot, 2006).

**Figura 3. Goma Welan**



*Nota.* Tomado de Qingdao Oceanview Chemical Co., Ltd. (s.f). *Construcción material aditivo welan Goma*  
[Imagen]. Alibaba.com. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/construction-material-additive-welan-gum-1912914407.html>

- **Goma Diutan (Biopolímero).** Esta goma soluble en agua recientemente introducida, útil en espaciadores, es un polímero biofermentado obtenido de una cepa bacteriana natural del género *Sphingomonas*, es un viscosificante más eficiente que la goma welan o la goma xantana y es estable a temperaturas más altas (Nelson & Guillot, 2006), este compuesto es mostrado en la Figura 4,

**Figura 4. Goma Diutan**

*Nota.* Tomado de Xiamen Ditai Chemicals Co., Ltd. (s.f). *Alta calidad de goma de mascar Diutan con precio competitivo* [Imagen]. Made-in-China, Conecting buyers with Chinese suppliers. [https://es.made-in-china.com/co\\_ditaichem/product\\_High-Quality-of-Diutan-Gum-with-Competitive-Price\\_rhnsiugg.html](https://es.made-in-china.com/co_ditaichem/product_High-Quality-of-Diutan-Gum-with-Competitive-Price_rhnsiugg.html)

### 3.1.1.2. Arcillas

- **Bentonita.** Es una arcilla muy pegajosa con un alto grado de encogimiento (los enlaces entre las capas unitarias permiten la entrada de una cantidad superior de agua que en la caolinita) y tiene tendencia a fracturarse durante la cocción y el enfriado, por ese motivo no conviene trabajarla sola o como materia predominante de una masa (Shlumberger, 1998), este compuesto es mostrado en la Figura 5.

**Figura 5. Bentonita**

*Nota.* Tomado de Geologiaweb. (s.f). *Bentonita: Tipos, propiedades, características y usos* [Imagen].  
<https://geologiaweb.com/minerales/bentonita/>

- **Atapulgita.** Mineral de arcilla acicular compuesto por silicato de magnesio-aluminio mostrado en la Figura 6. La Atapulgita puede utilizarse en lodos a base de agua salada para tener una viscosidad con baja velocidad de corte para la elevación de los recortes de perforación del espacio anular y para la suspensión de la barita (Shlumberger, 1998).

**Figura 6. Atapulgita**

*Nota.* Tomado de Absoal. (s.f). *Atapulgita Mineral Plus* [imagen]. <https://absoal.es/ficha-de-productos/atapulgita-mineral-plus/>

- **Caolinita.** Mineral de la arcilla y constituyente primario del caolín mostrado en la Figura 7. La caolinita es un mineral rico en alúmina, de baja capacidad de intercambio catiónico y bajo potencial de expansión. Es una arcilla común de dos capas que no se hincha cuando se expone al agua. La caolinita se utiliza para fabricar papel, cerámica y ladrillos, existe en forma natural en la lutita y la arcilita y, por lo tanto, es un componente común de los sólidos de perforación en los lodos (Shlumberger, 1998).

**Figura 7. Caolinita**



*Nota.* Tomado de Geologiaweb. (s.f). *Caolinita: Propiedades, características y usos* [Imagen]. <https://geologiaweb.com/minerales/caolinita/>

- **Sepiolita.** Mineral de arcilla de estructura larga y delgada, como la de una aguja, similar a la atapulgita. Contiene una mezcla de materiales fibrosos y amorfos parecidos a la arcilla (Shlumberger, 1998), este compuesto se muestra en la Figura 8.

**Figura 8. Sepiolita**

*Nota.* Tomado de Materioteca Isabel. (s.f). *Piedra Natural: Sepiolita* [Imagen].  
<https://sites.google.com/site/materioteca-isabel/piedra-natural-sepiolita>

### **3.1.2. Densificantes**

(Nelson & Guillot, 2006) describen que los Agentes Densificantes son utilizados para obtener la densidad deseada del espaciador, algunos de los compuestos que más se utilizan en la industria son los siguientes.

- **Carbonato de Calcio.** El carbonato de calcio triturado y dimensionado a un tamaño de partícula determinado se utiliza para aumentar la densidad del fluido y es preferible a la barita porque es soluble en ácido y puede ser disuelto con ácido clorhídrico para limpiar las zonas de producción. Su uso principal hoy en día es como material de obturación en los fluidos de perforación de yacimiento, completamiento y reacondicionamiento. Las partículas dimensionadas de carbonato de calcio, junto con los polímeros, controlan la pérdida de fluido en las salmueras o

en los fluidos de perforación de yacimiento, completamiento y reacondicionamiento (Shlumberger, 1998), este compuesto es mostrado en la Figura 9.

**Figura 9. Carbonato de Calcio**



*Nota.* Tomado de Syrus. (s.f). *Carbonato de calcio* –  $CaCO_3$  [Imagen].  
<https://syrusdistribution.com/service/carbonato-de-calcio-caco%E2%82%83/>

• **Barita.** Utilizada comúnmente como agente densificante para todos los tipos de fluidos, mostrado en la Figura 10. Los contaminantes en la barita como el cemento, la siderita, la pirrotita, el yeso y la anhidrita, pueden causar problemas en algunos sistemas de fluidos y deberían ser evaluados en todo programa de aseguramiento de la calidad de los aditivos (Shlumberger, 1998).

**Figura 10. Barita**

*Nota.* Tomado de Geologiaweb. (s.f). *Barita Mineral: Propiedades, características y usos* [Imagen].  
<https://geologiaweb.com/minerales/barita/>

- **Hematita.** Es un mineral utilizado como material densificante. tiene una estructura cristalina similar a la de la mica y puede triturarse a un tamaño de partícula adecuado para utilizar en fluidos espaciadores mostrado en la Figura 11. Para comprobar el posible desgaste normalmente se realiza un ensayo de abrasión con la hematita, como prueba piloto de control de calidad (Shlumberger, 1998).

**Figura 11. Hematita**

*Nota.* Tomado de Geologiaweb. (s.f). *Hematita: Significado, propiedades y usos* [Imagen].  
<https://geologiaweb.com/minerales/hematita/>

• **Ilmenita.** Mineral denso cuya gravedad específica es 4,67 g/cm<sup>3</sup>, está compuesto de FeO·TiO<sub>2</sub>, y se utiliza como agente densificante para el cemento y el lodo (Shlumberger, 1998), este compuesto se muestra en la Figura 12.

**Figura 12. Ilmenita**

*Nota.* Tomado de Geologiaweb. (s.f). *Ilmenita: Significado, propiedades y usos* [Imagen].  
<https://geologiaweb.com/minerales/ilmenita/>

### **3.1.3. *Surfactantes y Dispersantes***

Los surfactantes y los dispersantes que se usan en los fluidos espaciadores son los mismos que se utilizan en los limpiadores, por ser más relevantes para los limpiadores serán mencionados en las propiedades de los limpiadores.

### **3.2. Fluido limpiador.**

(Álvarez & Márquez, 2016) indican que los limpiadores son fluidos con una viscosidad y densidad cercanas a la del aceite o el agua. Como las lechadas de cemento y el lodo de perforación son químicamente incompatibles, se deben usar estos fluidos en medio de ambos. La función del fluido limpiador es limpiar cualquier residuo del lodo de perforación remanente después de ser

desplazado por el fluido espaciador como los encontrados en la cara de la formación y el revestimiento conocidos como cake, esto se logra gracias al adelgazamiento y dispersión de la capa de lodo, la correcta remoción del lodo es necesaria dado que por la incompatibilidad con la lechada de cemento una mala remoción causaría problemas de cementación en el momento de la adherencia la cara de la formación, la cual igual que el revestimiento fueron humectados anteriormente por el fluido limpiador, dado que es otra de sus principales funciones, para una óptima adherencia del cemento.

Adicionalmente (Nelson & Guillot, 2006) mencionan que los limpiadores además de remover materiales sólidos cuya presencia pueda dificultar las operaciones de cementación tienen la función de realizar la remoción del revoque, el cual debe ser retirado en su totalidad para asegurar una buena adherencia del cemento a la cara del pozo, evitando así complicaciones con el completamiento. además de limpiar las paredes interiores de la tubería, la limpieza del revoque nos ayuda a obtener una presión positiva la cual es necesaria mantener en todo el proceso de cementación hasta que el cemento fragüe.

