



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**FACTORES QUE DETERMINAN LA  
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS  
SISTEMAS DE FLUIDOS  
LAVADORES Y ESPACIADORES EN LOS  
TRABAJOS DE CEMENTACION PRIMARIA.**

TÉSIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO PETROLERO  
P R E S E N T A N :

**AGUSTÍN PACHECO JIMÉNEZ  
OSCAR OBED GUERRA GARCÍA**



DIRECTOR DE TESIS: QUIM. ROSA DE JESÚS HERNÁNDEZ ÁLVAREZ

MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

---

---

AGRADECIMIENTOS:

A DIOS...

A LA VIRGEN DE GUADALUPE...

A MIS PADRES: JULIETA GARCÍA Y  
RAYMUNDO GUERRA...

A MI ALMA MATER...

A MIS HERMANOS, IVÁN Y OMAR GUERRA G.

A TODOS MIS PROFESORES DE LA CARRERA...

A MIS VERDADEROS AMIGOS...

GRACIAS...!!!!!!

“He llegado tan alto.... apoyándome sólo en  
GIGANTES....!!!!!!

Isaac Newton.

"Los que renuncian.... son más numerosos que los que  
fracasan."

Henry Ford.

“Educación es lo que queda después de olvidar lo que  
se ha aprendido en la escuela...”

Albert Einstein.

OSCAR GUERRA

---

---

## **A DIOS**

Por estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, en mis angustias, en mi soledad, en mis alegrías, por ayudarme a salir adelante y demostrarme lo que parece ser imposible siempre es posible.

## **A MI MADRE**

A ti te debo todo lo que soy, todo lo que tengo; he llegado aquí por tu fuerza de voluntad e infinito amor, te doy las gracias por ser mi madre.

## **A MI PADRE**

Te agradezco por enseñarme a mirar el mundo y explorarlo, a ver de el lo bueno y lo malo, el enseñarme que un hombre de bien no es el que se dice, sino el que se hace.

## **A MI HERMANO RAMIRO**

Gracias por creer en mi hermano, gracias por ser mi amigo y disfrutar la vida. Te agradezco tu apoyo y tus consejos.

## **A MI FAMILIA.**

Gracias familia por estar unida, aún en las cosas desfavorable, por no temer a la adversidad, siempre apoyándonos y caminar hombro con hombro, gracias por que cada uno se cuida, y el que se cuida, cuida a la familia.

## **A LA UNIVERSIDAD.**

Gracias Universidad por recibirme, por darme la oportunidad de superarme en la vida, ya que tú forjas a los mejores profesionistas del país, permitiendo que yo forme parte de ese selecto grupo y por respaldar con tu nombre mi profesión.

A MI FACULTAD: Por todo el conocimiento que encontré en sus aulas, por todos esos momentos felices y anécdotas que están en mi memoria y son parte de mi vida. ¡¡ Orgullosamente hecho en la U.N.A.M.!!.

## **A LA MAESTRA QUIM. ROSA DE JESÚS HERNÁNDEZ ÁLVAREZ**

Gracias maestra por su valioso interés, apoyo, dedicación, esfuerzo y experiencia para el desarrollo y conclusión de este trabajo.

AGUSTIN PACHECO

---

---

## Contenido

OBJETIVO.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
CAPITULO 1.- GENERALIDADES.....	10
1.1 CEMENTACIONES .....	11
1.2 CLASIFICACION DE LAS CEMENTACIONES .....	11
1.2.1 CEMENTACION PRIMARIA .....	11
1.2.2 CEMENTACION FORZADA .....	13
1.2.3 TAPONES DE CEMENTO .....	13
1.3 DESCRIPCIÓN DE LA CEMENTACIÓN PRIMARIA.....	13
1.4 METODOLOGÍA REQUERIDA .....	14
1.4.1 INFORMACIÓN BÁSICA .....	15
1.4.2 CÁLCULOS .....	15
1.4.3 GENERAR MODELOS MATEMÁTICOS COMPUTACIONALES PARA ENSAYOS DE PRUEBA Y ERROR. ....	17
1.4.4 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EN EL POZO .....	18
1.4.5 REMOCIÓN DEL LODO .....	19
1.4.6 DISEÑO DE LA LECHADA.....	22
1.4.7 SELECCIÓN DE ACCESORIOS .....	24
1.4.8 APLICACIONES DEL TRABAJO.....	27
CAPITULO 2.- ASPECTOS QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS FLUIDOS LAVADORES Y ESPACIADORES .....	30
2.1.- DIFERENCIA ENTRE FLUIDO LAVADOR Y FLUIDO ESPACIADOR .....	30
2.2 DEFINICIÓN .....	32
2.3 FUNCIONES Y CLASIFICACIÓN .....	32
2.3.1.- FUNCIONES .....	33
2.3.2.- CLASIFICACIÓN .....	36
2.4.- USO DE FLUIDOS LAVADORES Y FLUIDOS ESPACIADORES.....	38
2.5.- REMOCIÓN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y ENJARRE .....	39
2.6 FACTORES PRINCIPALES QUE AFECTAN LA REMOCIÓN DEL LODO DE PERFORACIÓN. ....	43
2.7 REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS LAVADORES Y FLUIDOS ESPACIADORES.....	44
2.7.1 REOLOGIA.....	45
2.7.2 VISCOSIDAD .....	45

2.8.3 ESFUERZO DE CORTE .....	46
2.7.4 VELOCIDAD DE CORTE .....	46
2.8 TIPOS DE FLUIDOS.....	46
2.8.1 FLUIDOS NEWTONIANOS.....	47
2.8.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	47
2.8.3 MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM. ....	48
2.8.4 MODELO DE LA LEY DE POTENCIA Ó LEY EXPONENCIAL.....	49
2.9 PERFILES DE FLUJO.....	49
2.9.1 FLUJO LAMINAR .....	50
2.9.2 FLUJO TURBULENTO .....	50
2.9.3 FLUJO TAPON.....	51
2.9.4 TRANSICION ENTRE FLUJO.....	51
2.10 CRITERIO MÁS IMPORTANTE EN LA SELECCIÓN DE UN FLUIDO LAVADOR Y ESPACIADOR.....	53
<b>CAPITULO 3.-CONDICIONES DE DISEÑO QUE DETERMINAN SU APLICACIÓN</b>	<b>59</b>
3.1.- CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO .....	60
3.2.- PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA CEMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO .....	61
3.3.- CÁLCULO DEL VOLUMEN DE CEMENTO.....	63
3.4 DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN (DEC) .....	67
3.5 PERFIL DE PRESIONES EN EL POZO. ....	68
3.6 CONDICIONES DE DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE FLUIDOS ESPACIADORES Y LAVADORES. ....	69
3.6.1 USO DE SURFACTANTES.....	71
3.6.2 DENSIDAD.....	71
3.6.3 PROTECCIÓN DE LA FORMACIÓN. ....	72
3.6.4 REQUERIMIENTOS DEL FLUIDO.....	72
3.6.5 VOLUMENES RECOMENDADOS. ....	73
<b>CAPITULO 4.-PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS BACHES LAVADOR Y ESPACIADOR.....</b>	<b>75</b>
4.1 ELABORACION Y EVALUACION DE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE BACHES LAVADORES Y ESPACIADORES	75
4.2 PREPARACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PRUEBA .....	76
4.3 PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS FLUIDOS LAVADORES Y ESPACIADORES .....	78
4.4 TIXOTROPIA DEL FLUIDO LAVADOR Y ESPACIADOR .....	82

---

---

4.5 GASTO MÍNIMO DE BOMBEO.....	83
4.6 DENSIDAD DEL FLUIDO ESPACIADOR Y CONTENIDO DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.....	84
4.7 COMPATIBILIDAD DEL FLUIDO ESPACIADOR CON EL LODO Y EL CEMENTO.....	85
4.8 DEFINICIONES: .....	86
4.9 PRUEBA DE TIEMPO DE BOMBEO.....	88
4.10 PRUEBA DE ESFUERZO COMPRESIVO.....	89
4.11 SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS Y ESFUERZO ESTÁTICO DE GEL. ....	89
4.12 PRUEBA DE PÉRDIDA DE FLUIDO.....	90
4.13 EJEMPLO DE PRUEBA DE UN SISTEMA LAVADOR.....	90
CAPITULO V.- PROCEDIMIENTOS Y FACTORES PARA EL DESPLAZAMIENTO DE FLUIDOS LAVADORES Y ESPACIADORES.....	94
5.1 VELOCIDADES ANULARES.....	94
5.2 TIPOS DE FLUJO.....	96
5.3 EFICIENCIA DE TRASPORTE.....	97
5.4 FLUJO EXCÉNTRICO Y DIFERENCIA DE DENSIDAD .....	102
5.5 ALTOS RANGOS DE DESPLAZAMIENTO .....	103
5.6 ESPACIADORES Y CEMENTOS NO DENSIFICADOS .....	104
5.7 GASTO ÓPTIMO DE DESPLAZAMIENTO .....	105
RECOMENDACIONES .....	109
CONCLUSIONES.....	110
BIBLIOGRAFÍA .....	111

---

---

## **OBJETIVO**

Dar a conocer los factores que determinan la selección y aplicación de los sistemas de fluidos lavadores y espaciadores, en los trabajos de cementación primaria, basados en un rastreo bibliográfico.

---

---

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo de carácter bibliográfico tiene como propósito dar a conocer la influencia de los depósitos de sólidos que forman el enjarre ó película que dejan los fluidos de perforación para el control de la filtración, mismo que hay que eliminar para tener éxito en la operación de cementar la tubería de revestimiento y así lograr una excelente adherencia a la formación.

La remoción del enjarre realizada por el fluido lavador y fluido espaciador, es **CRUCIAL** para el establecimiento del aislamiento entre la formación y la tubería, garantizando así, un efectivo sello hidráulico, lográndose una cementación primaria exitosa; una limpieza incompleta de la pared del pozo de residuos potencialmente contaminantes y que afectan las propiedades del cemento, puede conducir a la formación de un canal, creando vías de comunicación entre las distintas formaciones y la tubería; los procedimientos de desplazamiento, la geometría del pozo y la centralización de la tubería de revestimiento son afectados por este fenómeno. La película que inadecuadamente queda en la zona por cementar, genera fenómenos adversos tales como una mala adherencia del cemento entre la formación y la tubería, la producción de fluidos no deseados, existencia de presión detrás de la tubería de revestimiento, corrosión acelerada de la tubería de revestimiento, e incluso la migración de los fluidos hacia la superficie.

La solución de estos problemas demanda gastos adicionales y se refleja en el encarecimiento del costo inicial proyectado para el pozo e incrementa el tiempo estimado para ponerlo a producir. En pozos con alta temperatura y presión, estos factores se hacen más críticos.

---

---

---

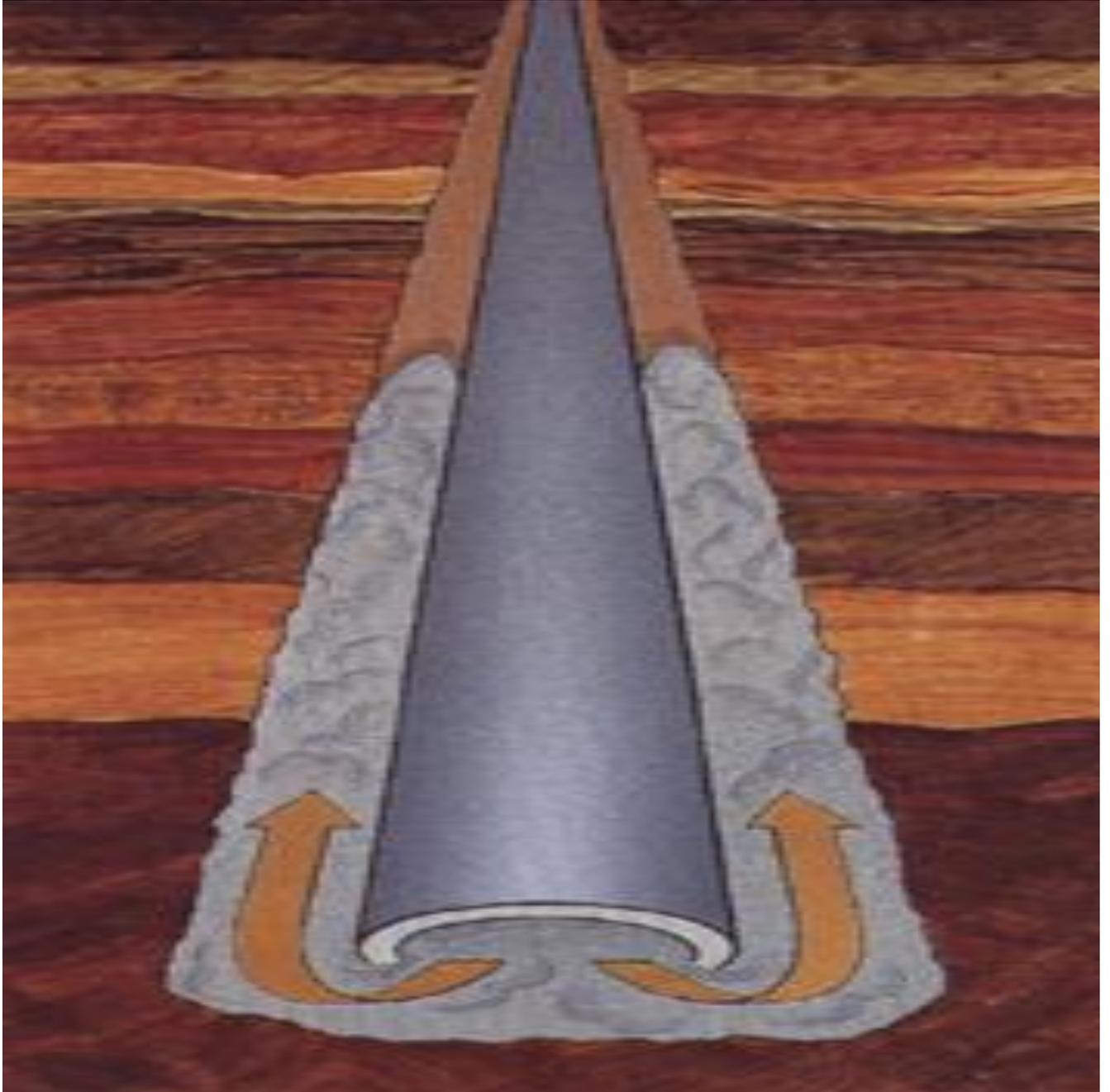
---

Los nuevos programas computacionales de simulación numérica, los sistemas de cementación primaria que no dañan el medio ambiente y el soporte profesional de campo que se brinda a nivel mundial, ayudan a alcanzar los objetivos de construcción de pozos óptimos , a la vez que aumentan la protección del ecosistema y un ahorro económico para evitar reparaciones mayores posteriores.

Por todo lo anterior, el objetivo de este trabajo es el de difundir la importancia y el uso que tienen los fluidos lavadores y fluidos espaciadores en la cementación primaria de un pozo petrolero.

Todos estos problemas y sus características, así como sus soluciones son tratados en esta recopilación bibliográfica, que es un resumen de los trabajos profesionales anteriores y actuales realizados sobre el tema de fluidos lavadores y fluidos espaciadores, en la cementación primaria para el interés de la ingeniería petrolera y el apoyo académico del alumno de la carrera de ingeniería petrolera de la Universidad Nacional Autónoma de México, además de industrias de servicios afines al ramo petrolero.

# CAPÍTULO I



GENERALIDADES

---

---

## CAPITULO 1.- GENERALIDADES

El tema de desplazamiento del lodo de perforación durante una operación de cementación, está a menudo rodeado por varios parámetros a considerar. Tales parámetros pueden ser la adherencia del lodo de perforación en las paredes del pozo, los tipos de fluidos lavador y espaciador utilizados para la remoción de lodo, la centralización de la tubería de revestimiento etc.

Para lograr con éxito la eliminación del lodo de perforación de las paredes del pozo, es necesario un trabajo completo de ingeniería, llevar acabo el plan integral y efectuar una buena cementación; teniendo presente este compromiso, algunas de las técnicas empíricas acostumbradas en los trabajos de cementación deben descartarse y utilizarse sólo aquéllas que tengan una buena base de ingeniería.

En este trabajo, se maneja el término de desplazamiento de lodo de perforación no como una simple operación, si no como la importante tarea de quitar el enjarre que se queda en las paredes del pozo, debido a la cotidianidad de las operaciones de perforación; dado que la bibliografía consultada utiliza este termino incluyendo los manuales y normas API referidas a dichas operaciones de cementación.

---

---

Empezaremos entonces esta recopilación bibliográfica por conceptos generales utilizados en la cementación primaria así como el plan integral ó metodología de la cementación requerido para llevar a cabo con éxito dicha operación.

---

## **1.1 CEMENTACIONES**

---

De manera general, son las operaciones con cemento que se efectúan con fines específicos en un pozo petrolero, tales como proveer aislamiento del pozo hacia la formación expuesta, dar estabilidad mecánica al pozo, anclaje de posteriores tuberías de revestimiento, etc.

---

## **1.2 CLASIFICACION DE LAS CEMENTACIONES**

---

Se clasifican de acuerdo con los objetivos que se persiguen en:

- CEMENTACIÓN PRIMARIA.
  - CEMENTACIÓN FORZADA.
  - TAPONES DE CEMENTO.
- 

### **1.2.1 CEMENTACION PRIMARIA**

---

La cementación primaria es la técnica empleada para colocar lechadas de cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y las paredes del pozo.

---

---

---

---

La lechada de cemento es una mezcla de agua, cemento, y aditivos; la tubería de revestimiento es un tubular que es utilizado en los pozos para evitar el derrumbe del mismo y sirve como un elemento de sello para aislar formaciones de diferente naturaleza.

El cemento entonces se endurece y forma un sello hidráulico en el pozo, evitando la migración de fluidos de la formación hacia el espacio anular, a los yacimientos de menor presión ó la superficie. La cementación primaria es por consiguiente, una de las etapas más críticas durante la perforación y terminación de un pozo. Este procedimiento debe ser cuidadosamente planificado y ejecutado, debido a que hay una sola oportunidad para realizar el trabajo exitosamente.

La cementación primaria, requiere de una adecuada planeación para seleccionar los sistemas de cemento y fluidos lavadores y espaciadores que deberán emplearse, así como para definir las condiciones de desplazamiento de estos sistemas para obtener una buena adherencia entre las fases formación-cemento-tubería y asegurar un sello efectivo que aisle los intervalos perforados y soporte la tubería.

Los materiales, herramientas, equipo y técnicas que pueden utilizarse, varían dependiendo de las condiciones del pozo, profundidad, y personas que planeen el trabajo. Una cementación primaria exitosa representa un desafío constante y requiere de conocimientos y tecnología actualizados.

---

---

## **1.2.2 CEMENTACION FORZADA**

---

Ésta es una medida correctiva a una cementación primaria defectuosa y consiste en inyectar cemento a presión a través de disparos ó ranuras en la tubería de revestimiento al espacio anular.

---

## **1.2.3 TAPONES DE CEMENTO**

---

Los tapones comprenden un cierto volumen de lechada de cemento, colocado en el pozo en el interior de la tubería de revestimiento. Los objetivos que se persiguen principalmente son: Desviar la trayectoria del pozo arriba de una herramienta que obtura el pozo ó para iniciar la perforación direccional, taponar una zona del pozo ó el pozo en si, también para resolver un problema de pérdida de circulación en la etapa de perforación.

---

## **1.3 DESCRIPCIÓN DE LA CEMENTACIÓN PRIMARIA**

---

La cementación primaria es el proceso que consiste en colocar cemento en el espacio anular, entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta del pozo, asegurando un sello completo y permanente, como se muestra en la figura 1.1.

