

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **DESARROLLO DE UNA ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE LECHADA A UTILIZAR EN UN PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN SECUNDARIA A BAJA PRESIÓN EN LA REGIÓN ORIENTAL DEL PAÍS.**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título de  
Ingeniero de Petróleo  
Por el Br. Mata Barreto, Alejandro Rafael

Caracas, Junio 2004

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **DESARROLLO DE UNA ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE LECHADA A UTILIZAR EN UN PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN SECUNDARIA A BAJA PRESIÓN EN LA REGIÓN ORIENTAL DEL PAÍS.**

TUTOR ACADEMICO: Prof. Edalfo Lanfranchi.  
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Rafael Ángel Pérez.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título de  
Ingeniero de Petróleo  
Por el Br. Mata Barreto, Alejandro Rafael

Caracas, Junio 2004

**Mata B., Alejandro R.**

**DESARROLLO DE UNA ECUACIÓN PARA DETERMINAR  
EL VOLUMEN DE LECHADA A UTILIZAR EN UN  
PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN  
SECUNDARIA A BAJA PRESIÓN EN LA  
REGIÓN ORIENTAL DEL PAÍS.**

Tutor Académico: Prof. Edalfo Lanfranchi. Tutor Industrial: Ing. Rafael Ángel Pérez.  
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año  
2004.

**Palabras Claves:** Cementación, Forzamiento, Aditivo, Filtración,  
Deshidratación, Curado.

**RESUMEN**

La técnica de cementación secundaria o forzada, requiere de un procedimiento analítico para calcular las cantidades de cemento a utilizar, el cual no existe y constituye el problema fundamental para su aplicación. El método actual para estimar estos volúmenes es básicamente empírico. El trabajo especial de grado fue desarrollado en la empresa San Antonio PRIDE, ubicada en la población de San José de Guanipa, Estado Anzoátegui. Los datos utilizados corresponden a trabajos de forzamiento realizados en los campos; Araivel, Oritupano, Leona y San Tomé, los cuales pertenecen a los estados Anzoátegui y Monagas, de la región oriental del país. El objetivo principal de este trabajo es, desarrollar una ecuación para determinar el volumen de lechada a utilizar en un procedimiento de cementación secundaria a baja presión. Este se basa en tres principios fundamentales; la Prueba de Integridad de Presiones, la Ley de Darcy y la Ley de Formación de Filtro Pastel, todos ellos enmarcados en la ciencia de la mecánica de rocas.

Una lechada óptima tiene como función principal lograr un llenado completo de las cavidades o fisuras en la matriz rocosa y reducir a un mínimo el tamaño de los nódulos en el revestidor. La metodología propuesta, plantea la posibilidad de determinar la cantidad de lechada necesaria para un trabajo de cementación secundaria, sin que esto indique que la lechada sometida a estudio es la más adecuada para las condiciones de la arena a ser tratada.

Los resultados alcanzados presentan una relación de proporcionalidad entre los volúmenes colocados en la formación y los volúmenes calculados por la ecuación desarrollada, llegando la diferencia de esta comparación en algunos casos a ser menor de medio barril de lechada de cemento.

Las limitaciones se encuentran enmarcadas en la posibilidad de ejecutar la Prueba de Integridad de Presiones, en la inadecuada selección y diseño de la lechada a utilizar, en la falta de conocimiento preciso de las características inherentes de la lechada y del desconocimiento de las condiciones del intervalo del pozo a ser reparado.

Caracas, 9 de junio de 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller, titulado:

**"DESARROLLO DE UNA ECUACIÓN PARA DETERMINAR  
EL VOLUMEN DE LECHADA A UTILIZAR EN UN  
PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN  
SECUNDARIA A BAJA PRESIÓN EN LA  
REGIÓN ORIENTAL DEL PAÍS".**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor lo declaran APROBADO.

Prof. Freddy Paz  
JURADO

Prof. Isnardo Moya  
JURADO

Prof. Edalfo Lanfranchi  
TUTOR INDUSTRIAL

# INDICE GENERAL

RESUMEN.....	iii
LISTA DE TABLAS .....	vii
LISTA DE GRÁFICOS .....	viii
INTRODUCCION .....	ix
CAPITULO I	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	11
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	12
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
CAPITULO II	
2.1. MARCO TEÓRICO .....	13
2.2. TEORÍA DE LA CEMENTACIÓN FORZADA .....	15
2.3. APLICACIÓN DE CEMENTACIÓN FORZADA .....	25
2.4. PRINCIPIO BÁSICO DEL FORZAMIENTO.....	28
2.5. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA LECHADA. ....	29
2.6. TIPOS DE FORZAMIENTO .....	31
2.7. TÉCNICAS DE FORZAMIENTO.....	33
2.8. MÉTODOS DE BOMBEO.....	36
2.9. PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES .....	38
2.10. DISEÑO Y PREPARACION DE LA LECHADA.....	40
2.11. PROCEDIMIENTO PARA UN TRABAJO DE FORZAMIENTO.....	44
2.12. EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE FORZAMIENTO.....	47
2.13. RAZONES DEL FRACASO DE UN FORZAMIENTO .....	50
2.14. APLICACIÓN DE LA LEY DE DARCY .....	53
CAPITULO III	
3.1. METODOLOGIA.....	55
3.3. PROCEDIMIENTO REALIZADO .....	62
3.4. LIMITACIONES .....	67