Un fluido limpiador, también llamado fluido lavador, está hecho a base agua cuando el lodo es de base agua, aunque para una mayor dispersión y dilución del lodo se usan químicos como surfactantes o dispersantes, como, por ejemplo:

### ***3.2.1. Dispersantes***

(Nelson & Guillot, 2006) indican que si es un lodo base agua se usarán Dispersantes, de los cuales el de uso más común en la industria es el Sulfonato de Poli naftaleno mostrado en la Figura 13, este es un agente basado en naftaleno altamente eficaz como reductor de agua para promover el acelerado temprano y desarrollo de la resistencia final. El Sulfonato de Poli naftaleno,

también llamado naftaleno sulfonato de condensado de formaldehído (NSF), SNF, PNS y FDN etc., y es comúnmente conocida como un superplastificante.

**Figura 13. Sulfonato de Polinaftaleno**



*Nota.* Tomado de Weifang Entachem Co., Ltd. (s.f). *Sal de Sodio de Poli-Naftaleno Sulfonato Ácido-PNS* [Imagen]. Alibaba.com. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/sodium-salt-of-poly-naphthalene-sulfonate-acid-pns-60797087466.html>

- **Lignosulfonatos.** Es un polímero aniónico que consiste en una mezcla compleja de compuestos poliméricos de tamaño diminuto a moderado con sulfonatos ligados a la molécula, es un subproducto del procedimiento de sulfito usado para la construcción de papel desde la pasta de madera y algunas veces se le denomina lignina sulfonada (Shlumberger, 1998) mostrado en la Figura 14.

Algunas variaciones se obtienen gracias a la mezcla con compuestos de cromo y hierro para obtener beneficios de seguridad a temperaturas más altas. Dichos productos se

llamaron lignosulfonatos de cromo (CLS) y lignosulfonatos de ferrocromo (FCLS). Hay menos cromo en la mayor parte de los CLS que en el pasado (ahora hay alrededor de 2,5 a 3%) y hay productos accesibles libres de cromo. Este compuesto es comúnmente usado para desflocular lodos base arcilla.

**Figura 14. Lignosulfonatos**



*Nota.* Tomado de China Hali Trade Co., Ltd. (s.f). *Lignosulfonato de calcio* [Imagen]. SoloStocks. <https://www.solostocks.com.co/venta-productos/materiales-construccion/hormigon-mortero-otras-mezclas/lignosulfonato-de-calcio-4780004>

- **Tanatos.** Son químicos obtenidos del ácido tánico usados comúnmente para desflocular las arcillas y evitar control de pérdida de fluidos, son generalmente quebracho (Shlumberger, 1998), este compuesto se muestra en la Figura 15.

**Figura 15. Tanatos**

*Nota.* Tomado de Tannis.org. (s.f). *¿Qué son los taninos?* [Imagen]. <https://www.tannins.org/es/que-son-los-taninos/>

- **Derivados del ácido policarboxílico.** Son químicos más inofensivos con el medio ambiente, sus derivados como los Halogenuros, Acíclicos, sus Anhídridos, Peroxiácidos, Peróxidos y sus Derivados Halogenados, Nitrosados o Sulfonados, Nitrados (sus Sales y sus Ésteres; Ácido Adípico, Azelaico, Ácido Sebácico, Anhídrido Maleico).

### 3.2.2. *Surfactantes*

(Nelson & Guillot, 2006) describen a los surfactantes como químicos que son usados principalmente para ayudar a remover aceites debido a los base aceite, en casos específicos como el mencionado anteriormente, se usa una combinación de surfactantes con solventes mutuos o un lavado con aceite seguido de un lavado químico de base agua. En este caso, se debe tener en cuenta que el aceite puede ser el mismo que el usado en el fluido de perforación o un aceite específico como un terpeno o derivado (son desengrasantes naturales normalmente conseguidos en la naturaleza de las plantas).

- **Solventes mutuos.** Comúnmente se usa el éter monobutílico de etilenglicol mostrado en la Figura 16, el cual es un disolvente industrial. Este químico se añade a un

compuesto base agua o aceite en una sola fase en concentraciones bajas de entre 1% a 10%.

**Figura 16. Monobutilico de Etilenglicol**

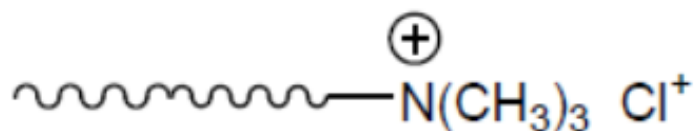


*Nota.* Tomado de Marbe Departamento Químicos. (s.f). *ETER MONOETILICO DEL ETILENGLICOL Para Uso Cromatográfico 1 Lt | SINTORGAN* [Imagen]. <https://www.marbequimica.com.ar/catalogo/productos-quimicos/organicos/eter-monoetilico-del-etilenglicol-para-uso-cromatografico-1-lt/>

### 3.2.2.1. Clasificación de los surfactantes

(Nelson & Guillot, 2006) mencionan que hay dos tipos de surfactantes que se deben tener en cuenta dependiendo de la función que se quiera realizar, están los aniónicos y los no iónicos, y existen los humectados por petróleo.

Los surfactantes humedecidos por petróleo son usados para limpiar la cara de la formación cuando nuestro fluido de perforación fue a base de petróleo. Comúnmente se utilizan sales grasas de amonio del cuaternario mostradas en la Figura 17.

**Figura 17. Sales grasas de Amonio del Cuaternario**

*Nota.* Tomado de Sanz Tejedor, A. (s.f.) *La industria de los agentes tensoactivos* [Imagen]. Química Orgánica Industrial. <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-10.php>

Los surfactantes aniónicos y no iónicos son utilizados para poder cumplir la función de los limpiadores de humectar la cara de la formación y la superficie del revestimiento, estos surfactantes no iónicos se clasifican dependiendo de su equilibrio hidrofílico-lipofílico (HLB) por sus siglas en inglés; clasificándolos de esta manera se puede saber para qué tipo de fluidos son adecuados los niveles de HLB.

- Bajos HLB eficientes para aceites de baja polaridad y compuestos hidrofóbicos.
- Altos HLB para aceites polares, como por ejemplo los ésteres.

**Tabla 1. Clasificación HLB**

| VALOR HLB | USO  |
|-----------|--|
| 3 a 6     | Estabilizador de emulsión de agua en aceite. |
| 7 a 9     | Agente humectante.                           |
| 8 a 18    | Estabilizador de emulsión de aceite en agua. |
| 13 a 15   | Detergente.                                  |
| 15 a 18   | Solubilizante.                               |

*Nota.* Tomado de (Nelson & Guillot, 2006)

Adicionalmente (Nelson & Guillot, 2006) describe que los más comunes son los de base azúcar ya que están permitidos costa afuera, a pesar de no ser tan eficientes. Los glucósidos de alquilo mostradas en la Figura 21 son un surfactante usado en operaciones costa afuera ya que no es riesgoso para las especies marinas y son biodegradables, además son perfectos limpiadores de superficies metálicas lacadas y sin lacar.

**Figura 18. Glucósidos de Alquilo**



*Nota.* Tomado de HAIHANG INDUSTRY CO.,LTD. (s.f). *Alta calidad alquilo polyglucoside, lauril glucósido, Decilglucósido* [Imagen]. Alibaba.com. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-quality-alkyl-polyglucoside-lauryl-glucoside-decyl-glucoside-60332985312.html>

En la Tabla 2 se muestra la efectividad de cada aditivo mencionado en este apartado.

**Tabla 2. Efectividad de los Aditivos.**

| <b>Aditivo</b>      | <b>Compuesto</b>  | <b>Efectividad</b>   |
|---------------------|---|--|
| <b>Dispersantes</b> | Sulfonato de Polinaftaleno  | Es el aditivo de uso más frecuente en la industria. Muestra la mayor eficiencia.     |
|                     | Lignosulfonatos   | Óptimo para lodos base arcilla.  |
|                     | Tanatos   | Óptimo para lodos base arcilla y pérdida de fluidos.                                 |
|                     | Derivados del ácido policarboxílico                               | Químicos más amigables con el medio ambiente usados en costa afuera.                 |
| <b>Surfactantes</b> | Solventes mutuos  | Usados para remover lodos base aceite, usando el mismo aceite del lodo.              |
|                     | Humedecidos por petróleo (sales grasas de amonio del cuaternario) | Eficientes cuando el lodo es a base de petróleo.                                     |
|                     | Surfactantes no iónicos con bajo HBL                              | Óptimo para aceites de baja polaridad.   |
|                     | Surfactantes no iónicos con alto HBL                              | Óptimo para aceites polares.   |
|                     | Glucósidos de alquilo   | Usados en operaciones costa afuera y para superficies metálicas lacadas y sin lacar. |