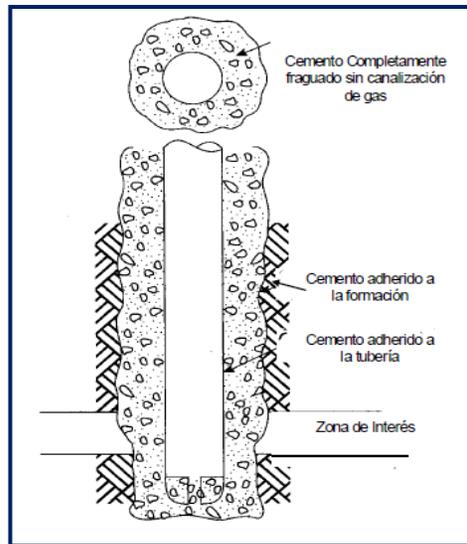


Figura 1.1 cementación primaria

## 1.4 METODOLOGÍA REQUERIDA

El ingeniero encargado de diseñar la cementación, además de conocer el objetivo de la operación, requiere la siguiente información:

- a. Datos del estado mecánico del pozo..
- b. Análisis de pozos de correlación.
- c. Cálculos de volumen, densidad, reología, gasto, etc.
- d. Generar modelos matemáticos para ensayos de prueba y error.
- e. Centralización de la tubería de revestimiento en el pozo.
- f. **REMOCION DE LODO PARA UNA ADECUADA CEMENTACIÓN PRIMARIA.**
- g. Diseño de la lechada.
- h. Selección de accesorios.
- i. Aplicación del trabajo.

---

---

Actualmente la tendencia en el diseño de cementaciones se enfoca a la selección del sistema de lechada que permitirá soportar los esfuerzos a los que estará sometida la tubería de revestimiento, durante las etapas de perforación, terminación, producción y reparación.

---

## **1.4.1 INFORMACIÓN BÁSICA**

---

Se requiere de conocer los datos del estado mecánico del pozo como: diámetro del pozo descubierto, profundidad, desviación, diámetro, peso, grado de la TR a cementar y de la TR anterior.

Datos de la formación temperatura de fondo estática y circulante, tipo de formación, presión de poro y presión de fractura.

Datos de fluidos involucrados en la cementación, y por ende, es indispensable conocer el tipo de reología, la densidad del lodo de perforación de la lechada de cemento de los fluidos lavadores y espaciadores.

Se recomienda efectuar pruebas de compatibilidad cemento-lodo, lodo-fluido espaciador, y fluido espaciador-cemento, para evitar reacciones indeseables entre los fluidos.

---

## **1.4.2 CÁLCULOS**

---

Los cálculos se realizan de acuerdo a la geometría del pozo, teniendo en cuenta el estado mecánico del mismo, pues estos cálculos se refieren principalmente

---

---

a volúmenes desplazados; deberá considerarse el registro de calibración y las cimas de cemento requeridas, cuando se vaya a ejecutar el trabajo.

El cálculo de volumen de cemento incluye; determinar las toneladas de cemento y agua requerida, el tipo de sistema y densidad de cemento a utilizar, conocer el rendimiento y requerimiento de agua para la lechada.

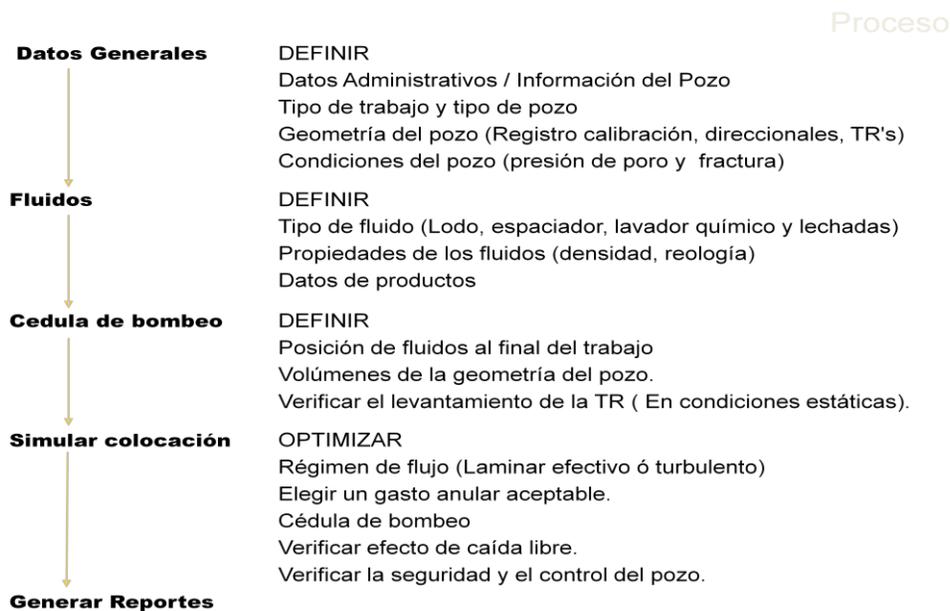
#### Determinación de los volúmenes de baches Lavador, Espaciador

- El bache lavador esta en función de la base del lodo de perforación y puede ser agua o diesel con un surfactante, su densidad es normalmente de alrededor de  $1.0 \text{ gr/cm}^3$  y su función es remover el fluido de perforación de la tubería y la formación, además de eliminar el enjarre.
- La densidad del bache espaciador y reología esta en función de la densidad del lodo y de la lechada, su función principal consiste en separar el fluido de perforación con el cemento y adicionalmente ayuda en la remoción del lodo, acondicionando el pozo para la cementación.

Se recomienda que el volumen de baches cubra al menos 150 m lineales en el espacio anular ó 10 min de contacto, sin embargo se debe considerar la capacidad de los equipos para su preparación.

## 1.4.3 GENERAR MODELOS MATEMÁTICOS COMPUTACIONALES PARA ENSAYOS DE PRUEBA Y ERROR.

A continuación se enlistan los datos que están involucrados en un modelo matemático para ensayos de prueba y error en los trabajos de cementación primaria.



Uno de los parámetros principales durante el diseño de la cementación es el cálculo de la Densidad Equivalente de Circulación DEC, durante la operación, se pueden usar modelos matemáticos computacionales o emplear la ecuación siguiente:

$$DEC = 0.7045 \left( \frac{P_A + P_{FA}}{H} \right) \dots\dots\dots 1.1$$

---

---

Los modelos matemáticos computacionales además de calcular la Densidad Equivalente de Circulación durante la cementación nos permite ajustar los gastos y en su caso, densidades y longitudes de los baches ó lechadas a emplear.

Estos Modelos matemáticos computacionales se pueden ajustar con información real del pozo obtenida de: Registros tomados en tiempo real, con los valores reales de gradiente de presión de formación y gradiente de presión de fractura.

---

## 1.4.4 CENTRALIZACIÓN DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO EN EL POZO

---

La centralización de una tubería depende del espaciamiento entre centradores y no de la resistencia de estos.

La centralización de una tubería mejora la eficiencia de desplazamiento y por lo tanto la calidad de la cementación.

En la figura 1.2 se ilustra esquemáticamente la mínima centralización, Stand off, requerida para tener una buena cementación.

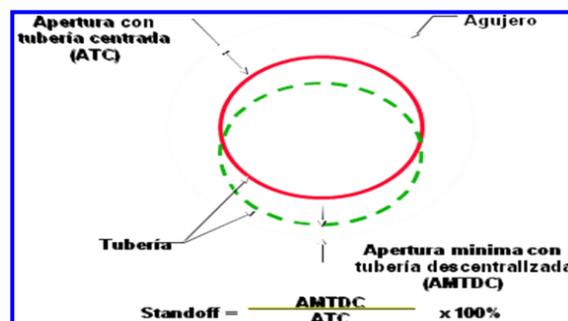


Fig. 1.2 Mínimo Stand off 80 %

---

---

Cuando no se cuenta con un modelo matemático computacional de centralización:

- Usar centradores rígidos entre tuberías y cabezales.
- En tuberías superficiales e intermedias colocar uno arriba de la Zapata y uno por junta en el fondo, después cada 2 a 4 juntas dependiendo de la profundidad.
- Cuando la tolerancia del agujero sea pequeña usar centradores para agujeros reducidos.
- En pozos horizontales para mantener una centralización óptima se recomiendan 2 centradores por junta.

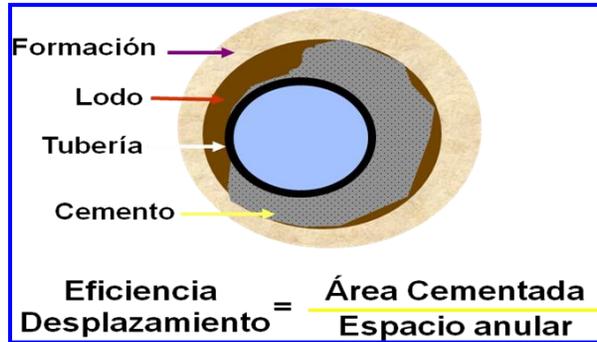
---

## 1.4.5 REMOCIÓN DEL LODO

---

Aspectos más importantes antes de cementar, es la limpieza del pozo, controlar y optimizar las propiedades del lodo, por lo que se recomiendan viajes cortos para reconocimiento, también verificar eficiencia de circulación, pues debe estar en circulación más del 95% del lodo en el pozo.

Para el acondicionamiento del lodo se recomienda romper el esfuerzo de geles, bajar la viscosidad plástica y punto de cedencia; los sólidos de perforación deben ser menores del 10%; se requiere determinar el gasto para asegurar tener flujo en el espacio anular. Para desplazar el lodo del espacio anular se necesita optimizar la colocación de la lechada y la centralización de la TR, Stand Off > 80%; movilización de la tubería de revestimiento.



La figura 1.3 ilustra la eficiencia de desplazamiento de lodo de perforación.

### Régimen de remoción de lodo

El régimen turbulento es el más usado por sus características; el gasto crítico, necesario para alcanzar régimen turbulento, depende de: reología del fluido, espacio anular, gradiente de fractura de la formación.

En la optimización de las propiedades de la lechada de cemento, se requiere de mínima viscosidad plástica y punto de cedencia sin tener asentamiento y pérdida de filtrado y agua libre controladas.

El uso de lavadores químicos y espaciadores, requiere de 10 minutos de tiempo de contacto en la zona de interés; la densidad del espaciador debe ser cercana a la del lodo.

El régimen laminar se deberá usar cuando no podamos alcanzar el régimen turbulento, debemos asegurarnos de tener un volumen equivalente a 150 metros de tirante en el espacio anular, en régimen laminar efectivo, para tener una adecuada remoción de lodo.

---

---

## CRITERIOS PARA ALCANZAR RÉGIMEN LAMINAR:

### 1. Diferencia de densidades

La densidad del fluido que desplaza es mayor que la del fluido que es desplazado, por ejemplo:

Densidad de espaciador debe ser 10% > Densidad del lodo .

Densidad del cemento debe ser 10% > Densidad del espaciador .

### 2. Gasto mínimo

Se refiere al gasto mínimo que debe alcanzarse para asegurar que la diferencia de presiones sea mínima, asegurando que todo el lodo este en movimiento en el espacio anular. Esta en función de la reología y la centralización, gasto mínimo,  $Q_{min}$ .

### 3. Diferencia de reologías

Para asegurar que la presión por fricción del fluido desplazante sea mayor que la del fluido desplazado, el fluido desplazante debe tener reologías mayores.

$$(\Delta P / \Delta L)_{Desplazante} > 20\% (\Delta P / \Delta L)_{Desplazado} \dots\dots\dots 1.2$$

### 4. Gasto máximo

Las velocidades deben ser iguales alrededor de la TR, por lo que se establece un gasto máximo para que se cumpla este criterio, depende de la centralización y de la diferencial de densidades.

---

---

Debido a la Incompatibilidad entre fluidos de desplazamiento y desplazados, se obtienen reacciones interfaciales indeseadas, alta reología, viscosidades y gelificación, cambios en las propiedades de la lechada del cemento, alteración del tiempo de bombeo, Incremento en la pérdida de fluido, reducción en el esfuerzo compresivo y la adherencia del cemento.

La prevención para evitar esta incompatibilidad es desplazar tapones de barrido para remover lodo ,como son lavadores químicos y espaciadores; hacer pruebas de compatibilidad y adaptar reologías y gastos.

---

## **1.4.6 DISEÑO DE LA LECHADA**

---

Primero tenemos que hacer una selección del sistema de cemento, ya sean cementos convencionales, cementos ligeros de alto esfuerzo compresivo, cementos ultraligeros de alto esfuerzo compresivo, cementos espumados, cementos de alta densidad, cementos para aplicaciones especiales en aguas profundas, multilaterales, geotérmicos, salados, solubles, de ángulo recto, tixotrópicos, etc.

### **Factores que influyen en el diseño de la Lechada**

La densidad del cemento en este punto, se toma en cuenta la presión de poro y fractura, las propiedades del cemento y el costo.

El tiempo de bombeo, considerando el tipo y procedimiento de trabajo y temperatura, presión y profundidad.

La pérdida de filtrado debido a el tipo de formación y permeabilidad, las restricciones anulares y las zonas de gas.

Otro factor que influye en el diseño de la lechada es la reología, la cuál depende de la homogeneidad de la mezcla, presión de fricción y régimen de desplazamiento.

El desarrollo de la resistencia compresiva depende de la temperatura y el tiempo de fraguado.

La estabilidad de la lechada de cemento esta regida por el agua libre y la sedimentación.

#### Resumen de aditivos y su efecto:

Tipo aditivo	Beneficio Principal	Posible efecto secundario
<i>Entendedor</i>	Baja la densidad de la lechada. Rendimiento más alto de la lechada	Altera la viscosidad de la lechada. Prolonga el Tiempo bombeable. Baja los esfuerzos compresivos inicial y final
<i>Agente densificante</i>	Densidades de la lechada más altas	Aumenta la reología del lodo. Baja el esfuerzo compresivo final. Sedimentación.
<i>Acelerador</i>	Acorta el tiempo bombeable. Esfuerzo compresivo inicial más alto.	Altera la viscosidad de la lechada. Interfiere con las propiedades de control de filtrado y con los dispersantes
<i>Retardador</i>	Prolonga el tiempo bombeable	Altera la viscosidad de la lechada. Baja el esfuerzo compresivo inicial. Aumenta el esfuerzo compresivo final
<i>Controlador de filtrado</i>	Reduce la deshidratación de la lechada	Altera el tiempo bombeable y la viscosidad. Altera los esfuerzos compresivos iniciales y finales.
<i>Dipersante</i>	Baja la viscosidad de la lechada	Aumenta el tiempo bombeable. Altera los esfuerzos compresivos iniciales y finales. Ayuda en el control de fluido. Puede ocasionar agua libre y sedimentación.
<i>Material de pérdida de circulación</i>	Previene la pérdida de lechada en la formación.	Previene la pérdida de lechada en la formación.
<i>Cloruro de Sodio</i>	Mejora la adherencia en zona en zonas de sal.	Acorta TB (<10% BWOW). Aumenta TB (>18% BWOW). Baja la viscosidad de la lechada y aumenta el esfuerzo compresivo inicial
<i>Arena/Harina Sílica</i>	Previene la retrogresión del cemento a temperaturas mayores de 230°F (110°C)	Mayor rendimiento, altera el tiempo bombeable y aumenta la viscosidad de la lechada
<i>Agente antisedimentante</i>	Previene la sedimentación y el agua libre	Aumenta el tiempo bombeable y la viscosidad
<i>Antifoam Agent</i>	Reduce el aire entrampado en el mezclado de la lechada.	
<i>Latex</i>	Control de la migración de gas. Mejora la adherencia. Reduce la deshidratación de la lechada.	Altera el tiempo bombeable y la reología
<i>Yeso</i>	Mejora la adherencia. Desarrollo rápido del esfuerzo compresivo	Altera el tiempo bombeable.

**Tabla 1.1 Resumen de aditivos y sus efectos.**

---

---

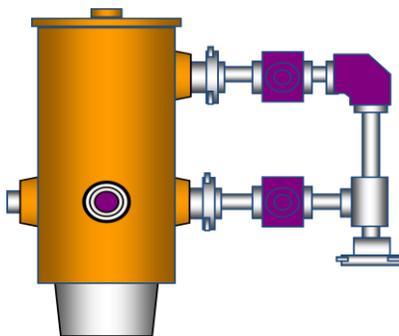
## 1.4.7 SELECCIÓN DE ACCESORIOS

---

### Cabezas de cementación

Se coloca en la parte superior del tubo que asoma a la superficie. Se conecta por medio de "mangueras de acero" a los sistemas de mezclado y bombeo. Posee dos cámaras de alojamiento para los tapones de cementación y válvulas que permiten la operación completa.

**Un tapón**



**Doble tapón**

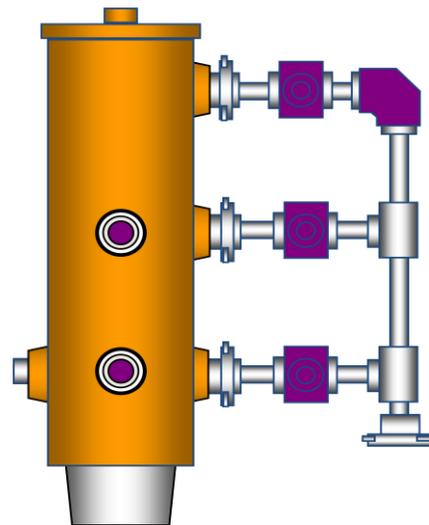


Figura 1.4 cabezales de cementación

---

---

## Tapones

El objetivo de los tapones es que los fluidos bombeados al pozo alcancen el fondo sin contaminarse.



Figura 1.5 Tapones

Los tapones permiten:

1. Remover el enjarre de lodo.
2. Separar el cemento del lodo y baches.
3. Prevenir el sobre desplazamiento.
4. Indicación en superficie de la colocación.

---

---

## Zapata

Las zapatas se bajan en el primer tubo de la tubería de revestimiento, su función

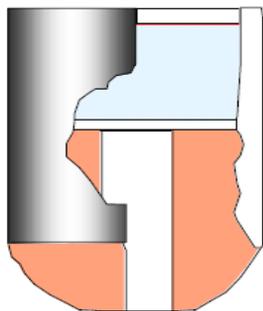
es:

- Guiar la tubería de revestimiento a través de las irregularidades del pozo.
- Reforzar el tubo del fondo de la tubería de revestimiento.

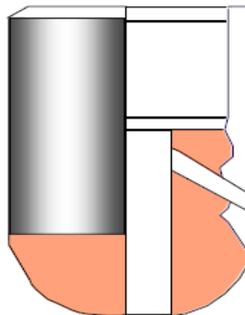
La diferencia principal entre una zapata guía y una flotadora es, que esta última contiene una válvula de compresión que sirve para:

- Limitar la circulación de fluido en una sola dirección (fuera de la tubería de revestimiento).
- Evita el re-ingreso de la lechada de cemento dentro de la tubería de revestimiento cuando la presión hidrostática es mayor en el espacio anular que en el interior de la tubería.

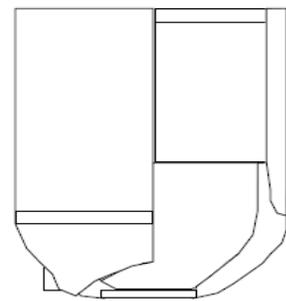
## Zapatas Guías



**Zapata Guía**  
- Punta de Zapata Guía  
de Cemento



**Zapata Guía**  
-Chorro Inferior



**Zapata Guía**  
- Punta de Zapata Guía  
de Aluminio

Figura 1.6 Zapata guía

---

---

## Coples

Se utilizan principalmente para proporcionar un asiento para la fijación de tapones de cemento, quedando atrapado cemento contaminado dentro de la tubería entre la zapata y el cople.

Cuando el tapón de cementación superior esta colocado en el cople de flotación, este corta la circulación de fluido y evita el sobre desplazamiento del cemento y el re- ingreso de la lechada de cemento dentro de la tubería de revestimiento cuando la presión hidrostática es mayor en el espacio anular que en el interior de la tubería.



1.7 Figura coples

---

## 1.4.8 APLICACIONES DEL TRABAJO

---

Deben llevarse acabo juntas previas al trabajo para evitar malos entendidos, retrasos o detalles que puedan ser críticos en el desarrollo de la cementación. Definirse los roles de trabajo y acciones en caso de contingencias.

---

---

Asegurar la calibración adecuada de todo el equipo antes de comenzar el proceso de mezclado.

El trabajo debe estar bajo supervisión constante del ingeniero a cargo, para asegurar el éxito.

### **Consecuencias de una mala ejecución:**

<b>Desviación</b>	<b>Efecto</b>
Incorrecta colocación de escariadores y centralizadores Acondicionamiento pobre del pozo Incorrecto acondicionamiento del lodo	Reduce la eficiencia de la remoción de lodo
Aditivos incorrectamente mezclados / prehidratados y/o agregados	Altera la eficiencia del sistema (Lavador químico, espaciador y cemento)
Densidad de la lechada incorrecta	Altera la eficiencia del sistema (reología, agua libre/asentamiento, tiempo bombeable, etc)
Incorrecto mezclado y/o gastos de desplazamiento Tiempo excesivo en el lanzamiento de tapones	No se alcanza el tiempo de contacto mínimo
TR sin movimiento ó rotación	Perjudica la remoción de lodo
Insuficiente energía de mezcla	Altera las propiedades y eficiencia del cemento

Tabla 1.2 Consecuencias de una mala ejecución del trabajo de cementación primaria.