3.5. TABLA DE RESULTADOS.....	68
3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	76
CONCLUSIONES .....	77
RECOMENDACIONES.....	78
BIBLIOGRAFÍA .....	79
ANEXOS .....	81
A. Variación del Espesor del Filtro Pastel.....	82
B. Variación de la Viscosidad del Filtrado.....	82
C. Variación del Flujo de Filtrado.....	83
D. Crecimiento del Espesor del Filtro Pastel.....	83
E. Formato de los Datos de Entrada en el Programa de Cálculo.....	84
F. Formato de los Datos de Salida en el Programa de Cálculo.....	85
G. Cálculos Realizados.....	86

## LISTA DE TABLAS

### TABLA

1. Permeabilidad del Pastel en función de la concentración de aditivos (para el control de filtrado) .....	20
2. Efecto de la presión diferencial sobre la permeabilidad de un filtro Pastel .....	21
3. Efecto de la permeabilidad de la formación para una tasa de flujo que pasa a través de un filtro pastel .....	22
4. Datos Experimentales .....	55
5. Resultados Finales .....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

### GRÁFICO

A. Relación entre las propiedades de la lechada, geometría de las perforaciones y tamaño del nodo cemento .....	19
B. Variación del Espesor del Filtro Pastel .....	65
C. Variación del Flujo de Filtrado .....	66
D. Comparación de los volúmenes de lechada .....	67
E. Comparación entre el volumen real y el calculado .....	67
F. Diferencia entre el volumen calculado y el real .....	68
G. Volúmenes en Exceso utilizado .....	68
H. Comparación de los volúmenes requeridos .....	69



# INTRODUCCION

Un trabajo de cementación satisfactoria es la fase más importante en la vida de un pozo, bien sea para convertirlo a productor, a inyector o para abandonarlo, por esta razón, se debe poner especial atención en la coordinación de las características requeridas del cemento, aditivos, ensayos, planificación del trabajo y en el desarrollo de la operación, ya sea, en liners, a presión o de tapones de abandono. También hay que tomar en cuenta los diversos materiales y equipos de bombeo, mezcladores, sistemas de transporte, herramientas y accesorios de fondo necesarios para llevar a cabo dicha tarea.

El proceso de cementación de pozos ha ido transformándose en un trabajo complejo, debido a los avances tecnológicos. Las nuevas exigencias imponen alcanzar grandes profundidades, por lo que es necesario evaluar las fuerzas que actúan sobre los distintos componentes que constituyen la estructura del pozo. En el momento cuando uno de los principios fundamentales no se considera adecuadamente, ocurre una falla, donde la mejor forma de subsanarlo es a través de un procedimiento de cementación secundaria.

El problema básico de esta técnica consiste en no disponer de un procedimiento analítico para calcular las cantidades de cemento a utilizar, ya que es muy difícil cuantificar el volumen detrás del revestidor que quedo sin recibir la lechada. La técnica actual para estimar estos volúmenes es básicamente empírica. Existe el riesgo de que estimaciones de volumen muy grande pueden inducir un daño a la formación, debido a la reducción de la permeabilidad o por el fracturamiento de la misma y estimaciones de volumen muy pequeña el fracaso del trabajo, debido a que no alcanza a cubrir el espacio libre mínimo requerido de cemento. Los diversos parámetros y factores a tomar en cuenta en esta operación, tornan a esta técnica actualmente en un arte donde la mejor herramienta para la solución de los problemas es la experiencia en la materia.

El trabajo especial de grado fue desarrollado en la empresa San Antonio PRIDE, ubicada en la población de San José de Guanipa, Estado Anzoátegui. Esta empresa esta especializada en trabajos relacionados a completación, evaluación, empaques y cementación de pozos petrolíferos. Los datos utilizados corresponden a trabajos de forzamiento ejecutados en los campos; Araivel, Oritupano, Leona y San Tomé, los cuales están localizados en los estados Monagas y Anzoátegui, de la región oriental del país.

El objetivo principal del presente trabajo es, desarrollar una ecuación para determinar el volumen de lechada a utilizar en un procedimiento de cementación secundaria a baja presión, por medio de la aplicación de la prueba de integridad de presiones y del conocimiento de las características de la lechada a utilizar. Para ello se hace énfasis en el desarrollo de la prueba de integridad de presiones y de su influencia en las inmediaciones del pozo, así como también, en la aplicación de la Ley de Formación de Filtro Pastel y de la Ley de Darcy con el propósito de determinar el comportamiento de los fluidos inyectados. Todo enmarcado en la ciencia de la mecánica de rocas.

Dentro de este estudio, se evalúa la influencia de las presiones diferenciales sobre la lechada de cemento y los efectos que esto ocasiona en las propiedades fundamentales de la misma, en cuanto a la variación de la densidad, la pérdida de filtrado, las tasas de filtración y el volumen acumulado de filtrado.