|  |                 |   |
|--|-----------------|---|
| <b>Viscosificantes<br/>(Polímeros)</b> | Poliacrilamidas | Eficiente en lodos base agua.   |
|  | Guar            | Mayor eficiencia que las poliacrilamidas. Control de movilidad de materiales dispersos. |
|  | Goma Xantana    | Mayor eficiencia que el Guar. Permite trabajar en condiciones más amplias.              |
|  | Escleroglucano  | Mayor eficiencia y estabilidad que la Goma Xantana.                                     |
|  | Goma Welan      | Mayor eficiencia térmica. Permite mantener la Viscosidad en temperaturas elevadas.      |
| <b>Viscosificantes<br/>(Arcillas)</b>  | Goma Diutan     | Mayor eficiencia y estabilidad. Aditivo recientemente introducido.                      |
|  | Bentonita       | Alto grado de encogimiento, permite mayor entrada de agua. No conviene trabajarla sola. |
|  | Atapulgita      | Útil en lodos base agua salada. Permite viscosidad con baja velocidad de corte.         |
|  | Caolinita       | No se hincha al contacto con el agua. Presente en la mayoría de las formaciones.        |
|  | Sepiolita       | Características similares a la Atapulgita.  |

|                      |                     |  |
|----------------------|---------------------|--|
| <b>Densificantes</b> | Carbonato de Calcio | Mayor eficiencia que la Barita. Compuesto soluble en ácidos. Permite el control de pérdidas de fluido.               |
|                      | Barita              | De uso común en las operaciones de cementación. Contienen contaminantes que pueden causar problemas con los fluidos. |
|                      | Hematita            | Permite obtener un fluido con una gravedad específica muy alta.  |
|                      | Ilmenita            | No es muy relevante como densificante para fluidos espaciadores y limpiadores. Mayor eficiencia en cemento o lodo.   |

*Nota.* Elaboración propia

### 3.3. Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad de los fluidos y las lechadas que indica su resistencia al flujo, definida como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte. La viscosidad puede expresarse matemáticamente como se indica a continuación: Poise es la unidad de la viscosidad, equivalente a dina-s/cm<sup>2</sup>. Como un poise representa una viscosidad alta se utiliza 1/100 poise, o un centipoise (cp), para las mediciones de lodos. Un centipoise equivale a un mili pascal-segundo. La viscosidad debe tener una velocidad de corte indicada o entendida para ser significativa. La medición de la temperatura también debe estar indicada o entendida (Schlumberger, 1998).

En los limpiadores la viscosidad no es una propiedad muy destacable, esto debido a la función que cumple el limpiador de principalmente de limpiar y acondicionar las paredes del casing y de la cara de la formación, adicionalmente está el hecho de que no son mezclas muy

complejas, pues estos normalmente son fluidos con agua o aceite (dependiendo de la base del lodo) y algún aditivo que lo complemente.

Para los espaciadores, la viscosidad es de las propiedades más relevantes, pues como se ha mencionado, existen dos tipos de espaciadores con los que se debe trabajar, y así mismo, se deben manejar dos viscosidades diferentes, en el caso del primer espaciador o espaciador inicial, dependerá de la viscosidad del lodo de perforación, pues este debe cumplir la función de desplazarlo, y la viscosidad le permite variar la fuerza con la que arrastra el fluido; en cuanto al segundo espaciador o espaciador final, dependerá de los sólidos remanentes y de la compatibilidad con la lechada de cemento.

### **3.4. Densidad.**

El término densidad proviene del campo de la física y la química, en los que específicamente alude a la relación que existe entre la masa de una sustancia (o de un cuerpo) y su volumen. Se trata, pues, de una propiedad intrínseca, ya que no depende de la cantidad de sustancia que se considere.

La densidad, propiedad que habitualmente se expresa en kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ) o gramo por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ), varía en mayor o menor medida en función de la presión, la temperatura y también con los cambios de estado.

Aunque existen excepciones, por lo general al aumentar la temperatura disminuye la densidad. Cabe aclarar que la densidad puede expresarse de tres formas: la densidad absoluta, definida anteriormente; la densidad relativa, densidad de una sustancia en relación con otra; y la densidad aparente que es la que caracteriza a los materiales porosos como el suelo, por ejemplo.

La importancia de la densidad viene dada por los requerimientos de presión hidrostática y a la hora de la adherencia de la cementación, pues tiene un papel fundamental en los fluidos limpiadores y espaciadores, dado que los fluidos espaciadores usan la densidad para un desplazamiento óptimo, cuando se usan lodos densificados el espaciador usado debe tener una densidad igual o superior al lodo de perforación usualmente 0,5 lb/gal por encima, pero inferior a la del cemento; pero cuando el lodo de perforación tiene una densidad igual o inferior a 9 lb/gal se suele usar agua como fluido espaciador (Fabiola, s. f.).

Para los fluidos limpiadores la densidad no es una característica de suma importancia dado que la función de estos es limpiar con químicos como surfactantes o dispersantes; por el contrario, para los fluidos espaciadores la densidad es un aspecto importante ya que este fluido se utiliza para desplazar a los demás dejando el camino “libre” al limpiador y a la lechada de cemento; la densidad sirve para tener un arrastre efectivo manteniendo la diferencia de densidades evitando una mezcla.

### **3.5. Reología**

La reología es la ciencia y el estudio de la deformación y el flujo de la materia. El término también se utiliza para indicar las propiedades de un líquido dado. La reología es una propiedad sumamente importante de los lodos de perforación, los fluidos de perforación de yacimiento, los fluidos de reacondicionamiento y terminación, los cementos y los fluidos y píldoras especializados. La reología del lodo se mide continuamente durante la perforación o el completamiento y se ajusta con aditivos o dilución para cumplir con las necesidades de la operación. En los fluidos a base de agua, la calidad del agua juega un papel importante en el desempeño de los aditivos. La temperatura afecta el comportamiento y las interacciones del agua, la arcilla, los polímeros y los sólidos en la mezcla.

La reología es una propiedad que funciona de manera similar a la viscosidad, pues esta relaciona el esfuerzo al que se ve sometido un fluido con la deformación que sufre al realizar dicho esfuerzo, de esta manera, para los limpiadores, no desempeña un papel muy relevante, pues como se ha mencionado anteriormente, su función no es dependiente de esta propiedad.

Para los espaciadores, la reología si es determinante, pues dependiendo del espaciador se necesitará un fluido resistente, como es el caso del espaciador inicial, el cual por lo general es un fluido pesado y muy resistente, en cuyo caso, la reología es fundamental para poder cumplir su función, y en cuanto al espaciador final igualmente dependerá de la cantidad de sólidos y de la compatibilidad con la lechada de cemento. (Schlumberger, 1998).

### **3.6. Punto de cedencia.**

Es la resistencia al flujo causada por las fuerzas de atracción de las partículas, debido a las cargas sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase fluida. Los valores altos de punto cedente pueden tener varias causas, algunas de ellas son presencia de contaminantes como sal, cemento o anhídrita, llegando a provocar la floculación de la arcilla. Un aumento en la concentración de sólidos aumenta el número de cargas de superficie y disminuye la distancia entre ellas.

Los fluidos espaciadores están diseñados para tener un alto punto de cedencia, lo cual permite incorporar materiales densificantes y controladores de pérdida de circulación, el punto de cedencia en los espaciadores debe ser mantenido en el rango de temperatura del pozo, manteniendo así los materiales angulares suspendidos, pero permitiendo el flujo dentro del fluido (Fabiola, s. f.).

### **3.7. Temperatura.**

La temperatura es una propiedad física que se refiere a las nociones comunes de calor o ausencia de calor, sin embargo, su significado formal en termodinámica es más complejo. Termodinámicamente se habla de la velocidad promedio o la energía cinética (movimiento) de las partículas de las moléculas, siendo de esta manera, a temperaturas altas, las velocidad de las partículas es alta, en el cero absoluto ( $0^{\circ}\text{K}$ ) las partículas no tienen movimiento.

La importancia de la temperatura en los fluidos limpiadores y espaciadores radica en los cambios que puede causar a diferentes propiedades, por ejemplo, la viscosidad, pues como se conoce, la viscosidad es una propiedad que está en función de la temperatura, más específicamente, un aumento de temperatura implica una disminución de la viscosidad. Por lo tanto, la temperatura funcionara como una propiedad global para ambos fluidos (Calor y Temperatura, 2014).