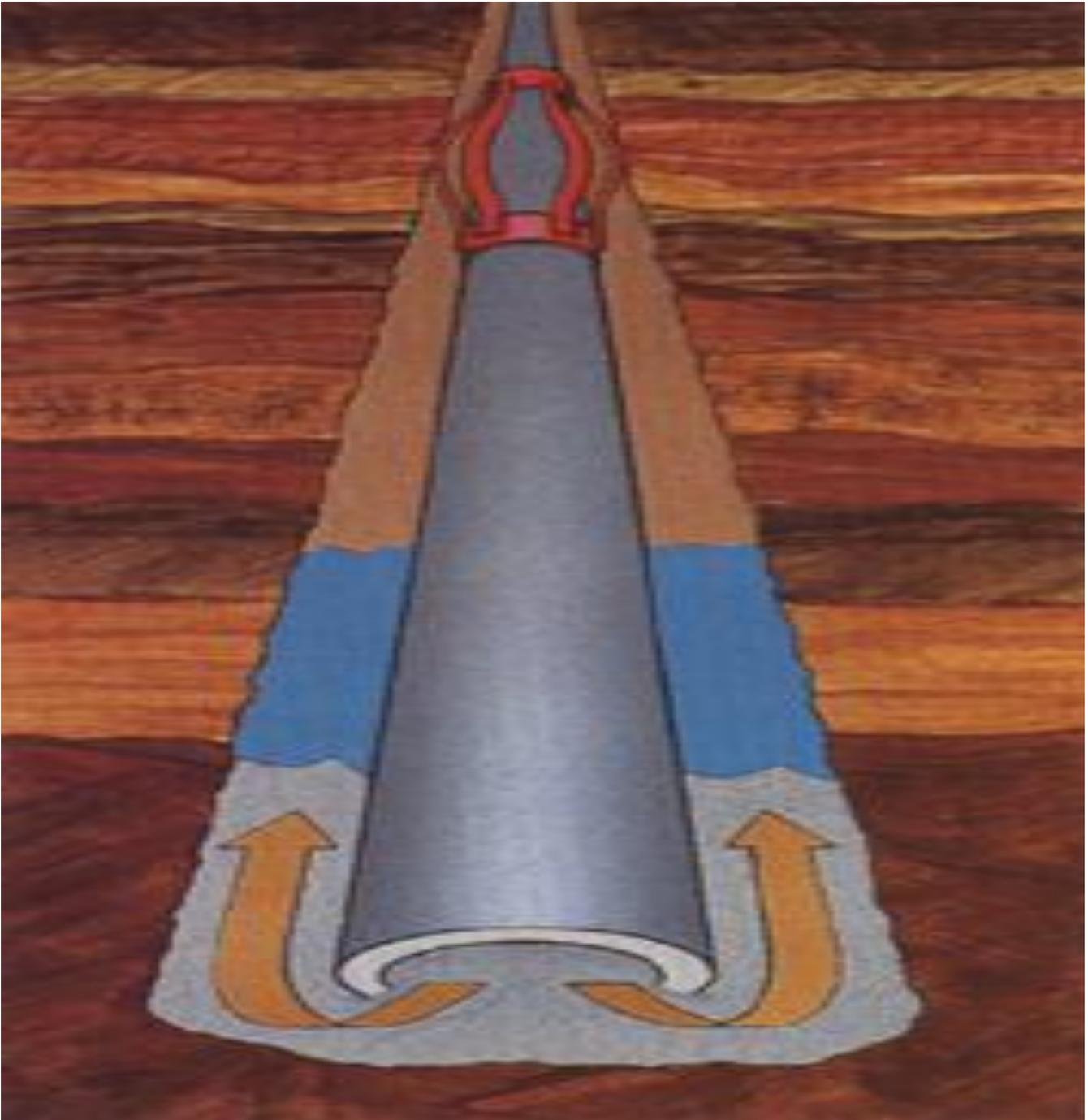
- **Evaluación del Trabajo de cementación primaria.**

La evaluación de una cementación se realiza por métodos indirectos:

- **Registro de parámetros de la operación vs Diseño.-** nos indica en forma preliminar posibles anomalías.
- **Registro de cementación.-** En una forma cualitativa que nos determina la adherencia del cemento entre agujero y TR.
- **Consistencia del cemento.-** Al rebajar los accesorios y el cemento, dependiendo de la velocidad de penetración de la barrena, nos determina la dureza del cemento.

La ejecución de la cementación nos da una base para determinar la calidad de la cementación.

## CAPÍTULO II



**Aspectos que determinan la selección y aplicación de los fluidos lavadores y espaciadores.**

---

---

## **CAPITULO 2.- ASPECTOS QUE DETERMINAN LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE LOS FLUIDOS LAVADORES Y ESPACIADORES**

Estudios exhaustivos han demostrado que el factor más importante que afecta la colocación del cemento es el desplazamiento eficaz del enjarre en el espacio anular. Dichos estudios han comprobado que la mayoría de las cementaciones no exitosas se pueden atribuir al desplazamiento incompleto del enjarre en el espacio anular, resultando en la formación de canales de lodo en el cemento. Estos canales de lodo proporcionan un conducto para la migración de fluidos que causan la pérdida de producción ó corrosión de la tubería de revestimiento, y no permiten que el cemento forme un correcto sello.

---

### **2.1.- DIFERENCIA ENTRE FLUIDO LAVADOR Y FLUIDO ESPACIADOR**

---

Aunque los términos de “espaciadores” y “lavadores” son a menudo usados intercambiamente, ellos tienen diferentes significados y sirven para diferentes propósitos. Por esta razón, se han dividido.

Los lavadores arrastran y remueven los residuos de fluido que los han precedido en los procesos de bombeo. Estos pueden ser tan simples como agua ordinaria ó pueden contener agentes químicos para darle propiedades especiales y mejorar su efectividad, mientras que los espaciadores son un fluido para separar los lodos de perforación y las lechadas de cemento.

---

---

Aunque haya similitudes en la función de los espaciadores y lavadores, habrá diferencias también; el concepto tradicional de un lavador ha sido una baja viscosidad que puede alcanzar flujo turbulento en un rango de bombeo bajo.

Recientemente, las condiciones de perforación requieren de fluidos sofisticados capaces de ser modificados para propósitos como:

- Acarrear agentes densificantes para mantener la presión hidrostática.
- Control de pérdida por circulación.
- Dejar la superficie de la formación mojada por agua cuando se desplacen fluidos base aceite que contengan surfactantes.

Los lavadores 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, mientras que los espaciadores no necesariamente recaen en turbulencia; en vez de esto, ellos pueden utilizar viscosidad o densidad para un desplazamiento eficiente, con flujo laminar.

La diferencia primordial entre los espaciadores y lavadores es que los espaciadores están diseñados con un punto de cedencia, el cuál permite la incorporación de materiales densificantes y controladores de pérdida de circulación.

---

---

## 2.2 DEFINICIÓN

---

**Fluido Lavador:** Fluido usado para arrastrar y remover los residuos de fluido de perforación que van quedando en los procesos de bombeo. Estos pueden ser tan simples como agua ordinaria ó pueden contener agentes surfactantes para darle propiedades especiales y mejorar su efectividad. Un fluido lavador puede ser diseñado para usarse con cualquier tipo de lodo de perforación, ya sea base agua ó base aceite.

**Fluido Espaciador:** Es un fluido para separar el lodo de perforación y las lechadas de cemento. Un espaciador puede ser diseñado para usarse con lodos base agua ó base aceite, dejar preparado el pozo y la formación para efectuar la operación de cementación.

Los fluidos espaciadores son colocados entre el fluido de perforación y el compuesto de cemento durante la cementación primaria o secundaria.

---

## 2.3 FUNCIONES Y CLASIFICACIÓN

---

Los espaciadores y lavadores proveen una mejor remoción de lodo de perforación y juegan un papel esencial en la obtención de la adherencia del cemento a la formación, reduciendo la migración de fluido en la cementación primaria por medio de la densidad. En la figura 2.1 se muestra el tren de fluidos desplazados durante la cementación en donde la densidad es un factor importante para llevar a cabo dicho desplazamiento.

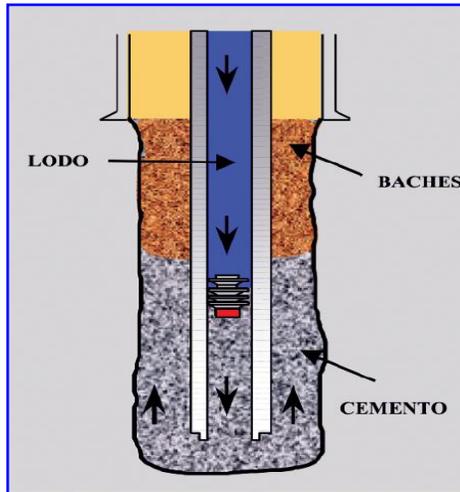


Figura 2.1 espaciadores

---

## 2.3.1.- FUNCIONES

---

### FLUIDOS LAVADORES.

Un lavador es usado en operaciones de cementación para realizar las siguientes tareas:

- Remover lodo y enjarre.
- Dejar superficie mojadas por agua.
- Lograr flujo turbulento.
- Proteger las formaciones.
- Incompatible con el cemento y el lodo de perforación.

Recientemente, las condiciones de perforación han traído más fluidos sofisticados, capaces de ser modificados para propósitos como:

- 
- 
- Acarrear agentes de peso como densificantes, para mantener la presión hidrostática.
  - Control de pérdida por circulación.
  - Dejar la superficie de la formación mojada en agua cuando se desplacen fluidos base aceite que contengan surfactantes.

Los fluidos lavadores se diferencian de los fluidos espaciadores en que estos normalmente diluyen el fluido de perforación y lo remueven a través de condiciones altas de flujo turbulento, mientras que los espaciadores no necesariamente recaen en turbulencia; en vez de esto, ellos pueden utilizar viscosidad o densidad para un desplazamiento eficiente.

## **FLUIDOS ESPACIADORES**

Los resultados de laboratorio y de campo muestran que los fluidos espaciadores pueden ser de gran ventaja para mantener el fluido de perforación y compuestos de cementación separados. Los espaciadores también ayudan de manera efectiva a remover el lodo de perforación.

Un espaciador es usado en operaciones de cementación para realizar las siguientes tareas:

- Separar el fluido de perforación de la lechada de cemento para eliminar la compatibilidad potencial y evitar su contaminación.

- 
- 
- Pueden mejorar la eficiencia de desplazamiento al permitir el flujo turbulento en rangos de bombeo razonables según sus propiedades reológicas.
  - Remover el fluido de perforación y el enjarre.
  - Proteger la formación.
    - Controlando la presión de formación.
    - Inhibiendo zonas sensibles al agua.

Con el objeto de completar estas tareas, el espaciador debe ser incompatible con la lechada y con el fluido de perforación. La compatibilidad en las interfaces donde los diferentes fluidos hacen contacto, nos lleva a un efecto de alta viscosidad. Este efecto puede ser desastroso en las siguientes situaciones:

- La masa del fluido incompatible es muy viscosa, para moverse y circular por el espacio anular, dando como resultado una fractura de formaciones susceptibles ó la terminación del trabajo.
- Los fluidos pueden circular por el espacio anular, pero sin ser desplazados completamente, por lo que es factible que sean depositadas contra la pared y el interior del pozo; mientras este proceso continúa, nuevas áreas de interfaces son expuestas y la secuencia es repetida, debido a que el cemento fluirá por donde encuentre menor resistencia, por lo que la canalización del cemento será signo de que no se logró una buena cementación.

---

---

La compatibilidad interfacial es un problema que un espaciador puede eliminar, aunque el fluido de perforación y la lechada se desplacen juntos. La contaminación no necesariamente puede ser un problema tan serio como la compatibilidad interfacial, pero debe ser evitada porque afectará el desarrollo de esfuerzo compresivo y el tiempo de espesamiento de la lechada de cemento.

Los efectos de contaminación son difíciles de predecir y variarán de acuerdo a la naturaleza del contaminante.

El espaciador debe permanecer estable y ser fácilmente mezclado y manejado en el campo.

---

## **2.3.2.- CLASIFICACIÓN**

---

Los fluidos espaciadores pueden ser divididos en dos categorías. La mayoría son de base agua, en apego a las nuevas normativas ecológicas requeridas en la industria petrolera, mientras unos pocos son base aceite. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas.

Los actuales espaciadores basados en aceite, a menudo utilizan aceite sintético para evitar los problemas ambientales del aceite basado en hidrocarburos, como en el caso del diesel.

Los espaciadores basados en agua tienden a dejar el acero de la tubería de revestimiento humedecida con agua que proporciona la mayor adherencia del cemento.

---

---

Los espaciadores no densificados a menudo se conocen como cementos no densificados. El agua es un densificante común; estos son los más efectivos y económicos en lodos de baja densidad, que se aproximan a la densidad del cemento no densificado; son los más fáciles de situar en un flujo turbulento. A menudo, se utilizan aditivos que adelgazan el lodo de perforación ó que atacan químicamente el enjarre de lodo.

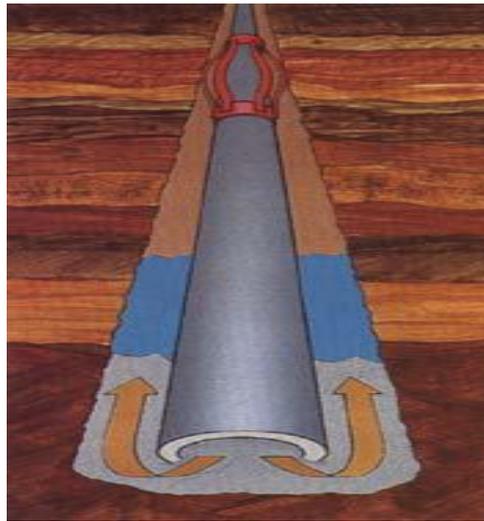


Figura 2.2 uso de espaciadores

Para lodos densificados, los espaciadores deben diseñarse con materiales densificantes, que hagan que el espaciador sea igual ó de mayor densidad que el lodo. Un espaciador de una menor densidad dará como resultado una mala eficiencia de desplazamiento de lodo. La viscosidad de los espaciadores densificados puede modificarse para incrementar aún más el desplazamiento del lodo.

---

---

## 2.4.- USO DE FLUIDOS LAVADORES Y FLUIDOS ESPACIADORES

---

Anteriormente, se sabe que algún tipo de fluido espaciador debería ser colocado entre el lodo y el cemento. Con lodos base agua que se han tratado poco químicamente, un pequeño volumen de agua fresca se bombea como fluido espaciador entre el lodo y el cemento, obteniendo resultados satisfactorios. Los investigadores han encontrado que cuando los lodos son tratados, la incompatibilidad hace muy difícil el proceso de remoción del lodo, que ha conducido al desarrollo de fluidos espaciadores incompatibles con el lodo y el cemento.

Uno de los pasos intermedios en los procesos de desarrollo fue la "lechada raspadora". En los años 40's. se conocía que con altos gastos de bombeo y usando agua como fluido espaciador, se obtenía una mejor remoción del lodo. Fue hasta los años 60's. que se reconoció que un fluido en régimen de flujo turbulento, aproximadamente en contacto 10 minutos con el punto de interés, podría también proporcionar una mejor remoción del lodo; también se concluyó que este fluido, en régimen de flujo turbulento, debe poseer características de baja pérdida de fluido para ser capaz de conservar las propiedades reológicas a lo largo del desplazamiento.

Posteriormente, en los años 70's. y 80's. se reconoció que los fluidos incompatibles de la "lechada raspadora" y la mayoría de los lodos, podrían ser tratados mediante el uso de un fluido espaciador, capaz de desplazarse

---

---

en régimen de flujo turbulento a razonables gastos de bombeo, y aún así, mantener la suspensión de sólidos requerida para obtener una densidad mayor que la del lodo. Estos fluidos espaciadores generalmente son polímeros en soluciones acuosas capaces de mantener los sólidos en suspensión.

---

## **2.5.- REMOCIÓN LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN Y ENJARRE**

---

La estabilidad del pozo se obtiene controlando el filtrado y un buen diseño de la composición química del lodo de perforación. El enjarre es una capa de sólidos concentrados del fluido de perforación que se forma en el pozo, alrededor de las zonas permeables; el filtrado es la porción líquida del fluido de perforación que pasa a través del enjarre hacia la formación.

La presión hidrostática actúa como una fuerza que sostiene las paredes del pozo. Esta fuerza actúa a través del enjarre, contribuyendo físicamente en la estabilidad de la formación.

Los fluidos con una mala calidad de enjarre, son gruesos, causan condiciones adversas de pozo apretado, generando pegaduras de tubería, dificultades para correr la tubería de revestimiento y trabajos de cementación deficientes.. El éxito de una buena cementación requiere, en primer término, de la remoción de los contaminantes; principalmente, el lodo de perforación impregnado en las paredes del pozo.

---

---

Dado que la presión de la formación debe contenerse durante esta operación de limpieza del pozo, el enjarre que se remueven, deben ser desplazados con un fluido de mayor densidad con un espaciador bombeado detrás del lodo y delante del cemento. El espaciador está diseñado para mantener los fluidos de perforación separados del cemento mientras éste se bombea a través de la tubería de revestimiento hacia el interior del espacio anular, y se diseña generalmente con una viscosidad similar ó mayor que la del fluido de perforación.

Además de mantener el control del pozo, el fluido lavador sirve como un químico que limpia el lodo de perforación proveniente de los espacios anulares existentes entre las distintas tuberías de revestimiento y entre la tubería de revestimiento de producción y el pozo. Si el espaciador deja atrás los fluidos de perforación, o si permite que se mezclen con el cemento, es poco probable que se logre una buena adherencia entre el cemento y la formación, ó entre el cemento y la tubería de revestimiento.

Dado que estos contaminantes permanecen en estado líquido, pueden formar canales de comunicación entre zonas a lo largo del pozo o de la tubería de revestimiento.

La limpieza eficiente del pozo no es el único requisito para un buen aislamiento. Un pozo perforado en forma deficiente puede tener zonas desmoronadas, que son difíciles de limpiar y pueden contener partículas de fluidos de perforación gelificados. Estos fluidos gelificados pueden ingresar en la lechada de cemento y contaminarla.

---

---

Para evitar dejar un enjarre de filtración pesado, que es imposible de remover, se deben modificar las propiedades del fluido de perforación a fin de que se adecuen para una buena limpieza del pozo. Para la obtención de los mejores resultados, debe reducirse la densidad del lodo, el límite de elasticidad, la viscosidad plástica y la resistencia de gel.

La reología del lodo puede reducirse mediante el agregado de agua ó dispersantes al sistema y circular el fluido hasta que sus propiedades alcancen el rango deseado. Esto requiere de la circulación de un volumen ya modificado con los dispersantes ó agua en el pozo como mínimo y en la medida de lo posible, deberá efectuarse antes de remover la columna de perforación para evitar que el lodo se gelifique mientras se encuentra estacionario durante las operaciones de extracción de la tubería.

Hay varias opiniones acerca de la remoción de fluidos de perforación y enjarre. En algunos pozos no ocurrirían daños si todo el enjarre fuera removido de la cara de la formación. En otros pozos donde las formaciones son no consolidadas contienen arcillas hidratantes - lutitas - , será preferible dejar al menos una capa lo más delgada posible de enjarre, esto evitará que haya cambios de enjarre en la formación y por lo tanto, ayudará a controlar las perdidas de fluido y posibles derrumbes de la formación.

---

---

El espaciador deberá ser diseñado para desplazar química y físicamente el lodo y remover algo del enjarre. Los resultados del laboratorio muestran que los espaciadores pueden ayudar a remover el lodo y enjarre cuando son formulados con surfactantes o algún material angular.

La importancia del punto de cedencia de un espaciador ha sido discutida; es una propiedad muy importante que permite a un material angular, funcionar adecuadamente. Cuando el fluido espaciador es bombeado a través del pozo, el punto de cedencia debe ser mantenido en el rango de temperatura del pozo, de manera que el material angular permanezca suspendido, pero también permita moverse dentro del fluido espaciador para proveer una acción abrasiva.