Las limitantes se enmarcan en la posibilidad de ejecutar la Prueba de Integridad de Presiones, en la inadecuada selección y diseño de la lechada a utilizar, la cual debe ser apropiada a las características de la roca. Otra de las limitaciones, consiste en el conocimiento preciso de las características inherentes de la lechada y del desconocimiento de las condiciones del intervalo del pozo a ser reparado. La prueba de integridad de presiones no se puede realizar en litologías muy poco consolidadas o altamente fracturadas, así como también en sistemas rocosos de baja porosidad y de muy baja permeabilidad, debido a que esta consiste en inyectar salmuera o agua a presiones inferiores a la presión de fractura de la formación.

## **CAPITULO I**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El problema fundamental consiste en la complejidad de cuantificar las cantidades de cemento a utilizar en una operación de forzamiento.

Estimaciones muy elevadas contribuirían en gran medida en el detrimento de las propiedades de la roca, debido a la disminución de la permeabilidad y porosidad producto del taponamiento de una gran porción del espacio rocoso productor, así como también, puede propiciar un posible fracturamiento de la formación favoreciendo la migración de los hidrocarburos a otros estratos con arenas de menor presión, sin embargo, estimaciones muy bajas no servirían para lograr realizar una operación realmente efectiva.

Esto requiere de un volumen adecuado compatible con las características litológicas del yacimiento y con la mecánica de los fluidos adyacentes al pozo, para de esta manera causar el menor daño posible a la zona productora.

### **1.2. JUSTIFICACIÓN**

El conocimiento de las cantidades adecuadas de lechada necesaria para realizar un procedimiento de cementación forzada a baja presión, trae como consecuencia; una reducción considerable en la posibilidad de daño que se puede ocasionar a la formación productora, en la disminución de la posibilidad de fracturar la misma, en la agilización de los procedimientos de preparación, mezclado, tiempo de inyección y posterior limpieza de las cantidades remanentes depositadas en el revestidor, los cuales contribuyen en conjunto a disminuir los costos y a la optimización del procedimiento de cementación.

### **1.3. OBJETIVO GENERAL**

DESARROLLAR UNA ECUACIÓN PARA DETERMINAR EL VOLUMEN DE LECHADA A UTILIZAR EN UN PROCEDIMIENTO DE CEMENTACIÓN SECUNDARIA A BAJA PRESIÓN, POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DE LA PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES Y DEL CONOCIMIENTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA A UTILIZAR.

### **1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar datos asociados a los procesos de cementación secundaria.
- Analizar los datos recopilados a fin de determinar los parámetros más relevantes asociados a los procesos de cementación secundaria.
- Analizar los datos básicos del pozo.
- Analizar las fuerzas presentes en el pozo al momento de realizar una cementación secundaria.
- Evaluar la aplicabilidad de la Prueba de Integridad de Presiones en el proceso de determinación de los volúmenes de cemento necesarios.
- Evaluar el proceso de cálculo de la lechada en la actualidad.
- Comprender el procedimiento de mezcla de la lechada en el laboratorio y en el campo, estableciendo la correlación existente entre ambas.
- Comprender el comportamiento del parámetro tiempo de espesamiento.
- Comprender la importancia del control de la pérdida de filtrado.
- Comprender la reología de la lechada de cemento.
- Comprender la resistencia a la compresión de un cemento en el proceso de inyección y de curado.
- Comprender el proceso de diseño de una cementación secundaria.

## CAPITULO II

### 2.1. MARCO TEÓRICO

La cementación forzada ha sido por mucho tiempo una operación de uso común. Numerosos trabajos de forzamiento se realizan a diario bajo una amplia variedad de condiciones de fondo y basados en la experiencia acumulada durante muchas décadas de trabajos de campo. Sin embargo, los conceptos erróneos todavía persisten y los fracasos en las operaciones no son raros, como consecuencia se produce un incremento en los costos de perforación y completación.

Este trabajo presenta un análisis de la tecnología de la cementación forzada, con el objetivo de contribuir en un mejor diseño y ejecución de tales procedimientos.

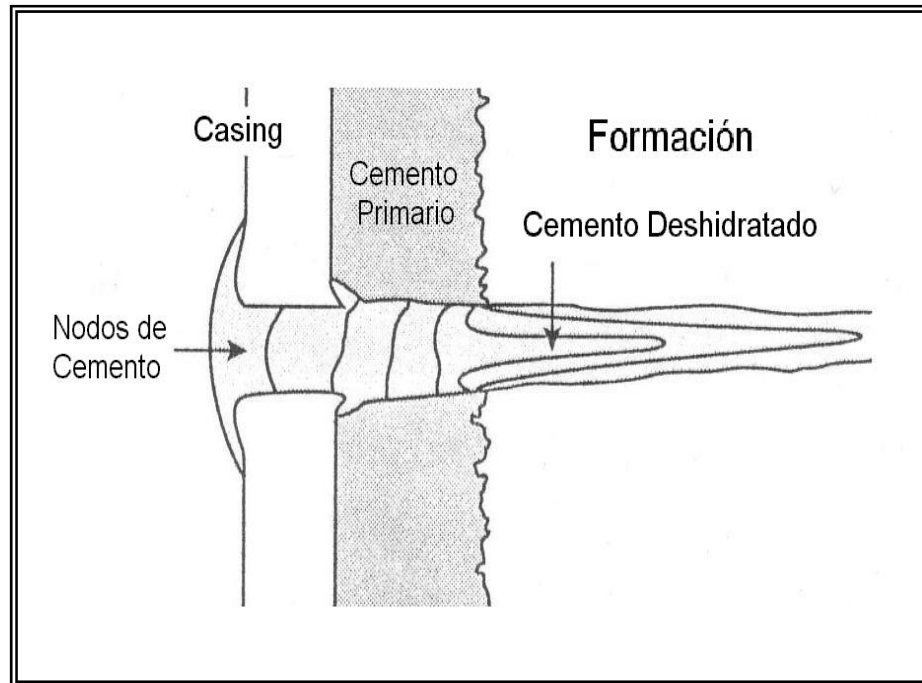
La cementación forzada se define como el proceso de obligar a una lechada de cemento, a pasar a través de los espacios porosos o fisuras de una formación permeable, debido a la aplicación de una presión hidráulica. Cuando la lechada es forzada contra una formación permeable, las partículas sólidas se filtran fuera quedándose en la cara de la formación mientras que la fase acuosa entra en la matriz de la formación.