### **3.8. Número de Reynolds.**

La naturaleza del flujo de un fluido, es decir, que sea laminar o turbulento, y la importancia relativa de la tendencia a que sea laminar o turbulento, se expresa mediante el Numero de Reynolds (NR), que es un parámetro adimensional de semejanza dinámica utilizado en problemas con predominio de la velocidad, este número nos indica en que punto existe una transición de perfiles de flujo:

- NR menor a 2100, flujo laminar.
- NR entre 2100 y 3000, flujo en estado de transición.
- NR mayor a 3000, flujo turbulento

En los trabajos de limpieza se ha podido notar que al usar flujo turbulento se ha podido remover cerca del 95% del lodo de perforación y cuanto mayor es el Numero de Reynolds, menor es la importancia de la viscosidad y viceversa (Fabiola, s. f.).

El flujo laminar es un perfil de flujo para fluidos monofásicos los cuales se mueven en laminas, las cuales fluyen una sobre otra en tuberías rectas teniendo un perfil de velocidad parabólico yendo de un máximo de velocidad en el centro de la tubería, hasta un mínimo en la pared de la tubería; aunque los fluidos espaciadores pueden fluir en perfiles de flujo turbulento, con una densidad adecuada son usados con perfiles de flujo laminar (Schlumberger, 1998).

El flujo turbulento es un perfil de flujo caracterizado por movimiento caóticos del fluido en donde la velocidad lineal de las partículas es similar sin importar su posición, aunque las cercanas a las paredes de la tubería tendrán una velocidad menor, gracias a esto el flujo turbulente es un excelente perfil para el transporte de partículas y la erosión de las paredes de la formación y tubería, por lo cual es usado como perfil de flujo en los fluidos limpiadores, los cuales dependiendo la torta tendrá que ser más o menos turbulento (Schlumberger, 1998).

### **3.9. Nanotecnología en los limpiadores y espaciadores.**

En la actualidad las investigaciones con nanotecnología están abarcando varias industrias en el mundo y como era de esperarse en la industria petrolera ha incursionado hace un tiempo, los compuestos nanotecnológicos pueden ser usados como aditivos en los fluidos limpiadores y espaciadores; se hará una revisión bibliográfica somera con el objetivo de dar conocimiento sobre esta tecnología en las operaciones de acondicionamiento de pozos, pero no se incluirá como parte de la metodología.

La incursión de estas tecnologías en la industria y en los procesos de acondicionamiento de pozos ha dado como resultado compuestos nanotecnológicos los cuales pueden llegar a traer beneficios en el área de la reología o pérdida de fluidos; los nanomateriales tiene propiedades las cuales muestran beneficios, como, al momento de las partículas ser reducidas a menos de 100 nanómetros comienzan a crear fuertes interacciones partícula-partícula, lo cual al ser añadido en bajas concentraciones crea aumentos en la viscosidad de los fluidos, como por ejemplo las adiciones de óxido de grafeno muestran un incremento en la viscosidad del fluido (Friedhem, Young, De Stefano, Lee & Guo, 2012).

(Peng, Tang, Luo, Wang, Ding & Tam, 2018) mencionan que otros nanomateriales con capas estructurales usados para el completamiento de pozos son bentonita, montmorillonita (MMT) usado para ajustes de viscosidad y densidad del lodo e hidróxido en doble capa (LDH).

#### **4. Problemáticas durante la limpieza.**

Como se ha demostrado los trabajos de cementación deficientes conllevan a costos extras durante la vida útil del pozo lo que ocasiona un gasto de dinero que reduce el margen de ganancia de un pozo de petróleo, por ejemplo, en las zonas de contacto agua-petróleo-gas se busca un aislamiento de las zonas, si hubo una cementación pobre esto llevará a operaciones de reforzamiento, reducción de las tasas de producción, riesgos prematuros, fallos en los procesos de estimulación y otros problemas que significaran mucho dinero gastado.

(Schumacher, 1996) menciona que otros gastos relacionados a una deficiente cementación se dan gracias al aumento de la producción de agua durante la vida de un pozo, una mala cementación y mal aislamiento de zonas puede causar un cese anticipado del flujo natural y obligar a implementar sistemas de levantamiento artificial.

Problemas por una mala o deficiente selección de los fluidos limpiadores y espaciadores:

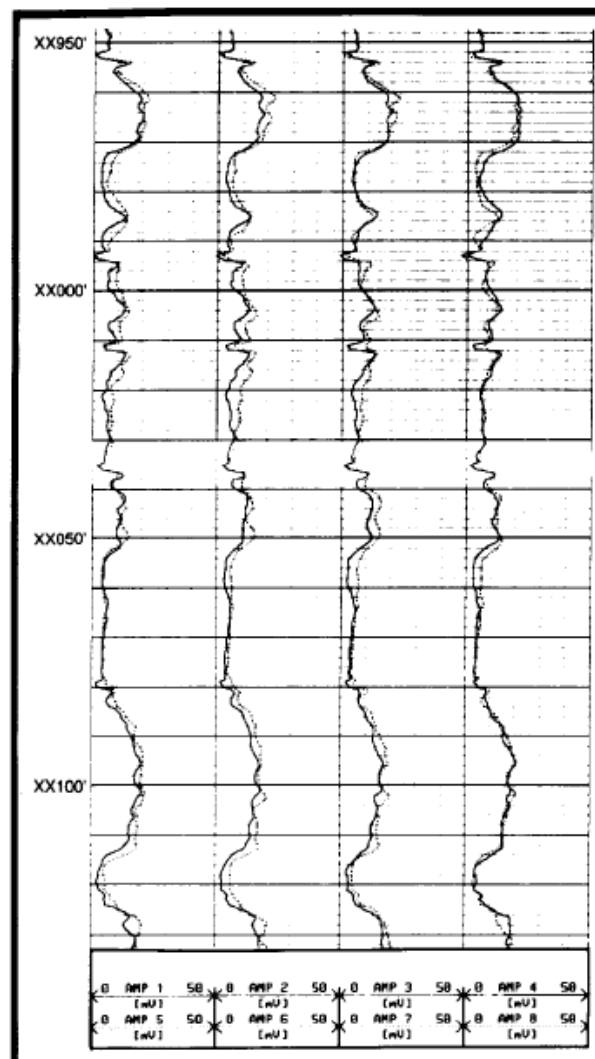
- Una contaminación del cemento conlleva a una disminución a la resistencia a la compresión, lo que puede conllevar a problemas después de un tiempo de producción, esto se soluciona con cementación correctiva, como se demostró en el golfo de México lo que puede llevar a sobre costos de 250\$ o 300\$ millones por intento.
- Lodo desviado.
- Mala limpieza del pozo.
- Mezcla excesiva de lodo y cemento.
- Flujo de gas en el anular causado por la pérdida de presión hidrostática en la columna de cemento por la mezcla con el lodo.

Para identificar si un cemento está contaminado se usa un registro estándar de unión de cemento, la cual mide la amplitud promedio de la primera llegada del sonido que viaja por el casing, conociendo la amplitud mínima, suministrada por la empresa cementera, si se obtiene un valor superior al mínimo podría haber una contaminación de cemento.

### **Caso de estudio.**

Detección de un cemento contaminado. Como se puede ver en el registro de evaluación de cemento (CEL) (Figura 19) cada curva de amplitud es de 45 grados desde el casing, el cemento usado tiene una resistencia superior a los 200 psi; en la sección de xx052 hasta xx080 se tiene un buen lodo sin contaminación, todos los intervalos más amplios son lodo contaminado.

Figura 19. Registro CEL



*Nota.* Tomado de SCHUMACHER, J. P., et al. Improved primary cement jobs through the use of unique spacer design technology: Gulf of Mexico case history study. En SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 1996.

#### 4.1. Incompatibilidad.

La primera problemática durante la limpieza tiene que ver con la compatibilidad entre los fluidos limpiadores y espaciadores con el lodo de perforación y las lechadas de cemento, debido a que la incompatibilidad existente, por lo general, entre las lechadas de cemento y el lodo de

perforación genera una gran problemática durante la cementación, como lo es la floculación, que es una condición en la que las arcillas, los polímeros u otras partículas cargadas pequeñas se adhieren y forman una estructura frágil, un flóculo. En las lechadas de arcillas dispersas, la floculación se produce después de que la agitación mecánica cesa y las plaquetas de arcilla dispersas forman flóculos espontáneamente debido a la atracción entre las cargas negativas de los frentes y las cargas positivas de los bordes (Schlumberger, 1998). (Rabia, 2001) describe que cuando un par de fluidos incompatibles, es decir, dos fluidos que por sus características, al momento de entrar en contacto sufren una reacción descontrolada, se mezclan, se forma una masa altamente viscosa que puede causar varios problemas: el cemento puede canalizarse a través de la masa viscosa, se pueden desarrollar presiones de fricción inaceptablemente altas durante el trabajo de cementación y/o el taponar el anular, lo que puede resultar en fallas en el trabajo; en todas estas situaciones, el aislamiento zonal se ve comprometido y puede ser necesaria una costosa cementación remedial.