Se debe tomar en consideración el volumen de espaciador a usar. Es conveniente usar un volumen de espaciador que dé al menos 4 minutos de contacto con el espacio anular. Las experiencias han mostrado que muchas veces al usar un volumen inadecuado de espaciador, este se sobrecarga de sólidos. Este exceso de sólidos puede impedir el funcionamiento adecuado del espaciador durante el resto del trabajo.

El fluido de perforación y el cemento, usualmente contienen químicos para proteger lutitas sensibles al agua y controlar la pérdida de fluidos en las formaciones. Los fluidos espaciadores deben ser diseñados para proteger las formaciones sensibles al agua y controlar la pérdida de fluidos. Si la pérdida de fluido no es controlada y el

---

---

filtrado se pierde del espaciador, la efectividad del espaciador puede ser alterada e incluso, reducida.

Para mantener la efectividad del espaciador, se necesitan de aditivos químicos que mantengan ó modifiquen la tensión interfacial, siendo esta una fuerza que existe a nivel de toda interface entre dos medios diferentes, es decir, entre un sólido ó un liquido y un gas. La tensión entre medios idénticos, como pueden ser dos sólidos, dos líquidos ó también entre un liquido y un sólido es generalmente llamado tensión interfacial.

---

## **2.6 FACTORES PRINCIPALES QUE AFECTAN LA REMOCIÓN DEL LODO DE PERFORACIÓN.**

---

Es imprescindible que el lodo y el enjarre sean extraídos del pozo para obtener una buena cementación. Los factores principales que afectan la remoción del lodo son:

- Propiedades del fluido de perforación.
- Movimiento de la tubería.
- Centralización de la tubería.
- Gasto real bombeable.
- Espaciadores ó productos de limpieza removedores.
- Tiempo de contacto del fluido lavador y del fluido espaciador sobre la pared del pozo.
- Diferencias de densidad utilizadas durante la operación.

---

---

En este capítulo trataremos con más profundidad puntos importantes referentes a el tema de propiedades del fluido de perforación y el gasto de desplazamiento, dado que en los siguientes capítulos volveremos nuevamente a citar los factores restantes tales como, movimiento y centralización de la tubería de revestimiento, tiempo de contacto y diferencia de densidades.

---

## **2.7 REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS LAVADORES Y FLUIDOS ESPACIADORES.**

---

La reología analiza la deformación de la materia líquida por esfuerzos externos y el flujo resultante; también estudia la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte, además del impacto que este tiene sobre las características del flujo dentro de las tuberías y los espacios anulares.

El estudio de la reología, permite que los fluidos lavadores y espaciadores sean específicamente analizados en términos de:

- Remoción de lodo de perforación.
- Viscosidad.
- Densidad equivalente de circulación.
- Perfiles de velocidades de flujo.
- Gasto de bombeo.

---

---

## 2.7.1 REOLOGIA

---

Reología.- es la ciencia que trata de la deformación y del flujo de la materia. El uso de valores reológicos en las lechadas de cemento y en el lodo de perforación nos permite calcular los siguientes parámetros:

- La velocidad anular y el gasto de bombeo necesario para conseguir un flujo tapón, laminar o turbulento.
- La velocidad interior en la tubería.
- Las presiones de fricción que producen la lechada y el lodo de perforación al circular a través del pozo.
- La potencia hidráulica necesaria.
- El volumen de lechada, colchones lavadores y espaciadores.

---

## 2.7.2 VISCOSIDAD

---

En su sentido más amplio, la viscosidad se puede describir como la resistencia al flujo de una sustancia. Por definición la viscosidad ( $\mu$ ) se pueden describir como la relación del esfuerzo de corte ( $\tau$ ) a la velocidad de corte ( $\gamma$ ):

$$\text{Viscosidad}(\mu) = \frac{\text{Esfuerzo de Cortes}(\tau)}{\text{Velocidad de Corte}(\gamma)} \dots\dots\dots 2.1$$

---

---

## 2.8.3 ESFUERZO DE CORTE

---

Cuando un fluido está fluyendo, hay una fuerza en el fluido que se opone al flujo. Esta fuerza se llama esfuerzo de corte. Se puede describir como un esfuerzo de fricción que aparece cuando una capa de fluido se desliza encima de otra. El esfuerzo de corte ( $\tau$ ) representa las libras de fuerza por cien pies cuadrados ( $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$ ) requeridas para mantener la velocidad de corte.

---

## 2.7.4 VELOCIDAD DE CORTE

---

La velocidad a la cuál una capa pasa por encima de otra capa, se le llama velocidad de corte, por lo tanto, la velocidad de corte ( $\gamma$ ) es un gradiente de velocidad expresada en segundos<sup>-1</sup> ( $\text{seg}^{-1}$ ).

---

## 2.8 TIPOS DE FLUIDOS.

---

Basado en su comportamiento de flujo, los fluidos se pueden clasificar en dos tipos diferentes: fluidos newtonianos y no newtonianos, con ó sin punto de cedencia.

---

---

## 2.8.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

---

Son todos los fluidos cuya viscosidad permanece constante a toda velocidad de corte. En estos fluidos, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Los fluidos newtonianos típicos usados en operaciones de cementación son: el agua, algunos colchones lavadores, colchones químicos y aceites livianos.

---

## 2.8.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

---

Muchas lechadas de cemento exhiben un comportamiento no newtoniano muy complejo. Generalmente la viscosidad es una función de la velocidad de corte y del comportamiento del corte. Se debe diferenciar entre fluidos adelgazantes, en los cuales la viscosidad decrece con el incremento de la velocidad de corte y los fluidos dilatantes donde ocurre lo inverso. De manera general podemos decir que las lechadas de cemento caen dentro de la primera categoría y los modelos reológicos más usados para describir las propiedades de la lechada son el modelo de ley de potencia y el modelo plástico de Bingham.

Estos modelos son de mucha importancia, debido a que los fluidos lavadores y fluidos espaciadores, se comportan de acuerdo a estos modelos; en la fig. 2.3 se observa el comportamiento gráfico de los diferentes fluidos, con una breve explicación.

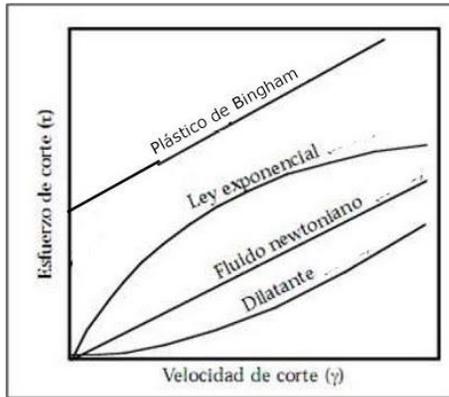


Fig. 2.3 Curvas de los distintos tipos de fluidos

### 2.8.3 MODELO PLÁSTICO DE BINGHAM.

Este modelo describe un fluido en el cuál se requiere una fuerza finita para iniciar el flujo, es decir, el punto cedente y que luego demuestre una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta ,conocida como viscosidad plástica. La ecuación para el modelo de Flujo plástico de Bingham es la siguiente:

$$\tau = P + PV * \gamma \dots \dots \dots 2.2$$

Donde:

$\tau$  = Esfuerzo de corte.

YP = Punto cedente o esfuerzo de corte a una velocidad de corte de cero (intersección de Y).

PV = Viscosidad plástica o tasa de aumento del esfuerzo de corte con el aumento de la velocidad de corte (pendiente de la línea).

$\gamma$  = velocidad de corte.



---

---

## 2.9.1 FLUJO LAMINAR

---

Las características principales presentadas por este perfil de flujo son:

- Velocidad de flujo moderada.
- El fluido fluye en línea recta y en paralelo al centro de la tubería.
- La velocidad del fluido en la pared de la tubería es cero.
- Máxima velocidad en el centro de la tubería.
- Genera moderado esfuerzo sobre el fluido.

---

## 2.9.2 FLUJO TURBULENTO

---

Las características principales presentadas por este perfil de flujo son:

- Velocidades de flujo altas.
- Perfil recto de velocidades, pero con movimientos caóticos, en forma de remolinos.
- Punto de velocidad máximo indefinible.
- Genera un máximo esfuerzo sobre el fluido.
- Se establece a temperaturas que no pasen el punto de ebullición.

Este tipo de perfil es el preferido siempre y cuando las condiciones de fondo de pozo lo permitan, muchas veces hay que disminuir las propiedades reológicas de las lechadas de cemento, agregando aditivos que reducen las pérdidas por fricción, etc.

---

---

## 2.9.3 FLUJO TAPON

---

El tipo de flujo aconsejable para la cementación de un pozo es el flujo turbulento, pero hay situaciones donde no es posible conseguir flujo turbulento por razones como:

- Geometría del pozo.
- Propiedades reológicas del fluido.
- Restricciones de presión.

Cuando se presentan estas situaciones, el tipo de fluido recomendado es el tapón, el cual presenta las siguientes características:

- Baja velocidad de flujo ,por ende, mayor área de contacto y alto contenido de sólidos.
- Perfil de velocidad recto y ordenado.
- Bajos esfuerzos de corte sobre el fluido, por lo que se presentan temperaturas medias ó altas.

---

## 2.9.4 TRANSICION ENTRE FLUJO.

---

El número de Reynolds es un valor el cual nos indica en que punto existe la transición de un perfil de flujo a otro, según los siguientes parámetros:

---

---

*$N_{Re} < 2100$  "Flujo laminar"*

*$2100 < N_{Re} < 3000$  "Zona de Transición"*

*$N_{Re} > 3000$  "Flujo Turbulento"*

En el rango entre 2100 a 3000 no se puede definir con precisión el perfil de flujo y este punto se conoce como zona de transición. Cuando se cementa en flujo tapón la mayoría de los trabajos indican que solo se puede remover el 60 % del lodo, sin embargo si se han tenido buenos pre-flujos, se puede conseguir mas de un 95 % , cuando es el caso de flujo turbulento, de remoción de lodo. Según estudios, se puede constatar que con flujo turbulento se puede conseguir remociones de lodo mayores al 95 %.

La ecuación que describe el número de Reynold´s, es la siguiente:

$$N_{Re} = \frac{VD\rho}{\mu} \dots\dots\dots 2.4$$

Donde.....

V= Velocidad.

D=Diámetro.

$\rho$ = Densidad.

$\mu$ = Viscosidad.

El número de Reynold´s para el interior de la tubería es :

$$N_{Rep} = \frac{15.467*VD\rho}{\mu_{ep}} \dots\dots\dots 2.5$$

---

---

El número de Reynold's para el espacio anular es:

$$N_{Rea} = \frac{15.467 * V_a (D_2 - D_1) \rho}{\mu_{ea}} \dots\dots\dots 2.6$$

Donde:

D: Diámetro interior de la tubería de perforación.

D<sub>2</sub> = Diámetro interior de el pozo ó diámetro de la tubería de revestimiento.

D<sub>1</sub> = Diámetro exterior de la tubería de perforación.

$\mu_{ep}$  = Viscosidad efectiva (cp) en el interior de la tubería.

$\mu_{ea}$  = Viscosidad efectiva (cp) en el espacio anular.

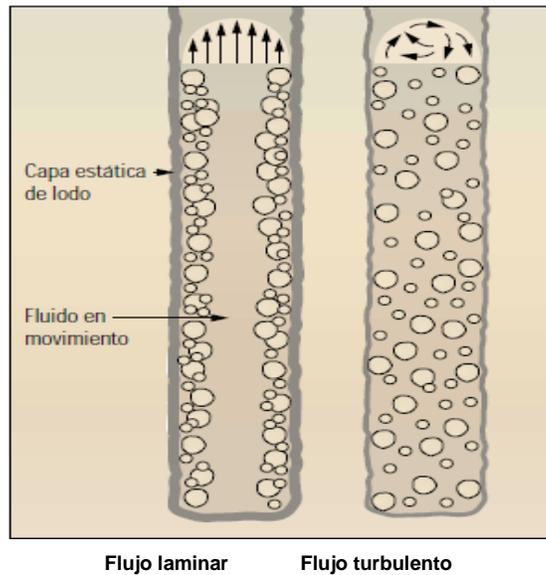
---

## 2.10 CRITERIO MÁS IMPORTANTE EN LA SELECCIÓN DE UN FLUIDO LAVADOR Y ESPACIADOR

---

El criterio más importante en la selección de un fluido espaciador es que el fluido seleccionado pueda desplazarse en turbulencia a gastos de bombeo razonables para la

geometría que presenta el pozo. Se sabe que un fluido newtoniano, como el agua, requiere el menor esfuerzo de corte y gasto de bombeo para obtener flujo turbulento bajo un conjunto de condiciones establecidas, y esto puede ser calculado mediante:



**Fig. 2.4** Dinámica de los fluidos en la eliminación del lodo. En condiciones de flujo laminar (*izquierda*), las líneas de flujo son paralelas y las partículas individuales recorren trayectorias paralelas. Las partículas de lodo tienden a acumularse cerca de la pared del pozo, lo cual dificulta la eliminación completa del mismo. En condiciones de flujo turbulento (*derecha*), los remolinos energéticos arrastran más partículas de lodo que las trayectorias de flujos laminares antes de saturarse. Los torbellinos también mueven a los surfactantes o dispersantes en el lavado químico o en el fluido espaciador en todo el pozo, para deformar y eliminar la capa estática de lodo de la pared del pozo.

$$\text{Viscosidad } cp. = \frac{300(\text{lectura del disco})}{(RPM)} \dots\dots\dots 2.7$$

Lectura del disco = lectura del disco del viscosímetro Fann

RPM = revoluciones por minuto del rotor del viscosímetro Fann

$$Qc, \frac{bl}{min} = \frac{(cp)(Dh+Dp)}{\left(5.31 \left(\frac{lb}{gal}\right)\right)} \dots\dots\dots 2.8$$

Cp. = viscosidad del fluido-espaciador, cp.

Dh = diámetro del agujero, pg.

Dp = diámetro exterior de la tubería, pg.

lb/gal = densidad del fluido espaciador, lb/gal.

---

---

Cuando la densidad del lodo es inferior o igual a 9 lb/gal, generalmente se utiliza agua como fluido espaciador. Frecuentemente se agregan 5 lb de sosa caustica por barril de agua fresca o agua de mar, para elevar el pH. Se han obtenido resultados favorables cuando esta solución caustica se bombea adelanté de la lechada de cemento a volúmenes equivalentes a un tiempo de contacto de 10 minutos. Este sencillo fluido espaciador puede mezclarse fácilmente en la presa, si ésta es del volumen suficiente.

Como la mayoría de los fluidos espaciadores de alta densidad, no son fluidos newtonianos, generalmente se utiliza el modelo de ley de potencias para calcular los gastos críticos y las pérdidas de presión por fricción. Lo primero que se requiere es calcular el índice de comportamiento de flujo,  $n'$ , y posteriormente el índice de consistencia,  $K'$ .

Los valores de  $n'$  y  $K'$  son funciones del logaritmo de la velocidad de corte contra el logaritmo del esfuerzo de corte cuando se grafican para diferente velocidad de corte; la pendiente que se obtiene de la grafica, proporciona el valor de  $n'$ , y la Intercepción con el eje Y provee J el valor de  $K'$ . Si la gráfica no se construye, un procedimiento fácil, es calcularlos por regresión lineal a partir de los datos registrados en el viscosímetro Fann.

Lo anterior es el procedimiento más simple y probablemente, lo suficientemente preciso para la mayoría de las aplicaciones de campo.

---

---

Bannister y Bange<sup>21</sup> encontraron que ocurre un fenómeno en los fluidos con un alto contenido de sólidos, el cual es llamado "resbalamiento de pared". La sensibilidad del modelo de ley de potencia al "resbalamiento de pared", es una función de la cercanía del fluido en relación con la tubería o la pared del pozo.

Este coeficiente de "resbalamiento de pared", se puede determinar utilizando un viscosímetro Fann 35 y realizando pruebas similares con diferentes combinaciones de resortes de rotor.

Una vez que se han determinado los valores de  $n'$  y  $K'$  del fluido espaciador, deberá calcularse el gasto mínimo de bombeo con el que se obtendrá flujo turbulento. Se deberán hacer ciertas suposiciones, y establecer las presiones de fractura consideradas. Se recomienda que estos cálculos se realicen con datos de laboratorio y datos de campo, a partir de la mezcla real del fluido espaciador. El gasto crítico para obtener flujo turbulento puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$Q_c = \left[ \frac{N_{Re} K' \left( \frac{96}{Dh - Dp} \right)^{n'}}{1.86 \rho} \right]^{\frac{1}{2-n}} \left( \frac{Dn^2 - Dp^2}{17.157} \right) \dots \dots \dots 2.9$$

$Q_c$  = Gasto para obtener flujo turbulento en el espacio anular bl/min.

$N_{Re}$  = Número de Reynolds, adimensional

---

---

$K' = \text{Índice de consistencia (lb-seg)/pie}^2$

$n' = \text{Índice de comportamiento de flujo, adimensional}$

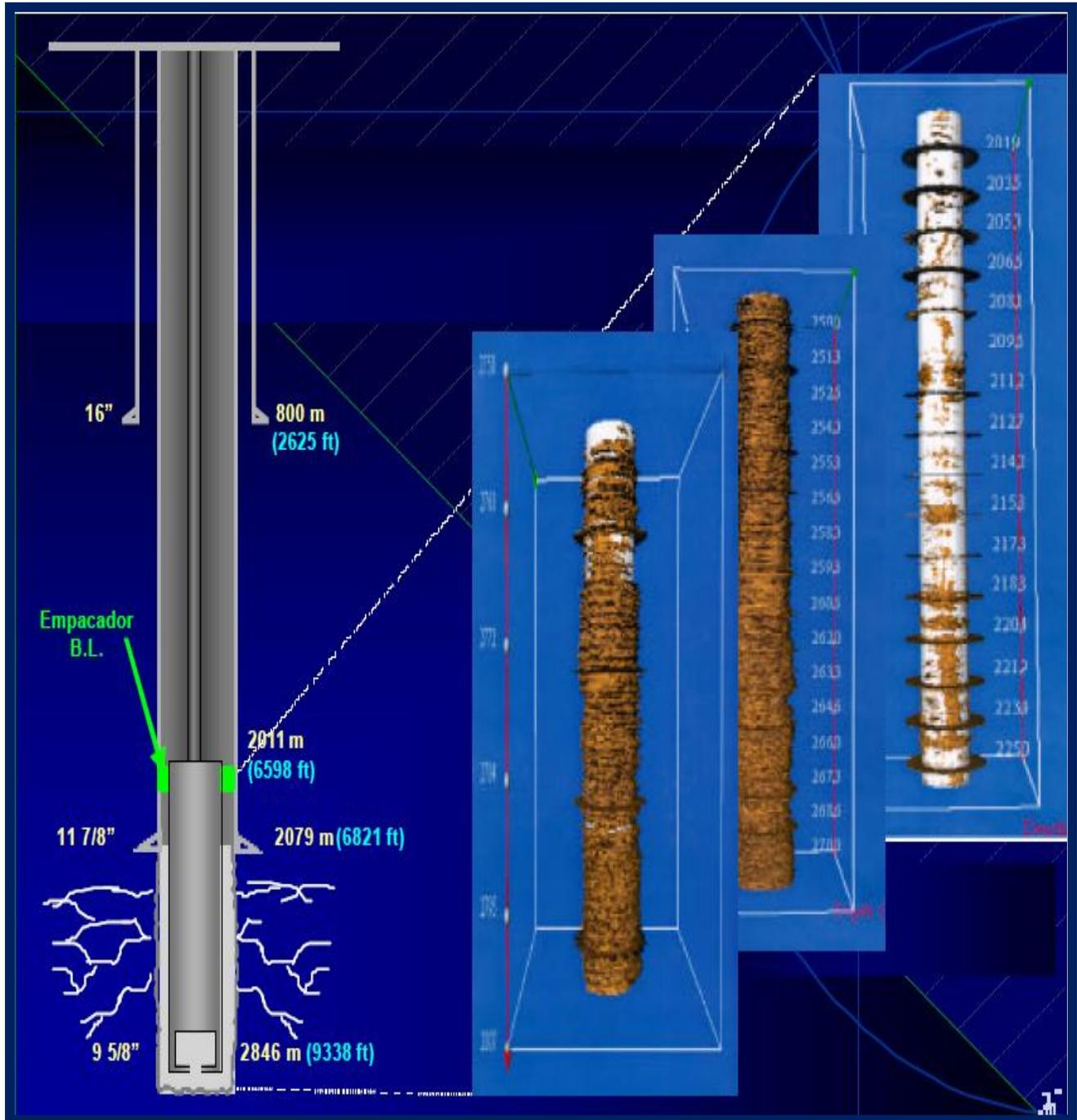
$D_p = \text{Diámetro del agujero, pg.}$

$D_h = \text{Diámetro de la tubería, pg.}$

$\rho = \text{Densidad del Fluido, lb/gal}$

Como se estableció, la ecuación estándar de la ley de potencias y los métodos para la determinación de  $n'$  y  $K'$ , serán suficientes para la mayoría de las aplicaciones; el fluido espaciador deberá seleccionarse con el siguiente criterio: deberán de ser considerados para evaluaciones posteriores los fluidos espaciadores que satisfagan este criterio.