Un trabajo de forzamiento correctamente ejecutado causa que el cemento resultante forme un pastel que llena los espacios libres o fisuras entre la formación y el revestidor. Al curar, el pastel de cemento forma un sello sólido impenetrable. En casos donde la lechada se pone en un intervalo fracturado, los sólidos del cemento deben desarrollar un filtro pastel en la cara de la fractura y sellar a la misma.

La cementación forzada tiene muchas aplicaciones durante todas las fases de operación de un pozo, las más comunes se listan a continuación:

- La reparación de un trabajo de cementación primaria defectuosa, en el cual faltó cemento en el espacio anular, no hay una buena adherencia del cemento o debido a un inadecuado desplazamiento del lodo de perforación.
- Para evitar la intrusión de agua en la zona productora.
- Para la conversión de pozos viejos o abandonados con problemas de revestidor en pozos inyectoros.

- La reparación del revestidor debido a fisuras producto de la corrosión.
- Para reducir la producción de gas o la relación gas - petróleo (RGP), aislando las zonas de gas de los intervalos de petróleo adyacentes.
- Abandono de una zona improductiva o depletada.
- Para sellar todos, o parte, de una o más zonas de inyección/producción con la finalidad de dirigir la inyección/producción en los intervalos deseados.
- Para sellar zonas de pérdida de circulación.
- Para proteger a una zona productora contra la migración fluidos no deseables.



**FIGURA 1** - Proceso de formación de un nodo de cemento en un procedimiento de forzamiento - Fuente Hook y Ernst.

## 2.2. TEORÍA DE LA CEMENTACIÓN FORZADA

Sin tener en cuenta la técnica usada durante un trabajo de forzamiento, la lechada de cemento (una suspensión de sólidos) está sujeta a una presión diferencial contra un filtro de piedra permeable. Los fenómenos físicos resultantes son; filtración, deshidratación del cemento, deposición del filtro pastel y en algunos casos, el fracturamiento de la formación. La lechada sujeta a una presión diferencial, pierde parte de su agua hacia el medio poroso y un pastel de cemento parcialmente deshidratado se forma.

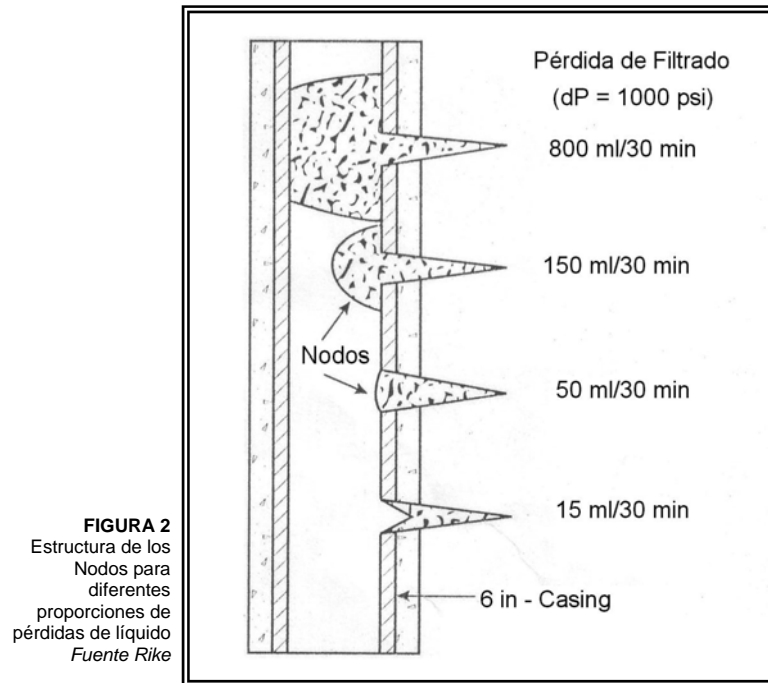
Los cementos se endurecen mientras se filtran contra una formación permeable, los mismos presentan una permeabilidad inicial alta pero debido a que la acumulación de las partículas de cemento aumentan, el espesor del pastel y la resistencia hidráulica también aumentan, como resultado, disminuye la proporción de filtración y la presión aumenta lo cual deshidrata la lechada del cemento de forma marcada. La tasa de aumento del filtro pastel es una función de cuatro parámetros:

- La permeabilidad de la formación.
- La presión diferencial aplicada.
- Tiempo de espesamiento.
- La capacidad de la lechada de perder fluido a las condiciones de fondo.