Para los fluidos limpiadores es bastante sencillo tratar con esta problemática, pues por lo general son fluidos básicos que tienen propiedades cercanas al agua o al aceite (dependiendo de la base del lodo).

Para los fluidos espaciadores es un poco más complicado, pues estos son químicamente más complejos que los limpiadores. Estos fluidos, dentro de su preparación, tienen componentes que permiten mantener la compatibilidad, siendo los Dispersantes y los Surfactantes los principales medios para mantenerla, teniendo en cuenta que también dependen de la base del lodo.

Ya sea que se use un lodo base agua o base aceite, es importante tener cuidado a la hora de seleccionar el espaciador adecuado, puesto que, una mala elección, involucraría, en primer lugar, una incompatibilidad con el lodo de perforación.

#### **4.2. Reología Inadecuada.**

En cuanto a la reología de los fluidos limpiadores y espaciadores, deben ser preparados de acuerdo a las condiciones en las que se encuentra el pozo para garantizar un buen desplazamiento del lodo. La reología es una parte importante en lo que involucra el desplazamiento del lodo, junto con la densidad. Son las propiedades fundamentales para poder realizar una correcta limpieza.

Teniendo en cuenta que los fluidos limpiadores no son fluidos muy complejos, la reología no es determinante para poder cumplir su función, por lo que no es importante tenerla en cuenta para seleccionar el fluido adecuado.

Para los fluidos espaciadores, a diferencia de los limpiadores, si es importante la reología pues, como se menciona anteriormente juega un papel muy importante al momento de desplazar el lodo de perforación. Estos fluidos están hechos a partir de una mezcla de varios componentes, dentro de los cuales hay algunos específicamente añadidos para controlar esta propiedad, componentes tales como los Viscosificantes.

Es importante seleccionar de manera adecuada los fluidos, principalmente el espaciador, para evitar problemas con la reología, y prevenir de esta forma que falle el fluido en el cumplimiento de su función y que genere una situación mucho más complicada (Nelson & Guillot, 2006).

### **4.3. Densidad Inadecuada.**

Al igual que para la reología, (Rabia, 2001) menciona que la densidad es un factor importante para garantizar un buen desplazamiento del lodo, también es muy importante trabajar con una densidad que funcione en las condiciones del pozo. En cuanto los fluidos, se tiene en cuenta de la misma manera, no es muy determinante para los limpiadores, pero si lo es para los espaciadores, ya que tienen el mismo objetivo de desplazar el lodo. En cuanto a su composición, se utilizan Agentes de Control de Peso para controlar la densidad.

Si no se utiliza una densidad apropiada podemos tener varios problemas operacionales, pues es fácil imaginar lo que puede suceder si se utiliza una densidad menor a la del lodo: no sería posible desplazarlo y, si por el contrario se utiliza una densidad mucho mayor, convertiría el espaciador en un fluido muy pesado y difícil de hacerlo fluir.

### **4.4. Química inadecuada.**

La química adecuada es de suma importancia a la hora de seleccionar los fluidos limpiadores y espaciadores, ya que como se ha visto anteriormente, cada fluido tiene compuestos químicos que se deben agregar, y estos dependen de las condiciones de temperatura, presión, propiedades de la formación y propiedades reológicas del fluido de perforación. A la hora de un buen procedimiento de cementación para el completamiento una mala selección de químicos, es decir, una química inadecuada puede ocasionar problemas que afecten de manera negativa las operaciones de completamiento.

En los espaciadores, es necesario que el fluido pueda separar de manera eficiente el lodo de perforación, arrastrándolo de manera óptima con sus sólidos en suspensión, para esto se necesita una densidad y viscosidad específicas, en cuanto a los limpiadores, se necesita un fluido con una

química que permita limpiar las paredes de la formación removiendo aceite en casos de fluidos de perforación a base aceite y limpiar el revestimiento, además de esto es importante que la química permita dejar todas las superficies sólidas mojadas para una óptima adherencia de la lechada de cemento (Nelson & Guillot, 2006).

#### **4.5. Daño a la formación.**

Es conocido también como la variación de la permeabilidad en el yacimiento. El daño a la formación es un problema que se presenta debido a las interacciones del fluido invasor con fluidos de yacimiento, unos posibles mecanismos pueden ser la precipitación de silicatos de calcio, desconsolidación de la formación y taponamiento de poros en la formación por partículas. Se ha observado que los espaciadores de agua dulce y lechadas de cemento modificadas con látex han causado una severa disminución de la permeabilidad, sin embargo, se ha encontrado que el cloruro de potasio (KLC) es beneficioso porque reduce la hinchazón de las arcillas (Shlumberger, 1998).

Adicionalmente (Nelson & Guillot) aclaran que el daño a la formación puede llevarnos a problemas operacionales en el proceso de cementación como disminución en la humectabilidad lo cual afecta la eficiencia de los fluidos limpiadores puesto que una de sus principales funciones es humectar la cara de la formación y el revestimiento para una adecuada adherencia del cemento, mitigar las pérdidas de fluidos y evitar la mala consolidación del cemento.

## **5. Metodología para seleccionar los fluidos espaciadores y limpiadores.**

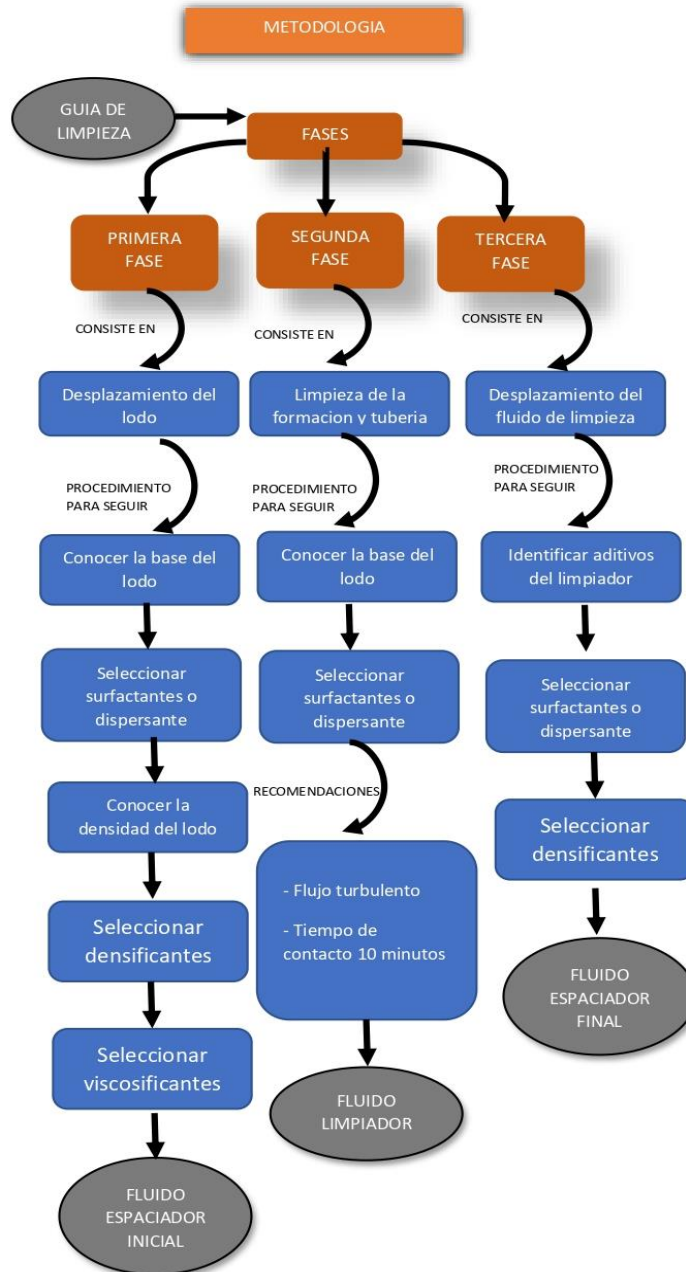
### **5.1. Guía de limpieza.**

Para desarrollar una metodología de selección de fluidos espaciadores y limpiadores se usará un procedimiento base desarrollado por Shlumberger para poder dividir la cantidad de fluidos que se pueden utilizar como se observa en la Figura 20.