# CAPÍTULO III



**Condiciones De Diseño Que Determinan Su Aplicación**

---

---

## CAPITULO 3.-CONDICIONES DE DISEÑO QUE DETERMINAN SU APLICACIÓN

Estudios exhaustivos han demostrado que el factor más importante que afecta la colocación del cemento es el desplazamiento eficaz de los fluidos de perforación desde el espacio anular. Los

Los fluidos lavadores y espaciadores deben contener materiales para controlar la pérdida de circulación y componentes para ayudar a remover el enjarre. Los resultados de campo y laboratorio muestran que un espaciador propiamente diseñado puede producir una mayor eficiencia de desplazamiento de lodo y consecuentemente, un mejor trabajo de cementación. Los fluidos lavadores y espaciadores deben poseer ciertas propiedades para funcionar adecuadamente.

Algunas propiedades son las siguientes:

1. La compatibilidad con fluidos del pozo, como es el fluido de perforación y cemento.
2. Separar baches de diferentes fluidos.
3. Remover el lodo de perforación y el enjarre.
4. Proteger formaciones.
  - a) Controlar presiones.
  - b) Inhibir el daño a arcillas y calizas sensibles al agua.
5. No afectar adversamente propiedades del cemento ó lodo.

Como hemos visto anteriormente el diseño de los fluidos lavadores y espaciadores, esta inmerso en las operaciones de cementación por tal motivo se describirá brevemente estas operaciones.

---

---

El proceso de colocar un material cementante dentro del espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación expuesta requiere de los siguientes objetivos:

- Proveer aislamiento entre la formación y el pozo.
- Soportar la carga axial de las sargas de revestimiento y de otras sargas que se introducen después.
- Proveer protección y soporte a la tubería de revestimiento.
- Proveer estabilidad mecánica al pozo.

---

### **3.1.- CLASIFICACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO**

---

Las tuberías de revestimiento utilizadas en la construcción de pozos petroleros son de acero, capaces de resistir los esfuerzos a los que se someterán el pozo durante su vida productiva, además de resistir el ataque químico de los fluidos producidos por el pozo, existen los siguientes tipos :

- Conductora.
- Superficial.
- Intermedia.
- Explotación.

Pueden ser :

- Tubería corrida.
- Tubería corta ó liners.

En la figura 3.1 se ilustra esquemáticamente un arreglo convencional de las tuberías de revestimiento.

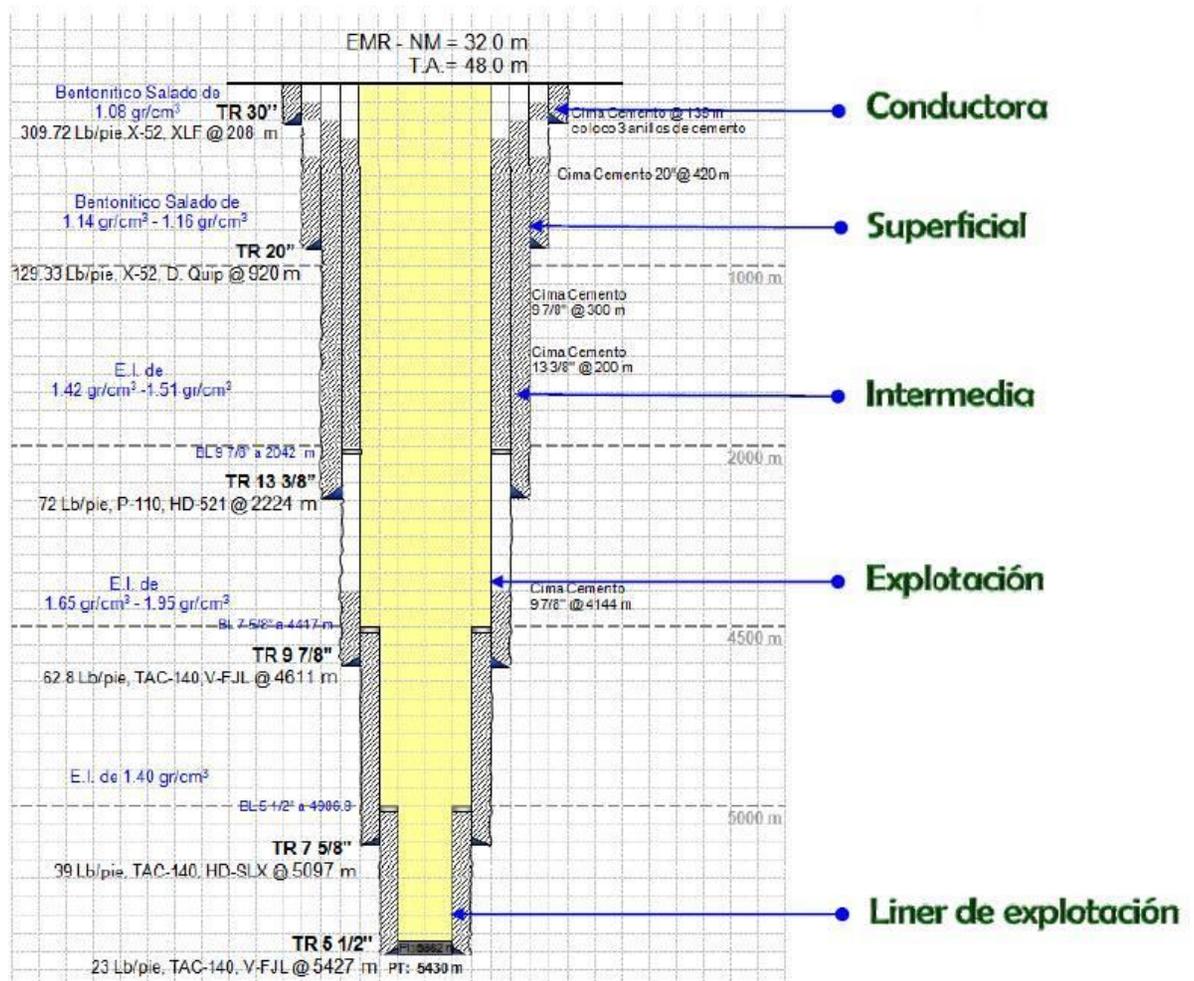


Figura 3.1 Tuberías de revestimiento Arreglo convencional

## 3.2.- PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE LA CEMENTACIÓN DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO

Obtener la siguiente información del pozo:

- Diámetros de la última tubería de revestimiento cementada, profundidad de asentamiento, diámetros, grados, y peso de cada sección.

- 
- 
- b. Profundidad y diámetro promedio del pozo.
  - c. Datos de la tubería de revestimiento por cementar, diámetro, grado y peso de cada sección.
  - d. Trayectoria del pozo, profundidad de inicio de desviación (Kick off),
  - e. estaciones de desviación, como es el ángulo y el rumbo.
  - f. Perfil de gradientes de las presiones de poro y fractura de las formaciones atravesadas en la última etapa de la perforación.
  - g. Tipo de lodo empleado durante la perforación y sus características.
  - h. Densidad, lecturas del viscosímetro Fann a 300 y 600 rpm, o en su defecto viscosidad plástica y punto de cedencia.
  - i. Gradiente de fractura durante la prueba de goteo en la última etapa de perforación.
  - j. Temperatura de fondo y superficial del pozo.
  - k. Intervalos por cubrir de cemento.
  - l. Características y litología de la formación.

El Volumen Recomendado para los baches Lavador y Espaciador de acuerdo al criterio de eficiencia de desplazamiento, se determina de la siguiente manera:

- i. 150 m lineales en el espacio anular más amplio:

$$Vol_B = 0.5067 \times 10^{-4} * (D_{AG}^2 - D_{ETR}^2) * 150 \dots\dots\dots 3.1$$

ii. 10 minutos de contacto con un punto específico en el espacio anular:

$$Vol_S = 1.5589 * Q_{EA} \dots\dots\dots 3.2$$

En el espacio anular.

Donde  $Q_{EA}$  es el ritmo de flujo.

<b>BACHES</b>	
Longitud en espacio anular	150m = 492 pies
Volumen de baches	6555 Lts = 41 bls
Tiempo de contacto mínimo	10 min
Gasto de bombeo	5 BPM
Volumen de bacheo	50 Barriles

Tabla 3.1

### 3.3.- CÁLCULO DEL VOLUMEN DE CEMENTO.

Se determina con el registro de calibración ó similar, considerando la cima de cemento programada y el volumen de cemento entre zapata y cople. Cuando no se cuenta con el registro de calibre del pozo, un exceso de volumen de cemento del 10 al 50 % es recomendado para formaciones consolidadas y no consolidadas respectivamente.

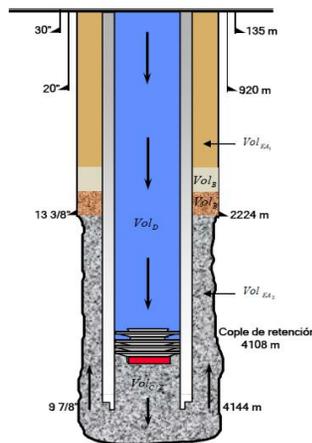


Figura 3.2 Representación esquemática del pozo para el calculo de volúmenes

Volumen del espacio anular
$Vol_{RA_1} = 0.5067 * (Di_{TR\ 133/8^\circ}^2 - De_{TR\ 97/8^\circ}^2) * H$ $Vol_{RA_1} = 0.5067 * (12.347^2 - 9.875^2) * 2224$ $Vol_{RA_1} = 61904\ Lt$ $Vol_{RA_2} = 0.5067 * (D_{AG}^2 - De_{TR\ 97/8^\circ}^2) * H$ $Vol_{RA_2} = 0.5067 * (12.25^2 - 9.875^2) * 1920$ $Vol_{RA_2} = 51121\ Lt$ $Vol_{RA} = Vol_{RA_1} + Vol_{RA_2}$ $Vol_{RA} = 61904 + 51121$ $Vol_{RA} = 113025\ Lt$
Volumen entre cople y zapata
$Vol_{C12} = 0.5067 * (Di_{TR}^2) * H$ $Vol_{C12} = 0.5067 * (8.625^2) * 36$ $Vol_{C12} = 1357\ Lt$
Volumen total de cemento
$Vol_C = Vol_{RA} + Vol_{C12}$ $Vol_C = 113025 + 1357$ $Vol_C = 114382\ Lt$

Cantidad de sacos de cemento
$sacos = \frac{Vol_C}{Rendimiento\ por\ saco}$ $sacos = \frac{114382}{38}$ $sacos = 3010$
Agua requerida para la mezcla
$sacos = sacos * requerimiento\ por\ saco$ $sacos = 3010 * 54$ $sacos = 162540\ lt$

Cálculo del volumen para el desplazamiento
$Vol_D = 0.5067 * Di_{TR\ 97/8}^2 * (H - h)$ $Vol_D = 0.5067 * (8.625^2) * 4108$ $Vol_D = 154846\ lt$
Cálculo de baches lavador y espaciador
$Vol_B = 0.5067 * (D_{AG}^2 - De_{TR\ 97/8}^2) * L_B$ $Vol_B = 0.5067 * (12.25^2 - 9.875^2) * 150$ $Vol_B = 3994\ lt$

### Cálculo de carga hidrostática

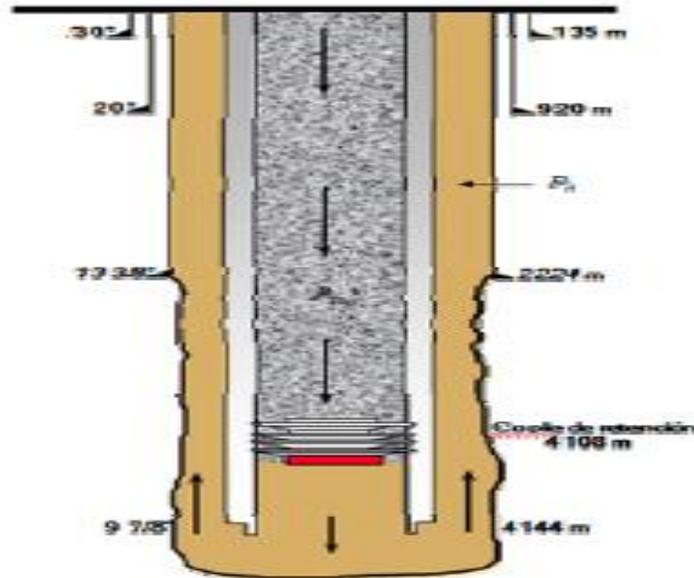


Figura 3.3 Calculo de carga hidrostática

Presión hidrostática en el espacio anular
$P_A = \rho_{EA} * h * 1.422$ $P_A = 1.85 * 4108 * 1.422$ $P_A = 10807\ psi$
Presión hidrostática en el interior de TR 9 5/8"
$P_{TR} = \rho_{TR} * h * 1.422$ $P_{TR} = 1.90 * 4108 * 1.422$ $P_A = 11099\ psi$

<b>Presión diferencial</b>
$P_S = P_A - P_{TR}$ $P_S = 11099 - 10807$ $P_S = 292 \text{ psi}$
<b>Máxima presión diferencial</b>
$\Delta P_{max} = 1.422 * (\rho_C - \rho_{fluido}) * (D - H)$ $\Delta P_{max} = 1.422 * (1.90 - 1.85) * (4108)$ $\Delta P_{max} = 292 \text{ psi}$
<b>Presión hidrostática en el espacio anular</b>
$P_A = \rho_{EA} * h * 1.422$ $P_A = 1.90 * 4108 * 1.422$ $P_A = 11099 \text{ psi}$
<b>Presión hidrostática en el interior de TR 9 5/8"</b>
$P_{TR} = \rho_{TR} * h * 1.422$ $P_{TR} = 1.85 * 4108 * 1.422$ $P_A = 10807 \text{ psi}$
<b>Presión diferencial</b>
$P_S = P_A - P_{TR}$ $P_S = 10807 - 11099$ $P_S = -292 \text{ psi}$

Estos cálculos nos ayudan a entender el comportamiento dinámico que tendrá la colocación del cemento en el pozo; se determina si la zona perforada será capaz de soportar la carga hidrostática de los fluidos que serán bombeados al pozo.

---

---

## 3.4 DENSIDAD EQUIVALENTE DE CIRCULACIÓN (DEC)

---

Uno de los parámetros principales durante el diseño es el cálculo de DEC, durante la operación, se pueden emplear simuladores o emplear la ecuación recomendada en la guía de diseño<sup>1</sup>.

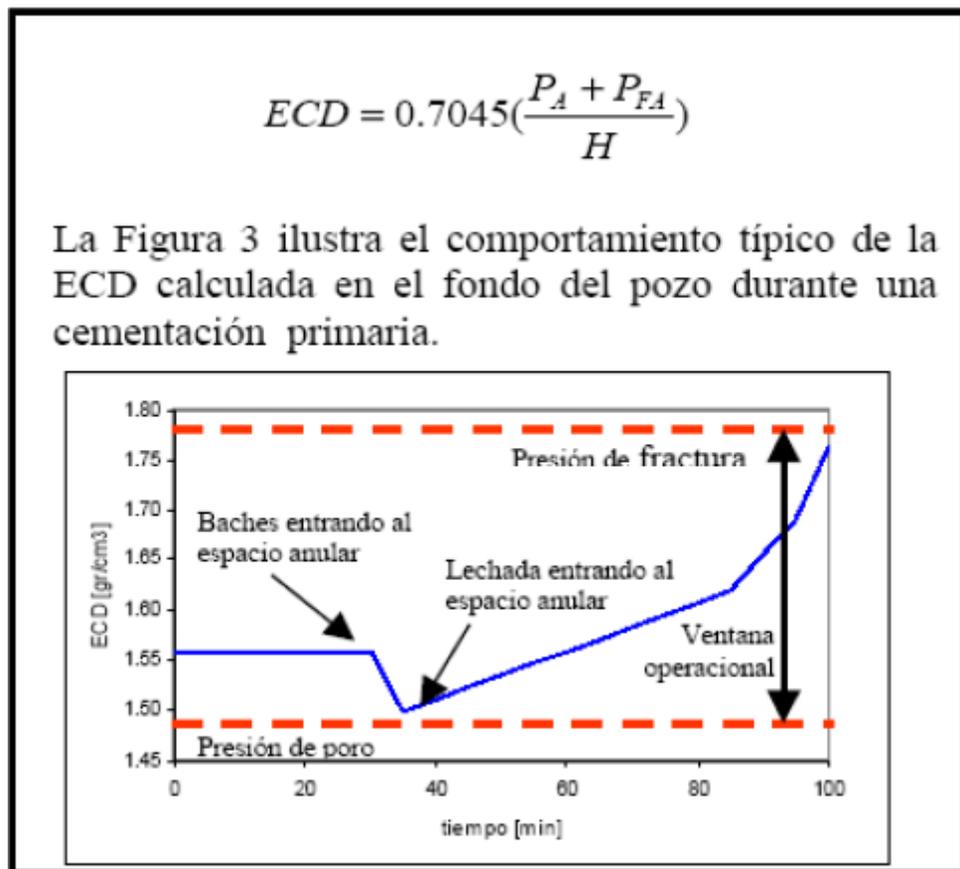


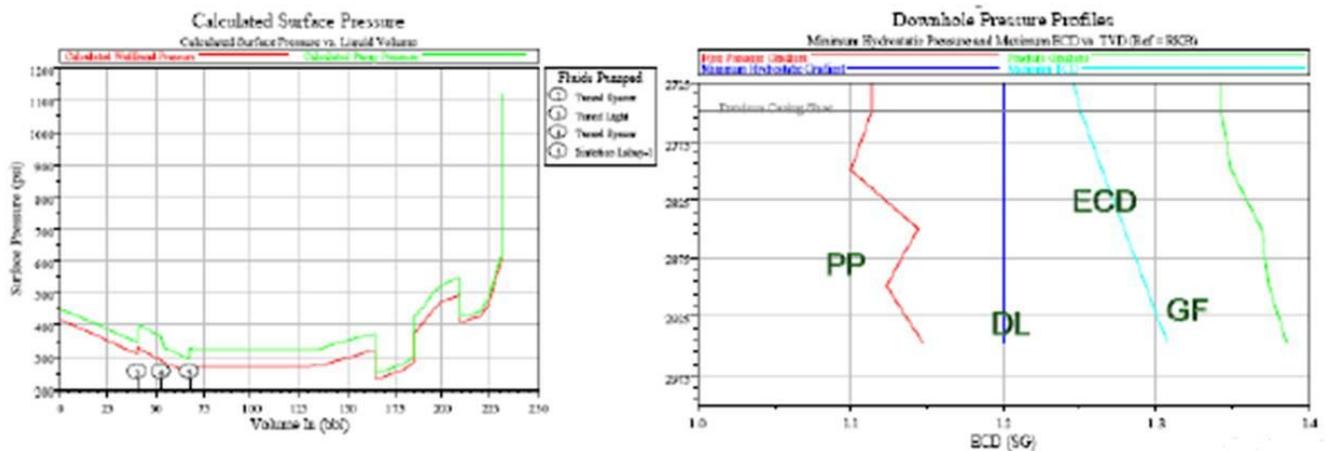
Figura 3.4. Densidad equivalente de circulación.

La simulación de la cementación, además de calcular la DEC durante la cementación, nos permite ajustar los gastos y en su caso densidades ó longitudes de

los baches ó lechadas a emplear. En caso de tuberías cortas debe considerarse el área de flujo del colgador, y que restringe el flujo en el espacio anular e incrementa la DEC.