Cuando hay un forzamiento contra una formación de permeabilidad dada, la tasa de deshidratación de la lechada es directamente proporcional a la tasa de pérdida de filtrado. Cuando se realiza un forzamiento contra una formación de baja permeabilidad, una lechada con baja pérdida de filtrado se deshidrata más lentamente, y el tiempo de duración de la operación puede ser excesivo.

Cuando se realiza un forzamiento contra una formación de alta permeabilidad, una lechada con una alta tasa de pérdida de filtrado se deshidrata rápidamente, por consiguiente, los pozos pueden ahogarse debido al volumen acumulado de filtro pastel deshidratado dentro del revestidor y causar que no pueda ser extraído el cemento mediante el bombeo en reversa. Las lechadas de forzamiento deben ser

diseñadas a la medida para controlar la proporción de crecimiento del pastel y permitir la formación de un filtro pastel uniforme sobre toda la superficie permeable.



### 2.2.1. Estudio de Binkley, Dumbauld y Collins

Estos científicos desarrollaron un estudio denominado *Ley de Formación del Filtro Pastel para una Suspensión* (como una lechada de cemento). Cuando un volumen de filtrado ( $\partial Q$ ) pasa a través de un área superficial permeable ( $A$ ), donde un filtro pastel de espesor ( $\partial S$ ) y de porosidad ( $\phi$ ), es depositado. Esta relación se plantea en la siguiente ecuación.

$$\partial S = \frac{f}{1 - f - \phi} \cdot \frac{\partial Q}{A} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$f = \frac{V_{\text{Sólido}}}{V_{\text{Sólido}} + V_{\text{Líquido}}} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde:

$\partial S$  = Espesor del filtro pastel, ft.

$f$  = Fracción del volumen de sólidos en suspensión, adimen.

$\phi$  = Porosidad de la roca, fracción.



$\partial Q$  = Volumen de filtrado, ft<sup>3</sup>.

$A$  = Área de la superficie permeable, ft<sup>2</sup>.

$w$  =  $f/(1 - f - \phi)$ , se llama *Constante de Deposición*, adimen.

$V_{\text{Sólido}}$  = Volumen total de sólidos por galón de lechada, gal.

$V_{\text{Líquido}}$  = Volumen total de líquido por galón de lechada, gal.

La *Ley de Formación del Filtro Pastel*, puede escribirse como:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{w \cdot q}{A} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde:

$q$  = Tasa de flujo de filtrado, ft<sup>3</sup>/min.

$\partial S/\partial t$  = Velocidad de crecimiento del espesor del pastel, ft/min.

Asumiendo que la caída de presión en la superficie de filtración es despreciable; aplicando la teoría de Binkley y la Ley de Darcy, establecieron las ecuaciones siguientes:

**a. Crecimiento del filtro pastel en función del tiempo de filtración:**

$$S = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot w \cdot \Delta P}{\mu} \cdot t^{1/2}} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde:

$S$  = Espesor del filtro pastel, ft.

$k$  = Permeabilidad del filtro pastel (constante), Darcy.

$\mu$  = Viscosidad del filtrado, cP.

$\Delta P$  = Presión diferencial, psi.

$w$  = Constante de deposición, adimen.

$t$  = Tiempo de filtración, min.

**b. Volumen acumulado de filtrado en función del tiempo de filtración:**

$$Q = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot A^2 \cdot \Delta P}{\mu \cdot w} \cdot t^{1/2}} \quad (\text{Ec. 5})$$

donde:

- $Q$  = Volumen acumulado de filtrado,  $\text{ft}^3$ .  
 $k$  = Permeabilidad del filtro pastel (constante), Darcy.  
 $A$  = Área de la superficie permeable,  $\text{ft}^2$ .  
 $\mu$  = Viscosidad del filtrado, cP.  
 $\Delta P$  = Presión diferencial, psi.  
 $w$  = Constante de deposición, adimen.  
 $t$  = Tiempo de filtración, min.

**c. Permeabilidad del filtro pastel:**

$$k = \frac{\mu \cdot Q \cdot S}{2 \cdot A \cdot t \cdot \Delta P} \quad (\text{Ec. 6})$$

donde:

- $S$  = Espesor del filtro pastel, ft.  
 $Q$  = Volumen acumulado de filtrado,  $\text{ft}^3$ .  
 $k$  = Permeabilidad del filtro pastel (constante), Darcy.  
 $\mu$  = Viscosidad del filtrado, cP.  
 $\Delta P$  = Presión diferencial, psi.  
 $w$  = Constante de deposición, adimen.  
 $A$  = Área de la superficie permeable,  $\text{ft}^2$ .  
 $t$  = Tiempo de filtración, min.