Esta guía se dividirá en tres fases: la primera fase, en donde ocurre el mayor desplazamiento del lodo, se conocerá como fase de desplazamiento inicial, en esta se usará un fluido espaciador o una píldora de empuje que se hará fluir como si de un pistón se tratara. La segunda fase, donde se limpian los residuos de la fase anterior, se conocerá como fase de limpieza, aquí se usará un fluido limpiador, y de ser necesario, se utilizarán los aditivos pertinentes, ya que este debe dejar las paredes de la formación y del acero mojadas con agua. La última fase, donde se desplaza el fluido de la fase anterior, se conocerá como fase de desplazamiento final, y en esta se usará un segundo fluido espaciador, cuyo objetivo es prevenir la contaminación de la lechada de cemento que viene seguida del proceso de limpieza. Esta secuencia básica a menudo se ajusta según la compatibilidad de fluidos consecutivos.

Según las condiciones del pozo y los operadores, se puede dar prioridad a la relación de viscosidad o a la relación de densidad para los espaciadores. Para agujeros verticales grandes, la atención se centra en la jerarquía de densidad y para agujeros muy desviados, la relación de viscosidad se convierte en el principal requisito. Un espaciador que combina alta densidad y viscosidad, junto con la rotación de tuberías, sigue siendo la solución definitiva para limpiar y transportar sólidos (Nelson & Guillot, 2006).

Figura 20. Guía de Limpieza

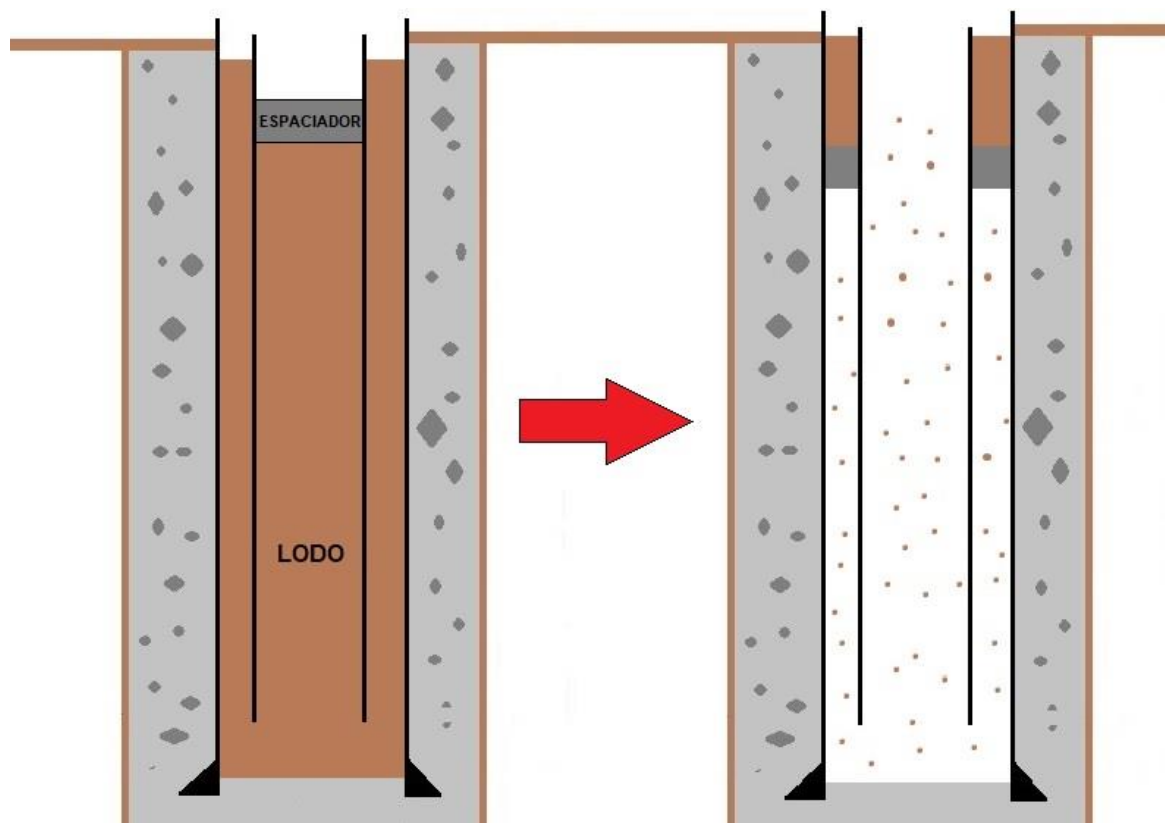


Nota. Elaboración propia

## 5.2. Primera fase.

La primera fase consta de una píldora de empuje, la cual debe ser más viscosa que el lodo y cuya función es desplazar la mayor cantidad posible de este, como se muestra en la Figura 21. Para este caso se debe enfocar, en principio en la compatibilidad del espaciador con el lodo de perforación, para ello se debe tener en cuenta la base del lodo, posteriormente la propiedad más importante es la reología del espaciador, por lo que para escoger este fluido tendremos en cuenta la viscosidad y la densidad, el desarrollo de esta fase se observa en la Tabla 3.

**Figura 21. Primera Fase.**



*Nota.* Elaboración propia

**Tabla 3. Selección del Fluido Espaciador Inicial**

| <b><u>FLUIDO ESPACIADOR INICIAL</u></b>  |   |  |
|--|---|--|
| <b>COMPATIBILIDAD</b>  |   |  |
| Para trabajar la compatibilidad se debe tener en cuenta la base del lodo, dependiendo de esto se utilizarán surfactantes o dispersantes como aditivos.   |   |  |
| LODO BASE AGUA (DISPERSANTES)  | LODO BASE ACEITE<br>(SURFACTANTES)  |  |
| Se recomienda el Sulfonato de Polinaftaleno por su efectividad.  | Se recomienda revisar la clasificación HLB para determinar el aditivo adecuado. (Ver <a href="#">Tabla 1</a> ). |  |
| <b>REOLOGIA</b>  |   |  |
| Para determinarla se tendrá en cuenta la viscosidad y la densidad del fluido.  |   |  |
| <b>RECOMENDACIONES</b>   |   |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para huecos verticales, la jerarquía de densidad será más importante.</li> <li>• Para huecos desviados, la jerarquía de viscosidad será más importante</li> </ul> |   |  |
| <b><u>DENSIDAD</u></b>   | <b><u>VISCOSIDAD</u></b>  |  |
| Se debe tener en cuenta que la densidad del espaciador será 0.5 lpg mayor que la densidad del lodo de perforación.   | Se recomienda mantener la viscosidad del espaciador por encima de la del lodo, mantener un margen de 5 a 10 cp. |  |
| <b>DENSIFICANTES</b>   | <b>VISCOSIFICANTES</b>  |  |
| Se recomienda el Carbonato de Calcio por su efectividad.   | <b>POLIMEROS</b>  | <b>ARCILLAS</b>  |
|  | Se recomienda la Goma Diutan por su alta efectividad y estabilidad.   | Se recomiendan la Atapulgita o la Sepiolita, permiten viscosidad en relación a la baja velocidad del fluido. |

*Nota.* Elaboración propia

### 5.3. Segunda fase.

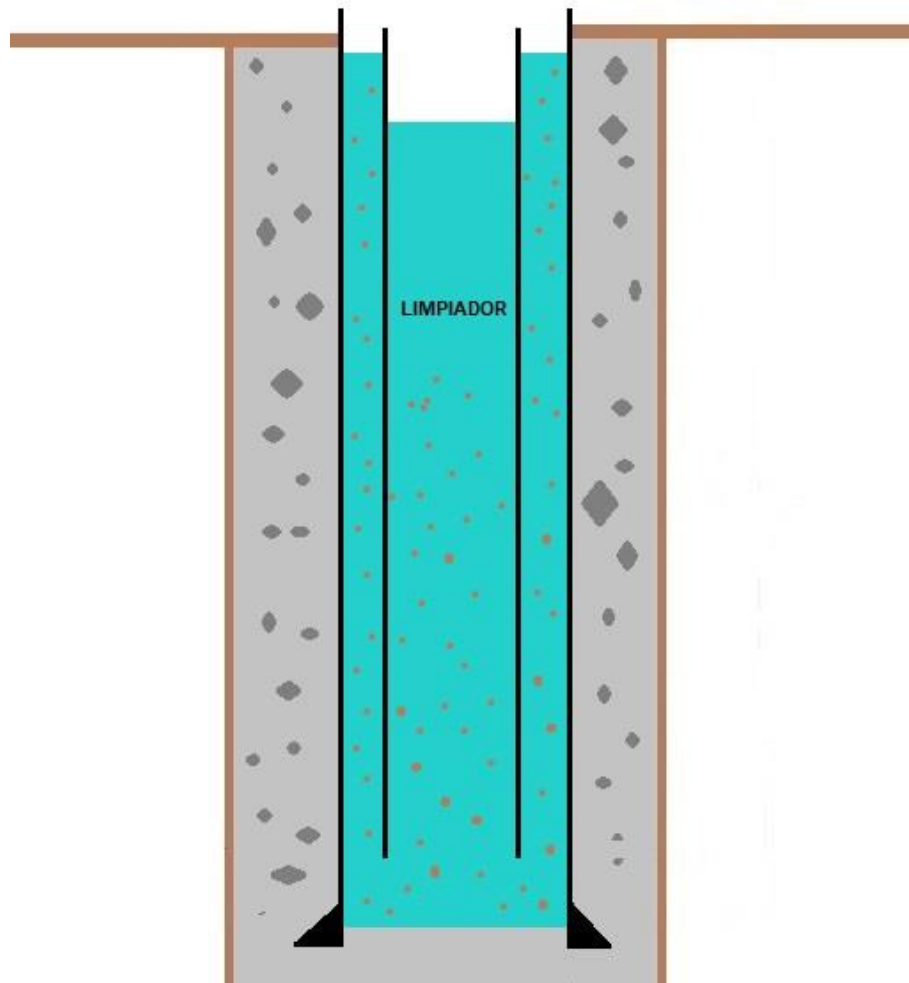
En la segunda fase se encuentra el limpiador como se observa en la Figura 22. Los limpiadores son químicamente menos complejos que los espaciadores, estos fluidos dependen de la composición química del fluido de producción, por ejemplo, para lodos base agua (WBM) se suele usar agua dulce como fluido limpiador, el desarrollo de esta fase se observa en la Tabla 4.