### 3.5 PERFIL DE PRESIONES EN EL POZO.

En la grafica se puede apreciar las presiones de bombeo (línea Verde) y en cabeza del pozo (línea roja). Durante el bombeo del cemento, la presión máxima esta calculada en 450 psi. Cuando el cemento sale al espacio anular, la presión comenzará a subir hasta tener una máxima calculada de 600 psi. Agregando 500 psi para el acople de tapones, tenemos una presión final de 1100 psi.



---

---

## 3.6 CONDICIONES DE DISEÑO PARA LA APLICACIÓN DE FLUIDOS ESPACIADORES Y LAVADORES.

---

Una consideración para obtener un trabajo de cementación efectivo es minimizar la contaminación de la lechada del cemento con el fluido de perforación. El uso de fluidos lavadores y espaciadores apropiados y puede ayudar a alcanzar este fin. El espaciador ó lavador puede ser utilizado para desplazar eficientemente el fluido de perforación de la porción del espacio anular a ser cementada. También puede funcionar para mantener una separación de este fluido y la lechada del cemento durante el desplazamiento. La contaminación del cemento puede resultar en incompatibilidad interfacial, así como también cambios adversos en el diseño de las propiedades del cemento. La incompatibilidad interfacial es exhibida por el aumento de la viscosidad sobre la mezcla interna. Durante el desplazamiento, esta incompatibilidad puede ser reflejada por una alta presión de bombeo y en casos extremos, puede resultar en una "fractura" de una formación débil con pérdida subsecuente en la formación del cemento. Típicamente los aditivos del fluido de perforación tales como los aditivos de pérdida de filtrado, dispersantes, sal, aceite, pueden ser incompatibles con el cemento. La contaminación del cemento por estos aditivos afectará las propiedades del cemento como el tiempo bombeable, y el desarrollo del esfuerzo compresivo.

---

---

El efecto de la contaminación dependerá en la concentración y el tipo de contaminación. Por esta razón, el uso de espaciadores o lavadores diseñados para compatibilidad con fluidos de perforación y cemento será beneficioso en la eliminación potencial de la incompatibilidad interfacial y problemas de contaminación.

Aplicaciones individuales en un trabajo de cementación requieren una selección cuidadosa de espaciadores ó lavadores. Esta selección dependerá en la aplicación específica del trabajo y condiciones del pozo. Algunos factores a ser considerados son:

- Tipo de fluido a ser desplazado , base aceite ó base agua.
- Densidades del fluido de perforación y del cemento , presión hidrostática para controlar el pozo.
- Características de las formaciones del pozo de zonas sensibles al agua potable que contienen arcillas, lutitas, sal y formaciones de agua salada o altamente permeables.
- Propiedades de fluido deseados, con gasto bajo de desplazamiento para flujo turbulento, estabilidad de suspensión de sólidos en condiciones dinámicas y estáticas.

---

---

### **3.6.1 USO DE SURFACTANTES.**

---

Los fluidos de perforación basados en aceite son los más utilizados, debido a que muchos fluidos basados en agua pueden dañar las formaciones sensibles al agua tales como arcillas. Los basados en aceite ayudan a proteger estas formaciones así como las superficies del tubo con una capa de aceite la cual no será receptiva a adherirse con el cemento. Los espaciadores y lavadores pueden contener surfactantes que permitirán que estos fluidos permitan humedecer las superficies por agua sobre la cual una capa efectiva de cemento se puede formar.

---

### **3.6.2 DENSIDAD.**

---

Los requerimientos de presión hidrostática determinaran la densidad del fluido y no sólo el fluido de perforación y el cemento, sino también de los espaciadores o lavadores. La inclusión de materiales sólidos como la barita, requiere que las propiedades de viscosidad del fluido sean capaces de mantener un sistema uniforme de fluido, no sólo en condiciones dinámicas, sino también bajo condiciones estáticas. Para lavadores y espaciadores de flujo turbulento, estas características pueden ser obtenidas sin comprometer las propiedades del flujo del lavador y espaciador.

---

---

### **3.6.3 PROTECCIÓN DE LA FORMACIÓN.**

---

La sal ó cloruro de Potasio, son generalmente agregados para proteger las formaciones sensibles al agua potable. Si estos químicos son incluidos en la lechada de cemento, la adición será también hecha en el fluido lavador ó en el espaciador. Este agregado provee a la formación de protección, como la compatibilidad. Cuando se cementa a través de zonas de pérdida de circulación ó zonas con flujo de agua salada, se utiliza el sistema especializado de espaciador o pre-lavador. Los sistemas diseñados para sellar la zona de perdida de circulación a través de una reacción química ó por la incorporación de materiales de pérdida de circulación en el fluido, son requeridos para prevenir la pérdida de estas zonas. Las zonas con flujo de agua salada también deberán sellarse.

---

### **3.6.4 REQUERIMIENTOS DEL FLUIDO.**

---

Las propiedades requeridas del fluido son determinadas por las condiciones individuales del pozo y las particularidades de las operaciones de cementación. Por ejemplo, se preocupa, más por la estabilidad de la suspensión de sólidos del pre-lavador, si contiene sólidos ó el espaciador para la cementación de una tubería de revestimiento corta y las operaciones de cementación forzada. Mas que un trabajo de revestimiento donde los fluidos normalmente no permanecerán estáticos por un periodo de tiempo apreciable.

---

---

### **3.6.5 VOLUMENES RECOMENDADOS.**

---

La experiencia ha indicado que un mínimo de 500 pies lineales de fluido es requerido, para completar este objetivo se recomiendan 1000 pies lineales. Para lograr un buen desplazamiento, se recomienda un volumen de lavador o espaciador que obtenga un tiempo de contacto de 10 minutos mientras se bombea el fluido en un sistema turbulento.

El uso de lavadores y espaciadores no proveerán seguridad de éxito en una operación de cementación por si solos. Tendrá que ser utilizado en conjunto con un programa de cementación bien planeado y desarrollado, donde prácticas efectivas de cementación son seguidas. Los lavadores y espaciadores representan cualquier aspecto del programa entero y no deberán ser considerados como una solución total, para casos como un acondicionamiento pobre de lodo. Pueden ser combinadas con otras técnicas y obtener excelentes resultados en la cementación.

# CAPÍTULO IV



**Pruebas de laboratorio para determinar la eficiencia de los baches lavador y espaciador**

---

---

## **CAPITULO 4.-PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS BACHES LAVADOR Y ESPACIADOR.**

---

### **4.1 ELABORACION Y EVALUACION DE PRUEBAS DE LABORATORIO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE BACHES LAVADORES Y ESPACIADORES**

---

Cuando se selecciona un fluido lavador y un fluido espaciador para efectuar un eficiente desplazamiento del enjarre, deberán tomarse en consideración los siguientes criterios:

- a) Reología del fluido espaciador y gastos de bombeo.
- b) Compatibilidad del fluido espaciador con el lodo y el cemento.
- c) Características de mojabilidad del fluido espaciador.
- d) Densidad y contenido de sólidos en suspensión.
- e) Tiempo de contacto.
- f) Predefinir la posición de los baches limpiadores en relación con el lodo, fluido espaciador, y el cemento.

---

---

Para llevar a cabo los puntos anteriores, es necesario conocer las siguientes características de los fluidos lavadores y fluidos espaciadores :

- Reología.
- Tixotropía.
- Densidad.
- Compatibilidad entre los fluidos desplazados.
- Mojabilidad.

---

## 4.2 PREPARACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PRUEBA

---

### *Preparación del fluido espaciador.*

El fluido espaciador deberá ser preparado justo antes de iniciar la prueba ó usar uno ya utilizado; esto dependerá de las instrucciones requeridas.

Los fluidos espaciadores pueden ser clasificados en dos categorías.

La mayoría son base agua, mientras unos pocos son base aceite. Ambos sistemas tienen ventajas y desventajas.

**Fluido Espaciador base agua.**- esta compuesto por una mezcla de agentes gelificantes y dispersantes. Todos los componentes son amigables con el medio ambiente.

---

---

Se puede preparar con agua dulce, de mar y salada al 18% de NaCl o más, y en un rango de densidades de 1.20 a 2.40 gr/cc. Para mejorar la capacidad de mojabilidad del espaciador, se puede adicionar uno o varios surfactantes.

También se le puede adicionar retardador de fraguado. Tiene una excelente estabilidad hasta los 310 °F de temperatura.

Todos los espaciadores convencionales afectan el tiempo bombeable y resistencia compresiva de la lechada.

De acuerdo a los resultados de la prueba de mojabilidad, se define el tipo y concentración de surfactante a utilizar.

### **Preparación del Lodo.**

Deberá usarse una muestra representativa del lodo, y esta deberá ser agitada vigorosamente antes de iniciar la prueba.

### **Preparación de la Lechada de Cemento.**

La lechada de cemento deberá prepararse de acuerdo a la Sección 5 ó Apéndice A de la norma API 10B. Una cantidad de lechada nueva deberá prepararse para cada prueba.

---

---

### **Preparación de las Mezclas de Fluidos.**

Las mezclas de fluidos en esta sección deberán ser usadas para pruebas de: reología, esfuerzo estático de gel, suspensión de sólidos, tiempo de bombeo, esfuerzo compresivo y pérdida por filtrado. Los datos para la conformar la base de fluidos a utilizar, deberá ser obtenida antes de preparar las mezclas. Todas las mezclas de fluidos en esta sección están expresadas como un porcentaje de volumen estimado del total de la mezcla. La mezcla para cada procedimiento de prueba deberá ser preparada agitando con una espátula los volúmenes apropiados de cada componente, hasta conseguir una mezcla homogénea. El volumen de mezcla deberá ser suficiente para realizar los procedimientos de prueba deseados.

---

## **4.3 PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LOS FLUIDOS LAVADORES Y ESPACIADORES**

---

Las propiedades reológicas deberán ser determinadas con mezclas de : cemento/lodo, cemento/espaciador y lodo/espaciador. Las relaciones recomendadas, dada en porcentajes, son: 95/5, 75/25, 50/50, 25/75 y 5/95 para cada combinación de fluidos, así como también una combinación 25/50/25 de lodo/espaciador/cemento. Las relaciones deberán ser preparadas de acuerdo a la tabla 4.1. Las propiedades reológicas deberán ser medidas de acuerdo a la Sección 12 del API 10 B. Los datos deben ser registrados en el siguiente formato:

Tabla 4.1 Relación de Mezclas de Compatibilidad.

Por ciento en Volumen		Esquema de Mezclado
Lodo o Cemento/Espaciador		
1.	95/5	760 ml lodo o cemento/40 ml Espaciador
2.	75/25	100 ml Espaciador mas 375 ml de # 1
3.	5/95	760 ml Espaciador / 40 ml Lodo o Cemento
4.	25/75	100 ml Lodo o Cemento mas 375 ml de # 3
5.	50/50	Partes iguales de #1 y #3
6.	25/50/25	Partes iguales de #5 Lodo/Espaciador y #5 Cemento/Espaciador

Reología.-Se define como el estudio del flujo y deformación de los materiales.

Aplicación de la Reología a la Ingeniería de Cementación:

- Sirve para evaluar la mezcla homogénea y bombeo del lodo de perforación desplazado.
- Determina el gasto de desplazamiento que mejor ayude a **la eliminación efectiva del enjarre** del espacio anular para colocar apropiadamente la lechada.
- Estima las pérdidas de presión por fricción a cada gasto determinado.
- Calcula la potencia necesaria para llevar a cabo el trabajo planeado.

El trabajo de laboratorio y campo nos muestran que los fluidos espaciadores pueden ser ventajosos al mantener el fluido de perforación y la lechada del cemento separados y también ayudan a remover el lodo del espacio anular.

El criterio más importante en la selección de un fluido espaciador es que el fluido seleccionado pueda desplazarse en turbulencia a gastos de bombeo razonables para la geometría que presenta el pozo. Se sabe que un fluido newtoniano, como el agua, requiere menor esfuerzo de corte y gasto de bombeo para obtener flujo turbulento bajo un conjunto de condiciones establecidas, y esto puede ser calculado mediante:

$$\text{viscosidad, cp} = \frac{300 (\text{lectura del disco})}{(\text{RPM})} \dots\dots\dots (4.1)$$

Lectura del disco = lectura del disco del viscosímetro Fann

RPM = revoluciones por minuto del rotor del viscosímetro Fann

Calculando el gasto crítico  $Q_c$  ...

$$Q_c, \text{ min} = \frac{\mu[\text{cp}] (D_h + D_p)}{(5.31) \rho[\text{lb/gal}]} \dots\dots\dots (4.2)$$

$\mu$  [cp] = viscosidad del fluido-espaciador, cp.

$D_h$  = diámetro del pozo, pg.

$D_p$  = diámetro exterior de la tubería, pg.

$\rho$  [Lb/gal] = densidad del fluido espaciador, lb/gal.

---

---

Cuando la densidad del lodo es inferior ó igual a 9 lb/gal, generalmente se utiliza agua como fluido espaciador. Frecuentemente se agregan 5 lb de sosa caustica por barril de agua dulce ó agua de mar, para elevar el pH. Se han obtenido resultados favorables cuando esta solución custica se bombea delante de la lechada de cemento a volúmenes equivalentes a un tiempo de contacto de 10 minutos. Este sencillo fluido espaciador puede mezclarse fácilmente en la presa, si ésta es del volumen suficiente.

Como la mayoría de los fluidos espaciadores de alta densidad, no son fluidos newtonianos, generalmente se utiliza el modelo de ley de potencias para calcular los gastos críticos y las pérdidas de presión por fricción. Lo primero que se requiere es calcular el índice de comportamiento de flujo,  $n'$ , y posteriormente el índice de consistencia,  $K'$ .

Los valores de  $n'$  y  $K'$  son funciones del logaritmo de la velocidad de corte contra el logaritmo del esfuerzo de corte cuando se grafican para diferente velocidad de corte, la pendiente que se obtiene de la gráfica, proporciona el valor de  $n'$ , y la intercepción con el eje Y provee el valor de  $K'$ . Si la gráfica no se construye, un procedimiento fácil es calcularlos por regresión lineal a partir de los datos registrados en el viscosímetro Fann.

Lo anterior es el procedimiento más simple y probablemente lo suficiente preciso para la mayoría de las aplicaciones de campo.

Bannister y Bange<sup>1</sup> encontraron que ocurre un fenómeno en los fluidos con un alto contenido de sólidos, el cual es llamado "resbalamiento de pared". La sensibilidad del

---

---

modelo de ley de potencia al "resbalamiento de pared", es una función de la cercanía del fluido en relación con la tubería ó la pared del pozo.

Este coeficiente de "resbalamiento de pared", se puede determinar utilizando un viscosímetro Fann 35 y realizando pruebas similares con diferentes combinaciones de resortes de rotor.

---

## 4.4 TIXOTROPIA DEL FLUIDO LAVADOR Y ESPACIADOR

---

La tixotropía es la propiedad demostrada por algunos fluidos que forman una estructura de gel cuando están estáticos, regresando luego al estado de fluido cuando se aplica un esfuerzo de corte.

La mayoría de fluidos lavadores y espaciadores de base agua demuestran esta propiedad, debido a la presencia de partículas cargadas eléctricamente o polímeros especiales que se enlazan entre sí para formar una matriz rígida.

Las indicaciones del esfuerzo de gel tomadas con el viscosímetro FANN (VG) a intervalos de 10 segundos, 10 minutos y 30 minutos, proporcionan una medida del grado de tixotropía del fluido.

La resistencia del gel formado depende de la cantidad y del tipo de sólidos en suspensión, del tiempo, de la temperatura y del tratamiento químico.

La magnitud de la gelificación, así como el tipo de esfuerzo de gel, es importante en la suspensión de los sólidos y del material densificante.

No se debe permitir que la gelificación alcance un nivel más alto del necesario para cumplir estas funciones.

Esta propiedad representa la habilidad tixotrópica del fluido. Generalmente un gel inicia entre 3-4 es suficiente para soportar sólidos. La experiencia ha mostrado que si no se produce asentamiento en superficie tampoco se produce en el fondo del pozo.

---

## 4.5 GASTO MÍNIMO DE BOMBEO

---

Una vez que se han determinado los valores de  $n'$  y  $K'$  del fluido espaciador, deberá calcularse el gasto mínimo de bombeo con el que se obtendrá flujo turbulento. Se deberán hacer ciertos cálculos y establecer las presiones de fractura consideradas. Se recomienda que estos cálculos se realicen con datos de laboratorio y datos de campo, a partir de la mezcla real del fluido espaciador. El gasto crítico para obtener flujo turbulento puede calcularse con la siguiente fórmula :

$$Q_c = \left[ \frac{N_{Re} K' \left( \frac{96}{Dn - Dp} \right)^{n'}}{(1.86) \rho [lb/gal]} \right]^{\frac{1}{2-n}} \left( \frac{Dn^2 - Dp^2}{17.159} \right) \dots\dots\dots (4.3)$$

Donde:

$Q_c$  = Gasto para obtener flujo turbulento en el espacio anular, Bl/Min.

$N_{Re}$  = Numero de Reynolds, adimensional.

$K'$  = Índice de consistencia (lb-seg)/pie<sup>2</sup>

$n'$  = Índice de comportamiento de flujo, adimensional.

$Dp$  = Diámetro del agujero, pg.

---

---

$D_n$  = Diámetro de la tubería, pg.

$\rho$  = Densidad del fluido lb/gal.

Como se estableció la ecuación estándar de la ley de potencias y los métodos para la determinación de  $n'$  y  $K'$ , serán suficientes para la mayoría de las aplicaciones.

---

## **4.6 DENSIDAD DEL FLUIDO ESPACIADOR Y CONTENIDO DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN.**

---

Cuando se diseña un fluido espaciador, deberá considerarse la densidad de éste. Lo que generalmente se hace es diseñar la densidad del fluido espaciador entre la densidad del lodo y la del cemento. Se acostumbra que el fluido espaciador sea de una densidad de 0.5 lb/gal mayor que la del lodo. Aunque los fluidos espaciadores de mayor densidad pueden no ser perjudiciales, pues estos serán más costosos. Los fluidos espaciadores de mayor densidad también pueden crear mayores densidades de circulación durante la colocación del cemento.

El otro problema con los fluidos espaciadores de alta densidad, especialmente aquéllos con viscosidades lo suficientemente bajas para desplazarse en turbulencia, es la tendencia al asentamiento de sólidos. A menos que se utilicen polímeros al formular el fluido espaciador, que rompan sus uniones con la temperatura, permitiendo así reducir la viscosidad del fluido espaciador durante la colocación.

---

---

El asentamiento del cemento de sólidos en la superficie puede ser un problema. Lo que se requiere para mantener los sólidos en suspensión es un equipo de mezclado bien diseñado, de preferencia con un fondo cónico, y líneas de succión de bombeo, que permitan obtener velocidades lo suficientemente altas para mantener estos sólidos en suspensión.

Se requiere una verificación final de los agentes densificantes. Generalmente se utiliza barita para densificar el fluido espaciador. Frecuentemente las compañías de servicio diseñan sus mezclas usando la densidad relativa del mineral puro. Como el mineral puro nunca se tiene en el campo, se deberá verificar la densidad relativa de la barita disponible y adicionar mayor agente densificante o menos agua, según se requiera; como consecuencia, la reología será diferente en el campo que en la prueba realizada en el laboratorio, y deberán realizarse otras pruebas para re-calcular las densidades equivalentes de circulación, etc.

---

## **4.7 COMPATIBILIDAD DEL FLUIDO ESPACIADOR CON EL LODO Y EL CEMENTO**

---

**Mecánica para calcular la compatibilidad entre los fluidos lavadores y fluidos espaciadores, apegadas a las normas API-10B.**

**Objetivo:**

Describir de manera clara y específica el procedimiento para efectuar la prueba de compatibilidad de fluidos.

---

---

**Alcance:**

El presente procedimiento es aplicable a los espaciadores que se utilizan para remover y arrastrar el enjarre de los lodos que se utilizan para perforar los pozos petroleros y geotérmicos.

**Generalidades:**

Este procedimiento está diseñado para determinar el grado de compatibilidad de los fluidos de perforación y cementantes en el pozo. Este proceso incluye reología, esfuerzo de gel estático, tiempo bombeable, resistencia compresiva, pérdida de fluido y suspensión de sólidos. Para el uso de este procedimiento, se requiere de una selección apropiada de fluidos lavadores y espaciadores, según se requiera.