**d. Constante de deposición:**

$$W = \frac{A \cdot S}{Q} \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

- $S$  = Espesor del filtro pastel, ft.  
 $Q$  = Volumen acumulado de filtrado,  $\text{ft}^3$ .  
 $W$  = Constante de deposición, adimen.  
 $A$  = Área de la superficie permeable,  $\text{ft}^2$ .

***e. Tiempo de llenado de un capilar no fracturado:***

Para el desarrollo de la investigación, Binkley asumió una geometría específica de las perforaciones, donde la profundidad de la perforación es considerada grande respecto a su diámetro (por lo menos cuatro veces mayor). Asumiendo que la caída de presión en la ecuación es cero, el tiempo requerido para formar un filtro pastel en el contacto del cierre por dentro del revestidor puede expresarse como:

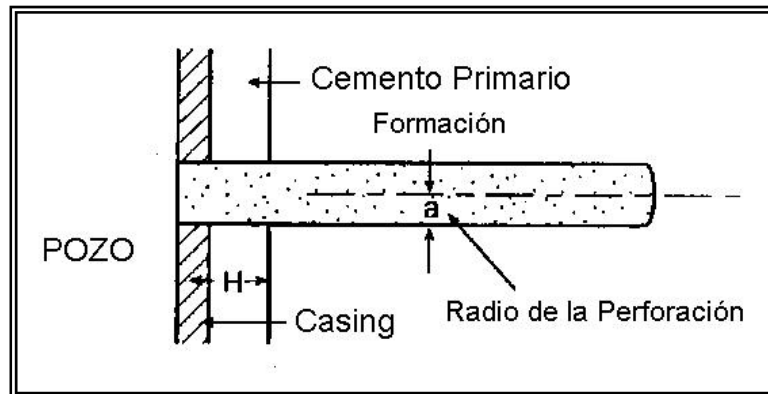


FIGURA 3 - Geometría de las Perforaciones - Fuente Binkley, Dumbauld y Collins

$$T = \left( \frac{\mu}{k \cdot w \cdot \Delta P} \right) \left( \frac{H^2}{2} + \frac{a^2}{4} + e \cdot a \cdot H \right) \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

T = Tiempo transcurrido para el llenado de la perforación, min.

H = Espesor entre la cara de la arena y el punto medio del revestidor, ft.

a = Radio de la perforación, ft.

k = Permeabilidad del filtro pastel (constante), Darcy.

$\mu$  = Viscosidad del filtrado, cP.

$\Delta P$  = Presión diferencial, psi.

w = Constante de deposición, adimen.

Los experimentos determinaron que el parámetro  $e$  tiene un valor constante aproximado de **0,25**. La relación  $(\mu / k \cdot w \cdot \Delta P)$  de la proporción contiene todas las variables relacionadas a las propiedades de deposición de la lechada del cemento, y es denominado *factor de composición*. Es interesante notar que al

asumir la relación de la profundidad de la perforación contra su diámetro, la profundidad tiene un efecto despreciable en el proceso de la deposición. Midiendo el espesor del filtro pastel (S) y el volumen acumulado del filtrado (Q), el cual se obtiene cuando una lechada de cemento está en el contacto con una superficie areal permeable (A), y bajo una diferencial de presión ( $\Delta P$ ) durante un tiempo (T), es posible determinar la permeabilidad del filtro pastel (k) y la constante de deposición (w).

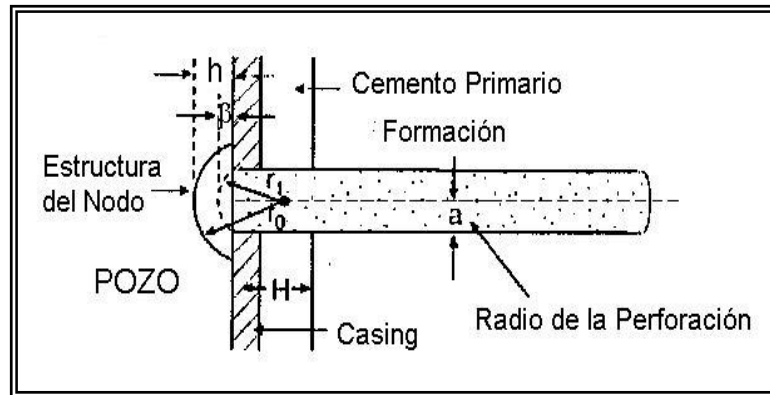


FIGURA 4  
Geometría del  
nodo de  
cemento -  
Fuente Binkley,  
Dumbauld y  
Collins

**f. Deposición de sólidos dentro del revestidor posterior al llene de las perforaciones:**

Para simplificar los cálculos, Binkley asumió que el nodo que se forma dentro del revestidor tiene una forma esférica en cada fase del crecimiento y que el crecimiento lateral ocurre a la misma proporción que el crecimiento vertical. Si **h** es la altura del nodo que se forma dentro del revestidor, entonces la ecuación puede derivarse como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \left( \frac{k \cdot w \cdot \Delta P}{\mu} \right) \left[ \frac{1}{(H + \beta + e \cdot a) \cdot (r_0/r_1)^2 + (r_0/r_1)^2 - r_0} \right] \quad (\text{Ec. 9})$$

donde.