Sin embargo, para la optimización del proceso se usan químicos que convierten el proceso en un lavado químico, este proceso tiene una recomendación: el volumen del lavado químico debe poder garantizar un contacto con la zona que se desea limpiar de al menos 10 minutos.

La selección correcta de los químicos usados en los limpiadores para hacer un lavado químico comprende entre la elección de surfactantes, dispersantes o tensoactivos.

(Nelson & Guillot, 2006) mencionan que todos los fluidos usados para el lavado y desplazamientos son conocidos como “prelavados” los cuales no deberían causar daño en la formación de manera significativa por cambio de la humectabilidad o filtración de fluidos, por lo tanto, el uso de químicos tiene el objetivo de lograr principalmente una limpieza más eficiente de las zonas que se van a cementar.

Figura 22. Segunda Fase



*Nota.* Elaboración propia

**Tabla 4. Selección del Fluido Limpiador**

| <b><u>FLUIDO LIMPIADOR</u></b>   |   |
|--|---|
| <b>COMPATIBILIDAD</b>  |   |
| Para trabajar la compatibilidad se debe tener en cuenta la base del lodo, dependiendo de esto se utilizarán surfactantes o dispersantes como aditivos.   |   |
| LODO BASE AGUA (DISPERSANTES)  | LODO BASE ACEITE (SURFACTANTES)   |
| Se recomienda el Sulfonato de Polinaftaleno por su efectividad.  | Se recomienda revisar la clasificación HLB para determinar el aditivo adecuado. (Ver <a href="#">Tabla 1</a> ). |
| <b>RECOMENDACIONES</b>   |   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se debe garantizar un perfil de flujo turbulento, esto contribuye a la eliminación completa del cake.</li> <li>• Si se trabaja con un lavado químico, se debe garantizar un tiempo de contacto de al menos 10 minutos.</li> </ul> |   |

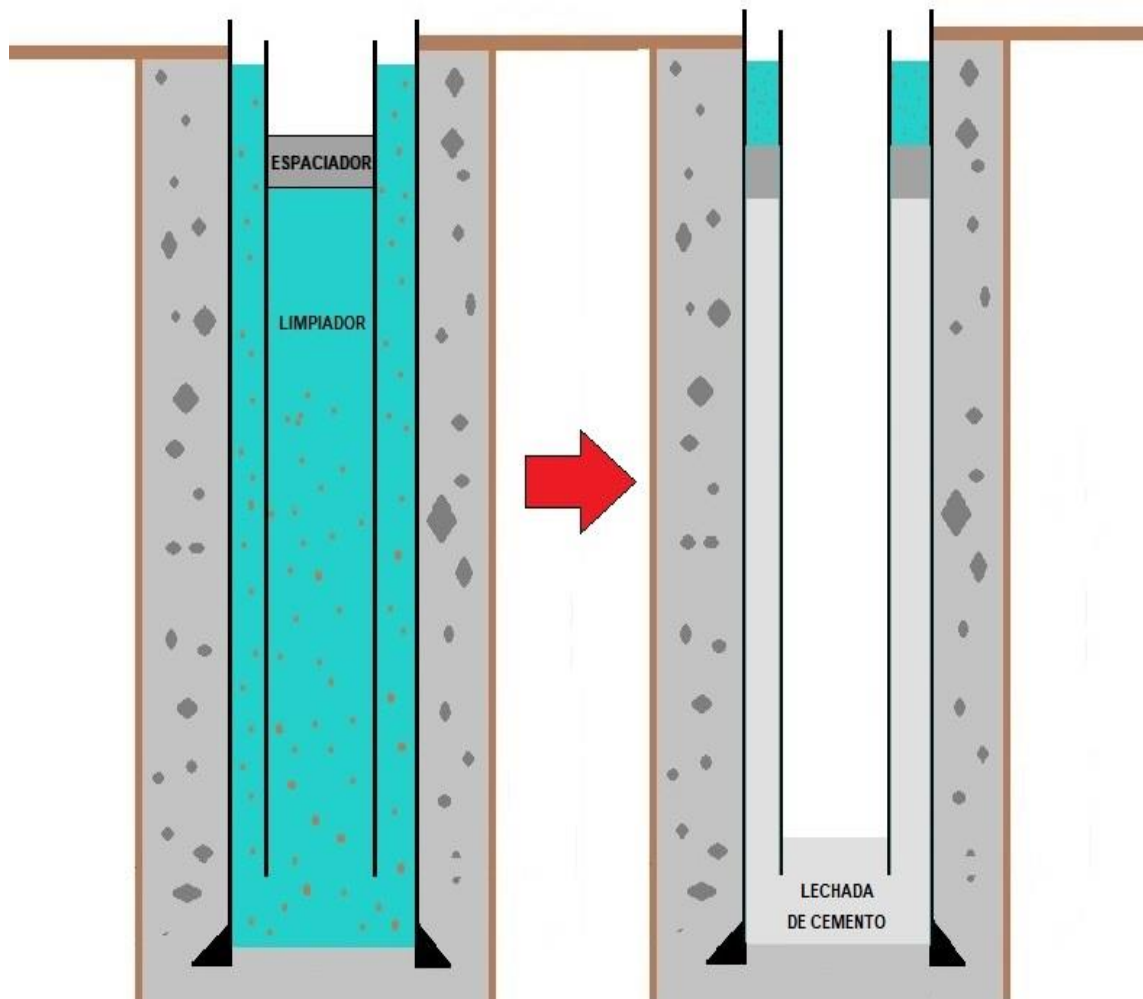
*Nota.* Elaboración propia

#### **5.4. Tercera fase**

La tercera fase mostrada en la Figura 23 es menos compleja que la primera, pues su función se centra más que todo en acondicionar el pozo para evitar cualquier contaminación de la lechada de cemento, por lo que para seleccionar el espaciador en este caso se debe enfocar en evitar cualquier contaminante que pueda restar para la lechada de cemento, es decir, la mayor importancia en este caso será la compatibilidad del espaciador con la lechada de cemento, el desarrollo de esta fase se observa en la Tabla 5.

Al igual que para la primera fase, la compatibilidad puede ser controlada a partir de Dispersantes o Surfactantes dependiendo de la base del lodo, además, los mismos aditivos mencionados anteriormente funcionan de la misma manera para controlar la compatibilidad con la lechada para este caso.