---

**4.8 DEFINICIONES:**

---

Las siguientes definiciones aplican para esta sección:

**Compatible:** Capaz de formar una mezcla que no experimenta reacciones químicas o físicas indeseables.

**Preflujo:** fluido usado para separar lodos de perforación y lechadas de cementos. Un preflujo puede ser designado para usarse con cualquier tipo de lodo de perforación, ya sea base agua ó aceite, y deja preparada la tubería y la formación para efectuar la operación de cementación.

---

---

Generalmente a los preflujos no se los incrementa la densidad con agentes sólidos densificantes e insolubles. A los preflujos también se los conoce como lavadores.

Los siguientes procedimientos de prueba son los mismos para preflujos y espaciadores, por lo tanto, el término espaciador será usado para referirse a ambos fluidos.

También de relevante importancia, es saber si el fluido espaciador es ó no compatible con el lodo y el cemento. Cuando se seleccione el tipo de espaciador requerido, se deberán considerar factores como: tratamiento químico del lodo, tipo de lodo, base aceite ó base agua, carga iónica del emulsificante y los aditivos químicos, para asegurar compatibilidad entre el lodo y el cemento.

Como la tubería de revestimiento y la formación deberán estar mojadas por agua, para facilitar la adherencia del cemento, el sistema específico del lodo deberá probarse con los sistemas del posible fluido espaciador, hasta encontrar uno que sea compatible. Durante la realización de estas pruebas, pudiera encontrarse un surfactante ó una combinación de surfactantes que deje mojada por agua, para facilitar la compatibilidad del fluido espaciador con el lodo base aceite, considerándose esto, un éxito en la operación. Si no se llegase a cumplir, se deberá bombear entre el lodo y el cemento un bache de fluido oleoso; sería ideal que este fluido oleoso pudiera prepararse con la densidad del lodo, pero esto no es siempre posible debido a las bajas

---

---

viscosidades de algunos de los aceites de baja toxicidad. Si se utiliza el método anterior, los siguientes pasos pueden ser una guía típica de bombeo:

- a) Lodo.
- b) 20 bl. de fluido oleoso.
- c) 50 bl. de fluido espaciador.
- d) Primera parte de la lechada de cemento.
- e) Parte final de la lechada de cemento.
- f) Lodo.

La única precaución que recomendada es la de realizar en el campo una prueba de agitado de botella; si la prueba resulta compatible con la del laboratorio, se sigue adelante con la operación; en caso contrario, deberá bombearse un fluido compatible base aceite adelante del fluido espaciador.

---

## **4.9 PRUEBA DE TIEMPO DE BOMBEO.**

---

Las pruebas de tiempo bombeable deberán ser corridas a mezclas de cemento / espaciador. Las relaciones porcentuales recomendadas son 95/5 y 75/25. La prueba de tiempo bombeable deberá desarrollarse de acuerdo a la sección 9 de las normas API 10-B. Se pueden hacer pruebas a discreción de acuerdo a las siguientes mezclas: cemento / lodo, espaciador / lodo y cemento / lodo / espaciador.

---

---

## **4.10 PRUEBA DE ESFUERZO COMPRESIVO.**

---

La prueba de esfuerzo compresivo deberá correrse a mezclas de cemento/espaciador. Las relaciones recomendadas son 95 / 5 y 75 / 25. El esfuerzo compresivo deberá realizarse según lo establecido en las secciones 7 y 8. Para hacer pruebas a discreción se pueden realizar mezclas de cemento/lodo y cemento/lodo/espaciador.

---

## **4.11 SUSPENSIÓN DE SÓLIDOS Y ESFUERZO ESTÁTICO DE GEL.**

---

Este procedimiento está diseñado para investigar el comportamiento de las mezclas de fluidos durante y después de la colocación de la lechada de cemento.

Iniciar la prueba de espaciamiento con la mezcla seleccionada en la Sección 7 de las normas API-10B. Cuando el tiempo especificado de calentamiento ha sido alcanzado, se debe leer la consistencia en  $B_c$  y entonces cesar la agitación. Después de transcurrido un tiempo de 10 minutos, reiniciar la agitación y observar por algún momento el desarrollo de esfuerzo de gel ó sólidos asentados, indicado por una deflexión máxima en la consistencia en el momento de reiniciar la agitación. Continuar agitando la lechada de cemento hasta alcanzar la mitad del tiempo bombeable obtenido en la prueba correspondiente. Leer la consistencia en  $B_c$  y cesar la agitación.

---

---

Después de transcurrido un tiempo de 10 minutos, reiniciar la agitación mientras se observa por un momento el desarrollo del esfuerzo de gel o sólidos precipitados. Este ciclo puede repetirse tan frecuente como se desee.

---

## 4.12 PRUEBA DE PÉRDIDA DE FLUIDO

---

La prueba de pérdida de fluido deberá ser corrida a mezclas de cemento/espaciador. Las relaciones porcentuales recomendadas son 95/5 y 75/25. La pérdida de fluido deberá realizarse de acuerdo a la Sección 10 de las normas API-10B. Para hacer pruebas a discreción, estas se deberán correr a mezclas de cemento/lodo y cemento/lodo/espaciador.

Referencias:

API Recommended Practice 10B, Twenty-Second Edition, December 1997, Pagina 118-120, Sección 16  
Global Laboratorio Best Practices, Procedimiento No. WM-GL-HES-QM-434.080, Vol. 4, Sección 3, Parte 4 Pág. 3 - 127

---

## 4.13 EJEMPLO DE PRUEBA DE UN SISTEMA LAVADOR

---

A continuación se ilustra un ejemplo de pruebas de un sistema lavador, con la finalidad de verificar que funciona el sistema lavador utilizado para las operaciones de cementaciones forzadas y anillos, donde el lodo lleva un tiempo en condiciones estáticas, utilizamos un lodo de más de tres meses que se encontraba en el laboratorio.

---

---

Las pruebas consistieron en realizar una mezcla del sistema lavador vs lodo , y lodo vs agua. El diseño del sistema lavador es el sig.:

SEM 7	1.0 Gal/bbl
MUSOL A	0.5 Gal/bbl
SURF. A	0.2 Gal/bbl



La siguiente prueba fue derramar lodo por las paredes de un vaso de precipitado.



Y sobre la película de lodo vertimos una cantidad similar del sistema lavador, observándose poco arrastre de lodo, como se observa en la foto.



---

---

De igual manera se derramó lodo en el vaso de precipitado, pero en esta ocasión se utilizó agua para observar su arrastre.

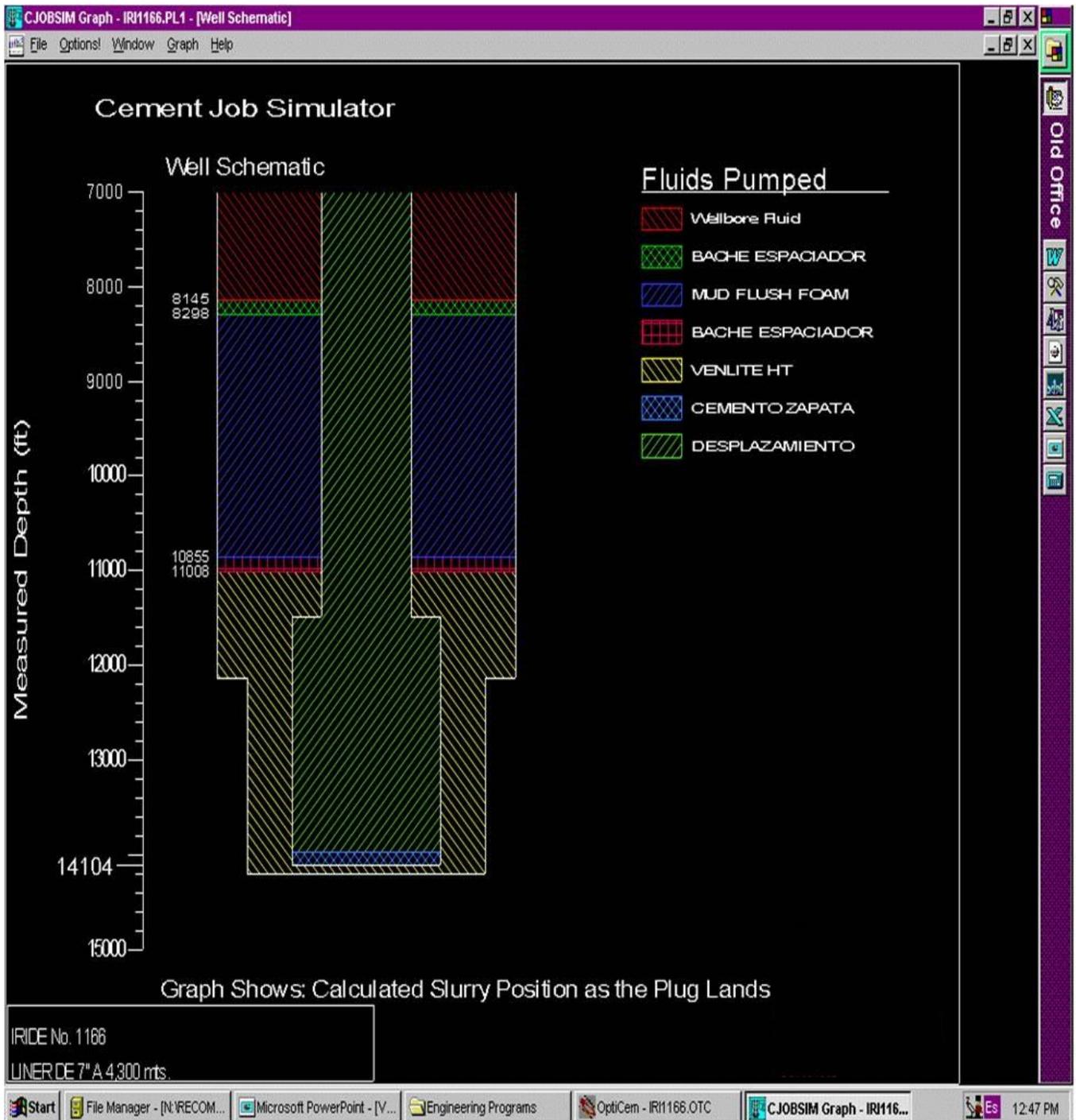


A manera de ver si existe mojabilidad se calibró el equipo con el sistema lavador, se mezclaron 50% de lodo y 50 % lavador. Y no se observo lectura, se mezcló agua y lodo y no se observó lectura.



**Conclusiones:** el sistema lavador no es capaz de dejar mojadas las paredes para que ocurra una mejor adherencia del cemento.

# CAPÍTULO V



**PROCEDIMIENTOS Y FACTORES PARA EL  
DESPLAZAMIENTO DE FLUIDOS  
LAVADORES Y ESPACIADORES**

---

---

## CAPITULO V.- PROCEDIMIENTOS Y FACTORES PARA EL DESPLAZAMIENTO DE FLUIDOS LAVADORES Y ESPACIADORES.

---

### 5.1 VELOCIDADES ANULARES

---

A partir de experimentos y estadísticas se ha visto que el flujo turbulento es el mejor régimen para remover el enjarre dejado por lodo de perforación del espacio anular entre la tubería de revestimiento y el pozo perforado.

Para que un fluido esté en flujo turbulento, debe bombearse por encima de la velocidad que se conoce como velocidad crítica de flujo. Esta velocidad depende de:

-**La reología del fluido:** entre más delgado sea el fluido, más fácil será hacerlo entrar en flujo turbulento.

-**La centralización o centricidad** de la tubería de revestimiento. A mejor centralización, más fácil entrará el fluido en turbulencia.

-**El espacio anular.-** A menor espacio anular, más fácil entrará el fluido en turbulencia.

-**El gradiente de fractura de la formación:** este es un factor indirecto – A menor gradiente de fractura, más difícil será lograr turbulencia sin pérdidas.

---

---

Los fluidos que se deben utilizar como pre-flujos son lavadores químicos y/o espaciadores. También se pueden utilizar agua, diesel ó lodo base aceite. Para estos fluidos lavadores existen algunos requerimientos mínimos:

- Un tiempo de contacto de por lo menos 10 minutos ó 750 pies en el espacio anular, lo que sea mayor. Bajo condiciones ideales, se puede utilizar menores volúmenes.
- Todos los fluidos bombeados deben ser compatibles, tanto con el fluido de perforación en el pozo, como con la lechada que se va a bombear.

Se deben optimizar las propiedades de la lechada del cemento, como el mínimo punto de cedencia y viscosidad plástica que se pueda, sin provocar sedimentación ó agua libre, con control de pérdida de fluido y agua libre. Todos los fluidos diseñados deben cumplir con la tarea de dejar humedecida por agua la pared del pozo y el exterior de la superficie de la tubería de revestimiento.

El **flujo laminar efectivo** es el régimen de flujo alternativo cuando no sea posible el flujo turbulento. **NO** se debe confundir este régimen de flujo con el flujo laminar. La diferencia entre los dos, es que para el flujo Laminar efectivo se deben cumplir cuatro criterios:

- El fluido de desplazamiento debe tener una densidad 10% mayor que el fluido que se está desplazando,

- 
- 
- Se debe cumplir el Gradiente de Presión Mínimo - debe haber flujo alrededor de la tubería de revestimiento,
  - El fluido de desplazamiento debe tener un gradiente de presión de fricción 20% más alto que el del fluido que se está desplazando,
  - La velocidad de los fluidos debe ser la misma en todos los puntos alrededor de la tubería de revestimiento.

---

## 5.2 TIPOS DE FLUJO

---

### *Propiedades de Flujo*

La remoción del enjarre en el espacio anular es una función de los patrones de flujo que se obtienen. Los tres tipos de patrones de flujo son:

**Flujo de Tapón** – La remoción del enjarre es mínima debido a las bajas fuerzas de fricción o arrastre ejercidas sobre la capa de lodo. Este rango de flujo puede eliminar sólo aproximadamente el 60% de lodo en la tubería.

**Flujo Laminar** – La velocidad de fluido es mayor y se crea más fricción. Esto da como resultado que se ejerza más fuerza en el enjarre, mediante el arrastre por fricción, dando como resultado una mejor remoción del enjarre. Este rango de flujo puede eliminar hasta el 90% del lodo de la tubería.

---

---

**Flujo Turbulento** – Se logra una máxima capacidad de remoción del enjarre, debido a las altas fuerzas de fricción ó arrastre. Las corrientes eléctricas de vórtice y la corriente del fluido dan como resultado un porcentaje de remoción del enjarre de hasta un 95%.

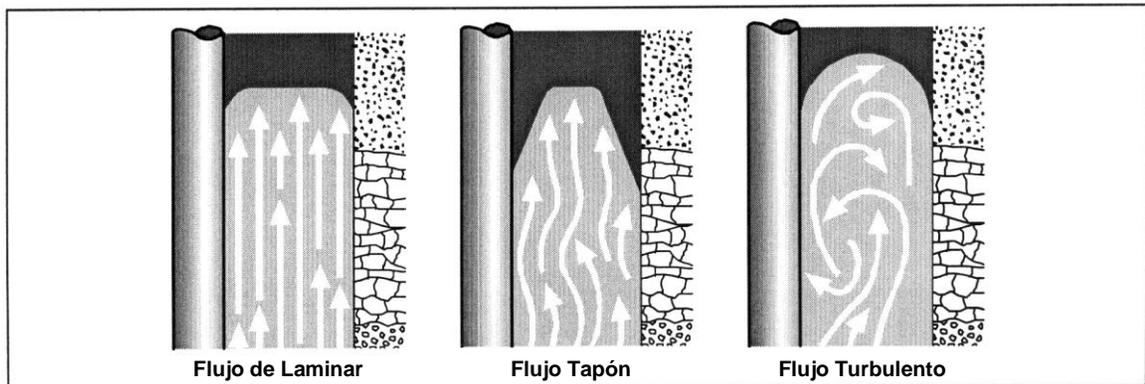


Figura 5.1 – Flujos de tapón

---

## 5.3 EFICIENCIA DE TRASPORTE

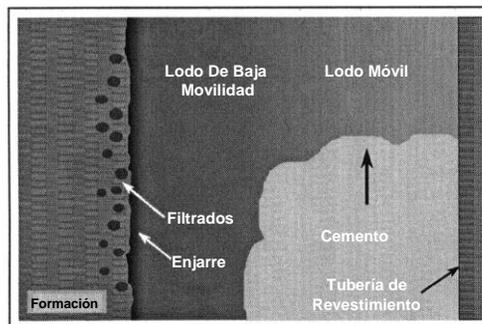
---

Un fluido de perforación bien diseñado, es el factor más importante para la remoción del enjarre producido por este mismo. Los estudios de los pozos de prueba que simulan permeabilidad realista revelan la importancia de los aditivos para controlar la fuga del lodo, y así poder evitar la acumulación excesiva de enjarres.

---

---

En pruebas donde se simulan condiciones de cementación en pozos verticales, el enjarre de fluido de perforación inmóvil no puede desplazarse completamente mediante la lechada de cemento, incluso bajo condiciones de flujo turbulento. Los espaciadores con cementos no densificados de baja viscosidad que están situados adelante de la lechada de cemento y con el movimiento de la tubería acoplada con raspadores (es decir, limpiadores de paredes mecánicos) pueden ayudar a remover el fluido de perforación que está en estado de gel ó enjarre. Sin embargo, no existe sustituto para mantener las propiedades del fluido de perforación y así mejorar la remoción del fluido de perforación y permitir el desplazamiento de la lechada de cemento.



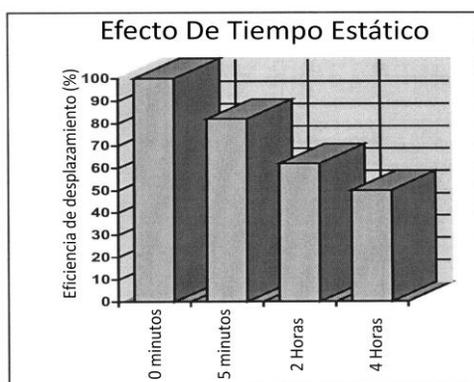
*Figura 5.2- El fluido de perforación acondicionado es más fácil de remover*

Otra forma de mejorar la movilidad del fluido de perforación (para incrementar su capacidad de desplazamiento) es a través de una circulación previa al trabajo para desplazar perfectamente el fluido de perforación antes de cementar. Para mejorar aún más su movilidad, la viscosidad del fluido de perforación debe reducirse, si es posible, durante el período de circulación previo al trabajo. El acondicionamiento adecuado del pozo es crítico para realizar así operaciones exitosas de cementación.

---

---

También es importante limitar la cantidad de tiempo estático antes y durante el trabajo de cementación, a partir de pruebas previamente realizadas para determinar la influencia del tiempo estático; los resultados que se presentan en la Figura 5.3 muestran una disminución importante de la eficiencia del desplazamiento tan sólo después de 5 minutos de tiempo de no operación.



*Figura 5.3- Tiempo Estático*

Un diseño de trabajo de cementación bien realizado incluirá pruebas de laboratorio del lodo para medir su viscosidad (propiedades reológicas) bajo condiciones de profundidad de pozo. Se pueden añadir aditivos ó fluido base (agua ó aceite sintético) antes de cementar para mejorar la tendencia del lodo a fluir adelante de la lechada de cemento.

### ***Movimiento de la Tubería***

El segundo aspecto en importancia después del acondicionamiento del fluido de perforación es la necesidad de utilizar movimientos de tubería, ya sea rotación o reciprocación, ambos durante y antes de la cementación.

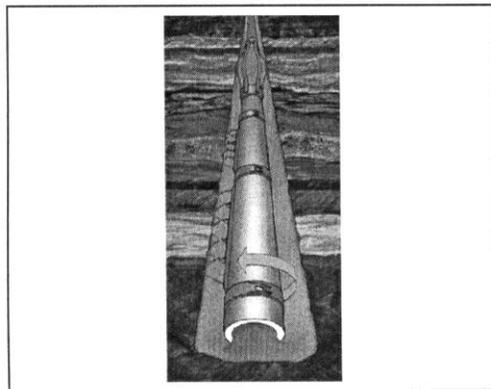
---

---

El movimiento de la tubería ayuda a romper las bolsas de gel del fluido de perforación y los recortes flojos que puedan acumularse dentro de las bolsas. El movimiento de la tubería también puede ayudar a compensar los efectos negativos de una tubería mal centrada. Los raspadores mecánicos instalados en las tuberías de revestimiento incrementan aún más los efectos benéficos del movimiento de la tubería.

Si la tubería de revestimiento está correctamente centrada, el movimiento de tubería puede lograrse incluso en pozos horizontales.