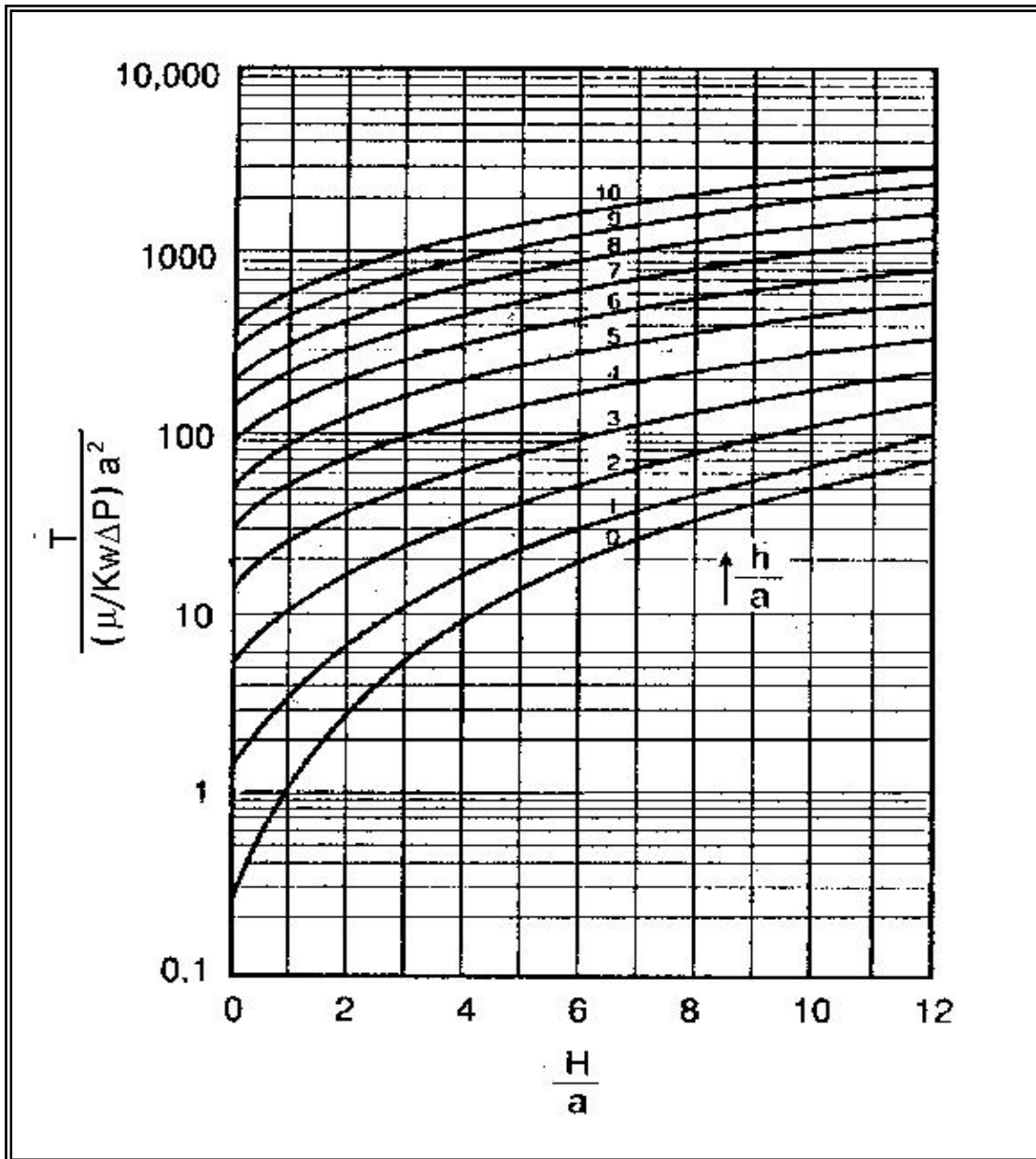
$$\beta = \sqrt{r_1 - (r_1^2 - a^2)} \quad (\text{Ec. 10})$$

$$r_0 = \frac{h^2 + (a + h)^2}{2h} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$r_1 = \sqrt{(r_0 - h)^2 - a^2} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$e = 0,25 \quad (\text{Ec. 13}) .$$

Los resultados de la integración numérica de esta ecuación son muy complejos, razón por la cual se representa una gráfica que muestra el tiempo requerido para llenar una perforación y construir un nodo versus la relación  $H/a$ , para las diferentes alturas del nodo.



**GRÁFICO 1** - Relación entre las propiedades de la lechada, geometría de las perforaciones y tamaño del nodo del pastel de cemento en la parte interna del revestidor - Fuente Binkley, Dumbauld y Collins

### 2.2.2. Estudio de Hook y Ernst

Hook y Ernst (1969), realizaron un estudio experimental en cuanto a; los efectos causados por los aditivos para el control del filtrado, la influencia de presión diferencial aplicada y la permeabilidad del pastel de cemento, en la proporción de crecimiento del filtro pastel.