**Figura 23. Tercera Fase**



*Nota.* Elaboración propia

**Tabla 5. Selección del Fluido Espaciador Final**

| <b><u>FLUIDO ESPACIADOR FINAL</u></b>   |   |
|---|---|
| <b>COMPATIBILIDAD</b>   |   |
| Para trabajar la compatibilidad se debe tener en cuenta, las propiedades de la lechada de cemento y el aditivo usado en el fluido limpiador, dependiendo de esto se utilizarán surfactantes o dispersantes como aditivos. |   |
| <b>LIMPIADOR CON DISPERSANTE<br/>(DISPERSANTE)</b>  | <b>LIMPIADOR CON SURFACTANTE<br/>(SURFACTANTES)</b>   |
| Se recomienda el Sulfonato de Polinaftaleno por su efectividad.   | Se recomienda revisar la clasificación HLB para determinar el aditivo adecuado. (Ver <a href="#">Tabla 1</a> ). |
| <b>DENSIDAD</b>   |   |
| Para trabajar la densidad del espaciador se debe tener en cuenta la densidad de la lechada de cemento. Se debe trabajar siempre con un espaciador con densidad menor que la de la lechada de cemento.                     |   |
| <b>DENSIFICANTES</b>  |   |
| Se recomienda el Carbonato de Calcio por su efectividad.  |   |

*Nota.* Elaboración propia

## 6. Conclusiones.

Es importante conocer las propiedades de los fluidos de perforación y las lechadas de cemento que se usan en cada operación, como la densidad del lodo y de la lechada, la compatibilidad del lodo con el espaciador inicial y el limpiador, y la lechada de cemento y el espaciador final, ya que estas dan la información requerida para determinar las propiedades que tendrán los fluidos limpiadores y espaciadores.

Existe una variedad de problemáticas observables durante la limpieza del pozo, tales como la incompatibilidad de los fluidos, la densidad, reología y química inadecuada, y el daño a la formación, por lo que es importante conocerlas y saber cómo actuar frente a cada una de ellas, para así lograr un proceso más eficiente y de la misma manera más económico.

La correcta selección de los espaciadores y limpiadores es una parte crítica en el proceso de completamiento de pozos, la estabilidad de la cementación depende en gran medida de una correcta selección, sin embargo, hay otros factores durante la cementación que influyen en la correcta terminación de la misma, es importante tener los equipos necesarios y bien preparados por lo menos un día antes del proceso, tener un equipo de trabajo capacitado, una buena ejecución del trabajo y un correcto diseño del cemento.

El desarrollo de esta metodología permite conocer factores importantes durante todo el proceso de cementación, tales como las propiedades de los fluidos de perforación, de las lechadas de cemento y de los fluidos limpiadores y espaciadores, y lo más fundamental, las problemáticas durante la limpieza del pozo y como evitarlas con el uso de aditivos, como viscosificantes, densificantes, surfactantes y dispersantes, que permiten el control de las características de los fluidos durante la limpieza.

La mejor combinación para poder seleccionar un fluido espaciador consiste en generar un equilibrio entre dos propiedades fundamentales, la densidad y la viscosidad, pues estas son las que permiten, en gran parte, darle la propiedad de desplazar al espaciador, por lo tanto un fluido con un buen diseño por densidad y por viscosidad, será un buen fluido espaciador.

## **7. Recomendaciones.**

Aplicar esta metodología a un caso de estudio en particular que permita el desarrollo de una metodología más específica realizando análisis cuantitativos de los fluidos limpiadores y espaciadores.

Profundizar en la investigación del desarrollo de las nuevas tecnologías, como la nanotecnología, como aditivos resistentes a mayores condiciones de presión y temperatura, y en su aplicación para controles de viscosidad y de densidad en las operaciones de limpieza en el completamiento de pozos.

Investigar acerca de los otros procesos durante la cementación que puedan afectar de manera negativa el resultado final, como, por ejemplo, la centralización de tuberías, que es un factor que afecta el trabajo de los espaciadores, una tubería mal centralizada sin conocerse puede afectar el resultado final de una cementación, pues hará que nuestro espaciador actúe de maneras diferentes a las esperadas.

Realizar un análisis financiero que permita determinar los costos operacionales durante cada una de las fases descritas durante la metodología, para así poder realizar una selección más enfocada en los aspectos económicos según las necesidades.

**Bibliografía.**

Álvarez Herrera, M. C., & Márquez Díaz, E. G. (2016). Evaluación de los resultados de cementación de la sección intermedia de un pozo inyector de un campo en la cuenca Llanos Orientales por medio de la simulación del uso de la tecnología cabeza rotativa de cementación (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Álvarez, M., & Márquez, E. (2016). EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CEMENTACIÓN DE LA SECCIÓN INTERMEDIA DE UN POZO INYECTOR DE UN CAMPO EN LA CUENCA LLANOS ORIENTALES POR MEDIO DE LA SIMULACIÓN DEL USO DE LA TECNOLOGÍA CABEZA ROTATIVA DE CEMENTACIÓN. Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/373/1/5111646-2016-2-IP.pdf>.

BRANDL, Andreas, et al. Combating Severe Losses and Improving Cementing Quality in Carbonate Formations: A Lesson Learned from Drilling Wells in Offshore Sarawak, Malaysia. En IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference. OnePetro, 2014.

F. (s. f.). separadores y espaciadores .docx. Scribd. <https://es.scribd.com/document/407065842/separadores-y-espaciadores-docx>.

Friedheim, J., Young, S., De Stefano, G., Lee, J. y Guo, Q. (2012, junio). Nanotecnología para aplicaciones en yacimientos petrolíferos: ¿bombo o realidad? En la conferencia y exhibición internacional de nanotecnología de campos petroleros de la SPE . OnePetro.

- Indo, K., Pop, J., Hsu, K., Ossia, S., Atzeni, G.-L., Malossi, A., ... Haq, S. (2015, March 17). Evaluating Formation Fluid Properties During Sampling-While-Drilling Operations. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/173152-MS
- Olowolagba, K. O., & Yerubandi, K. B. (2011, January 1). Improved Spacer Rheology Model for Cement Operations. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/140805-MS.
- López Sánchez, A. B. (2018). Estudio para la optimización de la limpieza de hoyo en pozos horizontales y altamente desviados del campo Edén Yuturi (Bachelor's thesis, Quito, 2018.).
- McClure, J., Khalfallah, I., Taoutaou, S., Vargas Bermea, J. A., & Kefi, S. (2014, October 1). New Cement Spacer Chemistry Enhances Removal of Nonaqueous Drilling Fluid. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/1014-0032-JPTH
- Haut, R. C., & Crook, R. J. (1982, August 1). Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/10305-PA.
- Nelson, E. B., & Guillot, D. (2006). Well Cementing (2.a ed.). Schlumberger.
- Norman, C., & Trombetta, J. (2007). El uso de surfactantes en proyectos de recuperación terciaria. Tiorco, Notas Técnicas, 5.
- O'Keefe, M. (2009, August 1). Reservoir Fluid Properties Measured Downhole. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/0809-0022-JPT.
- Olowolagba, K. O., & Yerubandi, K. B. (2011, January 1). Improved Spacer Rheology Model for Cement Operations. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/140805-MS.

- Peng, B., Tang, J., Luo, J., Wang, P., Ding, B., & Tam, K. C. (2018). Applications of nanotechnology in oil and gas industry: Progress and perspective. *The Canadian journal of chemical engineering*, 96(1), 91-100.
- Pernites, R., Khammar, M., & Santra, A. (2015, April 27). Robust Spacer System for Water and Oil based Mud. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/174005-MS
- Beirute, R. M. (1976, January 1). All Purpose Cement-Mud Spacer. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/5691-MS.
- Qué es el Revoque (Mud Cake)? (s. f.). Perfoblogger. [https://perfoblogger.blogspot.com/2020/11/que-es-el-revoque-mud-cake.html?sref=fb&fbclid=IwAR0\\_i-FhAWI6DETOcpI5v8Qw\\_aJ-khYGxL4GnEmUNHa07T4QG8QTXAs0WBw](https://perfoblogger.blogspot.com/2020/11/que-es-el-revoque-mud-cake.html?sref=fb&fbclid=IwAR0_i-FhAWI6DETOcpI5v8Qw_aJ-khYGxL4GnEmUNHa07T4QG8QTXAs0WBw).
- Rabia, H. (2001). Well Engineering & Construction. Entrac Consulting.
- Sierra, M. A., & de Jesús Salazar, G. (1999).
- SCHUMACHER, J. P., et al. Improved primary cement jobs through the use of unique spacer design technology: Gulf of Mexico case history study. En SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro, 1996.
- Sierra, M. A., & de Jesús Salazar, G. (1999). Principales tipos de lodos empleados en la perforación de pozos de gas, aceite o agua. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (13), 118-131.
- Shlumberger. (s. f.-a). Home. Shlumberger Oilfield Glossary. <https://glossary.oilfield.slb.com/es/>

Velasco, T., & Castro, W. (2015). ESTUDIO DE DISEÑOS ESPECIALIZADOS PARA CEMENTAR HOYOS DE CALIBRES EXTENDIDOS, EN POZOS DE LA CUENCA ORIENTE DEL ECUADOR. Escuela Politécnica Nacional.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/10789/3/CD-6321.pdf>.