En suma, si el sistema de fluido de perforación no transporta sólidos, el movimiento de la tubería puede ayudar a eliminar el canal de sólidos ya asentados.



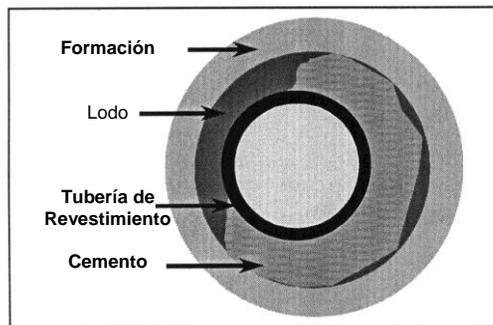
*Figura 5.4 – Movimiento de tubería*

---

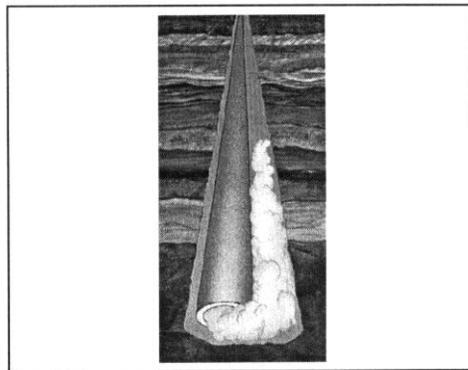
---

## ***Centrado de Tubería***

De acuerdo con los resultados de las pruebas, el centrado de la tubería es otro factor importante para obtener una alta eficiencia de desplazamiento. En secciones de prueba en donde la tubería no estaba centrada con el pozo, el cemento demostró una fuerte tendencia a contener fluido de perforación. Los centradores mejoran el claro de la tubería, y por lo tanto igualan la distribución de las fuerzas ejercidas por la lechada de cemento conforme fluye por el espacio anular. De lo contrario, el cemento tiende a seguir la trayectoria de la menor resistencia, hacia el lado ancho del espacio anular.



*Figura 5.5- El cemento tiende a fluir por el lado ancho del espacio anular.*



*Figura 5.6 - Centralización de tubería*

---

---

## 5.4 FLUJO EXCÉNTRICO Y DIFERENCIA DE DENSIDAD

---

Al diseñar fluidos de un régimen de flujo en específico, se asume que el flujo se encuentra en un espacio anular perfectamente centrado. En realidad, esto no es cierto. En un espacio anular excéntrico, el fluido tiene tendencia a tomar la trayectoria de la menor resistencia; el fluido tenderá a desplazarse por la sección más ancha del espacio anular más fácilmente.

Bajo estas condiciones, el régimen de flujo de la sección más ancha puede ser diferente al régimen de flujo de la sección más angosta. Por ejemplo, el flujo podría ser turbulento en la sección ancha y laminar ó incluso flujo nulo en la sección angosta. Bajo esas condiciones, una gran diferencia de densidad entre el cemento y el fluido de perforación pueden mejorar la eficiencia del desplazamiento. Sobre todas estas condiciones, la velocidad de los fluidos es la que determina principalmente la eficiencia del desplazamiento.

A manera de regla general, el diseño de espaciadores y cemento puede seguir el enfoque de baja a alta densidad. Esto es, el espaciador debe ser más pesado que el fluido de perforación y el cemento más pesado que el espaciador.

---

---

## 5.5 ALTOS RANGOS DE DESPLAZAMIENTO

---

Las mayores eficiencias de desplazamiento observadas en pruebas en una instalación de modelos a escala, ocurren de forma consistente a los rangos más altos de desplazamiento, independientemente del régimen de flujo de la lechada de cemento. La mayor eficiencia de desplazamiento ocurrió bajo condiciones de flujo turbulento; sin embargo, al no lograrse el flujo turbulento, el desplazamiento será consistentemente mejor a los rangos más altos obtenidos bajo condiciones similares para composiciones de lechada también similares.

Con los otros factores siendo iguales, una lechada de cemento delgada aplicada por debajo de condiciones de flujo turbulento exhibió una mayor eficiencia de desplazamiento de fluido de perforación que una lechada más espesa aplicada a rangos bajos. Frecuentemente, el flujo turbulento no es una opción viable, como el caso en que las condiciones del pozo y de las formaciones crean presiones de fricción que exceden el gradiente de fracturación de la formación (formaciones desdeñables). Los datos de prueba y de campo indican claramente que incluso cuando la turbulencia no es posible, los rangos de bombeo deben maximizarse.

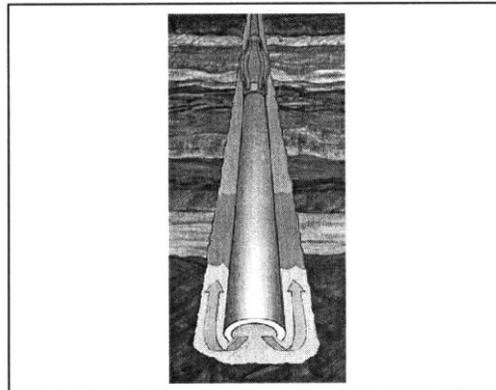
---

---

## 5.6 ESPACIADORES Y CEMENTOS NO DENSIFICADOS

---

Los espaciadores no densificados a menudo se conocen como cementos no densificados. El agua es un densificado común. Estos son más efectivos y económicos en lodos de baja densidad que se encuentran cerca de la densidad del cemento no densificado. Son los más fáciles de situar en un flujo turbulento. A menudo, se utilizan aditivos que adelgazan el lodo de perforación ó que atacan químicamente el enjarre de lodo.



*Figura 4.7 - Uso de espaciadores.*

Para lodos densificados, los espaciadores deben diseñarse con materiales densificantes y que hagan que el espaciador sea igual ó mayor densidad que el lodo. Un espaciador de una menor densidad dará como resultado una mala eficiencia de desplazamiento de lodo. La viscosidad de los espaciadores densificados pueden modificarse para incrementar aún más el desplazamiento del lodo.

---

---

## 5.7 GASTO ÓPTIMO DE DESPLAZAMIENTO

---

### Factores de desplazamiento

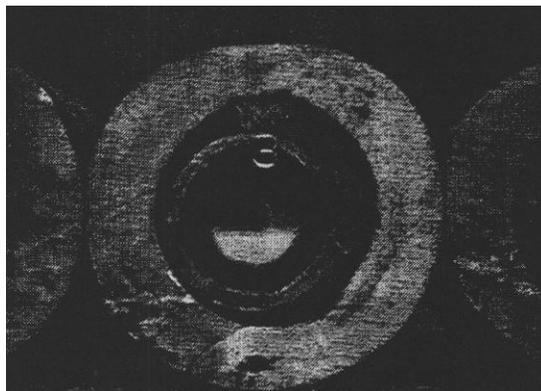
Varios factores de desplazamiento afecta la remoción de lodos. Estos son:

- Gasto del flujo
- Movimiento de la tubería
- Condición del fluido de perforación
- Centralización de la tubería
- Cantidad de fluidos
- Diferencias de densidades

El primer factor a ser discutido es la velocidad anular (gasto del flujo). enseguida se muestra una lista de los parámetros de pruebas, los cuales se mantienen constantes a pesar de los factores de desplazamiento envueltos en la prueba de remoción de lodos.

- Revestimiento de 5 pulgadas
- Agujero de 6 ½ pulgadas
- Lodo de 16 lbs/gal.
- Lechada de cemento de 17 lbs/gal.
- Temperatura circulante del fondo del agujero (BHCT) es 180 °F
- Temperatura estática del fondo del agujero (BHST) es 230 °F

- 
- 
- A 1 bbl/min (flujo de tapón), 45% del lodo fue desplazado (Fig. 7.13)
  - A 4 bbl/min (flujo laminar), 83% del lodo fue desplazado (Fig. 7.14)
  - A 7 bbl/min (flujo turbulento), 92% del lodo fue desplazado (Fig. 7.15)



**Fig. 5.8 – 45% Desplazamiento de lodo con tapón de flujo**

El segundo factor es el efecto del movimiento de la tubería, el cual rompe la fuerza de adherencia del lodo y remueve mejor el lodo. 45% de eficiencia en la remoción del lodo es alcanzado sin un movimiento de la tubería. Sin embargo, 97% de eficiencia en remoción de lodo es alcanzado con la rotación de la tubería a 20 rpm. Hay dos tipos de movimientos de tubería rotación y reciprocante.

Un llenado uniforme de cemento alrededor de la tubería de revestimiento es necesario para aislar las zonas. Un 50% de separación, o centralización de la tubería de revestimiento, debe ser mantenido para alcanzar un llenado uniforme de cemento alrededor de la tubería.

---

---

Sin embargo, el factor más importante para controlar un buen trabajo de cementación es la condición del fluido de perforación. Los fluidos de perforación deberán:

- Proveer buenos retornos a la superficie.
- Poseer buenas propiedades de flujo

Sólidos bajos	<u>Ideal</u>
YP-10 ó menos	2
PY-20 ó menos	15
MF-60 ó menos	45
FL-15cc ó menos	5

- Circular fácilmente
- Tener un espaciador adecuado que remueva el lodo circulable.

En general, entre mejor sean las propiedades del lodo, mejor será el trabajo de cementación. El lodo con alta pérdida de fluido, inhibe la remoción de lodo. El tener el régimen en buen estado requiere poca pérdida de fluido y baja fuerza de cohesión. El mantener los lodos circulando mantiene una mayor eficiencia. El mantener estático el cemento por periodos cortos de tiempo incrementa la posibilidad de un mal trabajo de cementación.

<b>Cantidad de Tiempo Estático</b>	<b>Eficiencia del Cemento</b>
4 horas	50%
2 horas	62%
5 minutos	83%
No estático	97%

La arena fue utilizada en el proyecto de desplazamiento para determinar los efectos de colocación de esta, en la lechada de cemento. El tamaño de la arena y concentración, fueron variables. La arena actuó como un escareador y ayudo en el desplazamiento de lodo (Tabla 5.1).

<u>Cantidad de arena 10-20</u>	<u>Gasto (bbl/min)</u>	<u>Porcentaje de remoción de lodo</u>
10 lb/sacos	1	61%
30 lb/sacos	1	85%
10 lb/sacos	4	97%
30 lb/sacos	4	97%
30 lb/sacos	7	100%

Tabla 5.1 – Arena en Cemento

---

---

## RECOMENDACIONES.

- La principal restricción para desarrollar una cementación primaria exitosa, es que la sección del pozo a cementar este limpio de residuos de lodo, por lo que es indispensable una buena circulación de un bache de fluido lavador, para evitar la contaminación y en consecuencia, la presencia de diversos problemas en la cementación de las tuberías de revestimiento.
- Desechar técnicas empíricas utilizadas por los trabajadores para una cementación primaria.
- Apegarse al uso de un programa computacional, realizando modelos matemáticos, que nos garantice la certeza de la Densidad Equivalente de Circulación, para poder ajustar los gastos e incluso densidades ó longitudes de los baches, sobre el desarrollo de la operación de cementación.
- Manejar una buena centralización de las tuberías de revestimiento, pues a mejor centralización, mejor eficiencia de circulación de los baches a introducir durante la cementación.
- Realizar previamente a la circulación de los 3 baches, un lavado de las paredes del pozo con aditivos, que hacen que reduzca la fuerza de adherencia ó fuerza de gel del enjarre.
- El ingeniero responsable de la cementación deberá de supervisar personalmente que todo el equipo utilizado este en óptimas condiciones de operación, además de considerar un margen de tolerancia mayor al material proyectado a utilizarse, por cualquier eventualidad que se presente.

---

---

## CONCLUSIONES.

- Para asegurar una exitosa cementación primaria, se debe tener una eficaz circulación de los baches lavadores, espaciadores y de cemento por el espacio anular, resultado de una correcta centralización de la tubería.
- La remoción máxima del enjarre que se pueda llegar a alcanzar, previo a la operación de cementación, determinará el éxito de una buena adherencia del cemento en la formación.
- Eliminar el uso de prácticas empíricas de cómo hacer una cementación, las cuales no tienen las bases ingenieriles para afrontar problemas circunstanciales que pueden llegar a presentarse durante la operación, Esto es la esencia del presente trabajo de investigación.
- La inversión económica proyectada para desarrollar integralmente el pozo, no será modificada al realizar una cementación primaria exitosa.

---

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. Recommended Practice For Testing Well Cements, API Recommended Practice 10B Twenty-Second Edition, December 1997
2. Committee 10 Committee On Standardization of Well Cements, American Petroleum Institute "Worldwide Cementing Practices" May 1995
3. Specification for Cements and Materials For Well Cementing, API Specification 10A Twenty-third Edition, April 2002
4. Developed by Halliburton Energy institute "Cementing I" 2003
5. Erik B. Nelson "Well Cementing" 1990 Schlumberger, Educational Services Texas.
6. BJ Services Employee Development Center Región Latinoamericana Neuquén, Argentina "Cementaciones Primarias Y Secundarias" Abril 18 al 26, 2006
7. Smith, R.C.: "Successful Primary Cementing Can be a Reality," J. Pet. Tech. (November 1984) 1851-1858.
8. Hartoa, J. J., Davies, D.R., and Stewart, R. B.: "An Integrated Approach for Successful Primary Cementations," J. Pet. Tech. (September 1983), 1600-1610.
9. Johnson, K.: "Successful Liner Completions Oil.the Murchison Platform," paper SPE presented at European Petroleum Conference, London, October 25-28, 1982.
10. Perkins, A.A. and Double, E.: "Method of Cementing Oil Wells," U.S. Patent No. 1,011,484 (December 12, 1911), filed October 27, 1909.
11. Howard G.C., and Clark, J.B.: "Factors to be Considered in Obtaining Proper Cementing of Casing," Drill, and Prod. Prac., API (1948) 257-272.
12. Dowsley, W.D.: "Improved Casing Cementing Practices in the United States," Oil and Gas Journal (December 15, 1949) 76.
13. Teplitz, A.J., and Hassebroek, W.E.: "An Investigation of Oil Well Cementing," Drill and Prod. PRAC. API (1946) 76-101; Pet. Eng. Annual (1946) 444.

- 
- 
14. Jones, P. H., and Berdine, D.: "Oil-Well Cementing – Factors Influencing Bond Between Cement and Formation," Oil and Gas Journal (March 21, 1940) 71; Petroleum World (June 1940) 26; Drill and Prod. Prac., API (1940) 45-63.
  15. Farris, P. F.: "Practical Evaluation of Cements for Oil Wells," Drill and Prod. Prac., API (1941) 117-30.
  16. Brice, J. W., Jr., and Holmes, R. C.: "Engineered Casing Cementing Programs Using Turbulent Flow Techniques," J. Pet. Tech. (May, 1964) 503-508
  17. Staale, K. A.: "Rheological Design of Cementing Operations," J. Pet. Tech. (March 1962) 323-328; Trans., AIME, 225.
  18. Parker, P. N., Ladd, B.J., Ross, W. N., and Wahl, W. W.: "An Evaluation of a Primary Cementing Technique Using Low Displacement paper SPE 1234 presented at SPE-AIME 40th Annual Fall Meeting, Denver, Colorado, October 3-6, 1965 .
  19. McLean, F.H., Manry, C.W., and Whitaker, W. W.: "Displace Mechanics in Primary Cementing," J. Pet. Tech. (February 1967) 251-260.
  20. Gibbs, M.A.: "Delaware Basin Cementing Problems and Solutions," J. Pet. Tech. (October 1966) 1281-1285.
  21. Carter, L. G., and Evans, G.W.: "A Study of Cement-Pipe Bonding," J. Pet. Tech. (February 1964) 157-160.
  22. Hoch, P. S.: "Cementing Techniques Used for High Angle, S-Type Directional Wells," Oil and Gas Journal (June 22, 1970) 88-93.
  23. Carter, L.G., and Slagle, K.A.: "A Study of Completion Practices to Minimize Gas Communication," J. Pet. Tech. (September 1972) 1170-1174.
  24. Haut, R.C. and Craok, R. J.: "Primary Cementing: The Mud Displacement process," paper 8253 presented in the 1979 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, September 23- 26.

- 
- 
25. Carter, L.G., Cook, C., and Snelson, L: "Cementing Research in Directional Gas Well Completions," paper SPE 4313 presented in the 1973 SPE Annual European Meeting, London, April 2-3.
  26. Haut, R. C. and Crook, R. J.: "Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids," J. Pet. Tech. (August 1982) 1828-34.
  27. Bannister, C.E., and Bengel, D.G.: "Pipe Flow Rheometry: Rheological Analysis of a Turbulent Flow System Used for Cement Placement, paper SPE 10216 presented at SPE-AIME 56th Annual Fall Technical Conference, San Antonio, Texas, October 5-7, 1981.
  28. Smith, R. c.: "Check List Aids Successful Primary Cementing," Oil and Gas Journal (November 1, 1982) 72-75.
  29. Arnold, E. S.: "Cementing: Bridging the Gap From Laboratory Results to Field Operations, J. Pet. Tech. (December 1982) 1843-2852.
  30. Sauer, C.W., and Landrum, W.R.: "Cementing: A Systematic Approach, "paper SPE 11981 presented at SPE-AIME 58th Annual Technical Conference, San Francisco, California, October 5-8 1983.
  31. Keller, S. F., Crook, H. J., Haut, R.C., and Kulakofsky, D. S.: "Problems Associated with Deviated-Wellbore Cementing," paper SPE 11979 presented at SPE-AI~E 58th Annual Technical Conference, San Francisco, California, October 5-8, 1983.
  32. Dowell-Schlumberger, "Cementing Technology", London, Nova Publications, 1984 (Chapter II, pages 3-5).
  33. Bearden W. C. and Lane R. D.: "Engineered Cementing Operations to Eliminate WOC," Drill and Prod. Prac., API - (1961) 17.
  34. Myers, G. M., and Sutko, A. A.: "The Development and Application of a Method for Calculating the Forces on Casing Centralizers," Preprint Paper No. 851-42-H. Spring Meeting of the Mid-Continent District, Amarillo, Texas, April 3-5, 1968, Division of Production API, Dallas, Texas.

- 
- 
35. API Spec. 100, Second Edition: "API Specification for Casing Centralizers," American Petroleum Institute, Dallas, Texas, February 1983.
  36. Lee, H. K., Smith, F.C., and Tighe R.E.: "Optimum Spacing for Casing Centralizers," paper SPE 13043.
  37. Graharm, H. L.: "Rheology-balanced Cementing Imposes Primary Success," Oil and Gas Journal (December 18, 1972) 53-60.
  38. Burkhardt, J. A.: "Wellbore Pressure Surges produced by Pipe Movement," J. Pet. Tech. (June 1961) 595-605. Trans., AIME, 222.
  39. Goldsmith, H. G.: "Graph Spots Excessive Pressure Surges on Rig," Oil and Gas Journal (March 5, 1973) 67-72.
  40. Stringfellow, B.: "Tests Find Hammering Fluid Cutting, Erosion Cause Float Shoe Failures," Oil and Gas Journal (January 21, 1985) 66-72.
  41. Cowthran, J. L.: "Technology Used To Improve Drilling Performance and Primary Cementing Success in Katy Field," Paper SPE 10956 presented at SPE-AIME 57th Annual Fall Technical Conference, New Orleans, Louisiana, September 26-29, 1982.
  42. Landrum, W. P., and Turner, R.D.: "Rotating Liners During Cementing in the Grand Isle and West Delta Area," paper SPE 11420 presented at IA.DC/SPE 1983 Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, February 20-23, 1983.
  43. Metzner, A. B., and Reed, J. C.: A. I. ch. E. Journal, Volume 1 (1955) 434.
  44. Beirute, R. M.: "The Phenomenon of Free Fall during Primary Cementing," paper SPE 13045 presented at SPE-AIME 59th Annual Technical Conference, Houston, Texas, and September 16-19, 1984.
  45. Whlmeier, M., and Lam, S.: "Mathematical Algorithm Aids Analysis of "U-tubing" during Slurry Placement," Oil and Gas Journal (January 7, 1985) 80-86.
  46. Pryde, J. K.: "Potential Collapse problems When Cementing Deep Casing Strings with Large Cement Volumes," Conoco Drilling Engineering Bulletin 157 (July 1983).
- 
-

- 
- 
47. Boyd, P.A., Whitfill, D.L., Carter, T.S., and Allamon, J. P." "Ne\v Base Oil Used in Low-Toxicity Oil Muds," J. Pet. Tech. (January 1985) 137-142.
  48. Goodwin, Joe: "Centralizer placement in deviated holes" Drilling. (April 1985) 54-57.