En su primer estudio, efectuaron una recopilación de las medidas de la permeabilidad de un pastel de cemento que se forma para concentraciones diferentes de aditivos para el control de filtrado. Con esto demostraron que la permeabilidad de un pastel de cemento puro es de aproximadamente 5 mD, siendo este valor de permeabilidad mucho menor que el de muchas formaciones productoras.

<b>LECHADA - CEMENTO CLASE A CON ADITIVO PARA PERDIDA DE FILTRADO CON 46% DE AGUA</b>			
<b>ADITIVO PARA PERDIDA DE FILTRADO (gal/sks)</b>	<b>PERDIDA DE FILTRADO A 1000 psi (cc/30min)</b>	<b>PERMEABILIDAD DEL PASTEL A 1000 psi (mD)</b>	<b>TIEMPO REQUERIDO PARA FORMAR UN FILTRO PASTEL DE 2 in (min)</b>
0,00	1200	5,00	0,2
0,07	600	1,60	0,8
0,13	300	0,54	3,4
0,17	150	0,19	14,0
0,19	100	0,09	30,0
0,22	50	0,009	100,0
0,24	25	0,006	300,0

**TABLA 1** - Permeabilidad del pastel y tasa de deshidratación de la lechada en función de la concentración de aditivo de pérdida de filtrado - Fuente Hook y Ernst, 1969

Por otra parte, demostraron que cuando una lechada contiene suficiente aditivo controlador de filtrado para reducir la proporción de pérdida (según prueba API) hasta 25ml/30min, el pastel de cemento resultante es aproximadamente 1.000 veces menos permeable. Esto se acerca a la permeabilidad de formaciones que producen a bajas tasas, por lo que, una lechada con estas especificaciones resulta muy difícil de bombear.

También, lograron demostrar que la proporción de crecimiento del filtro pastel se relaciona directamente con la permeabilidad del mismo. Además, que los aditivos de control de filtrado disminuyen la permeabilidad del pastel de cemento, limitando la cantidad de sólidos que pueden filtrarse fuera de la lechada.

En otro experimento, evaluaron la influencia de la presión de forzamiento en la proporción de crecimiento del filtro pastel, para ello demostraron que variando la presión de forzamiento en una proporción de 500 a 1000 psi, no se producen cambios significativos en la permeabilidad del pastel de cemento, ni en la proporción de la pérdida de filtrado, sin embargo, se produce un aumento significativo en la proporción de flujo de filtrado a través del filtro pastel.

<b>PRESIÓN DIFERENCIAL EN EL FILTRO PASTEL (psi)</b>	<b>PERMEABILIDAD DEL PASTEL (md)</b>	<b>PÉRDIDA DE FILTRADO API (cc/30min)</b>	<b>RATA DE FLUJO A TRAVÉS DEL PASTEL (cc/min)</b>
Lechada I			
500	5,8	1200	50
1000	6,0	1200	110
Lechada II			
500	1,9	600	17
1000	1,6	600	38
Lechada III			
500	0,53	300	4,7
1000	0,54	300	9,7

Lechada I - Cemento Clase A 46% de Agua
Lechada II - Cemento Clase A 0,5% Dispersante 0,07 gal/sks Controlador de Filtrado 46% de Agua
Lechada III - Cemento Clase A 0,5% Dispersante 0,13 gal/sks Controlador de Filtrado 45% de Agua
Con un incremento de presión de 500 psi a 1000 psi, la tasa de filtración se incrementa en el doble

**TABLA 2** - Efecto de la presión diferencial sobre la permeabilidad de un filtro pastel - Fuente Hook y Ernst, 1969

En este estudio, con la aplicación de la Ley de Darcy, demostraron que la proporción de flujo de filtrado a través del filtro pastel es directamente proporcional a la presión de forzamiento, sin que esto altere de modo alguno la permeabilidad del pastel de cemento y la proporción de pérdida de filtrado.

Finalmente, estudiaron el efecto de la permeabilidad de la formación en la proporción de crecimiento del filtro pastel de cemento. Para ello, demostraron que el tiempo necesario para formar un filtro pastel de espesor dado, contra una muestra de arenisca de permeabilidad 30 mD, era aproximadamente dos veces mayor, comparado con una muestra de permeabilidad 300 mD. Estos resultados demuestran la importancia de saber la permeabilidad de la formación antes de diseñar la lechada.

<b>TIEMPO REQUERIDO PARA LA FORMACIÓN DE UN FILTRO PASTEL</b>			
<b>De 1 1/4 - in de longitud del Filtro Pastel en un capilar de 1 - in de diámetro para 1000 psi</b>			
	<b>Tapón de Arenisca de 30 md</b>	<b>Tapón de Arenisca de 300 md</b>	<b>Malla API 325</b>
Lechada I	6 min	2,5 min	2,5 min
Lechada II	9 min	6,5 min	6,5 min
Lechada III	5 min	2,5 min	2,5 min
<p>Lechada I - Cemento API Clase A 0,5% Dispersante 0,14 gal/sk Controlador del Filtrado 46% de Agua</p> <p>Lechada II - Cemento API Clase A 0,5% Dispersante 0,17 gal/sks Controlador de Filtrado 46% de Agua</p> <p>Lechada III - Cemento API Clase A 0,7% Dispersante 46% de Agua</p>			

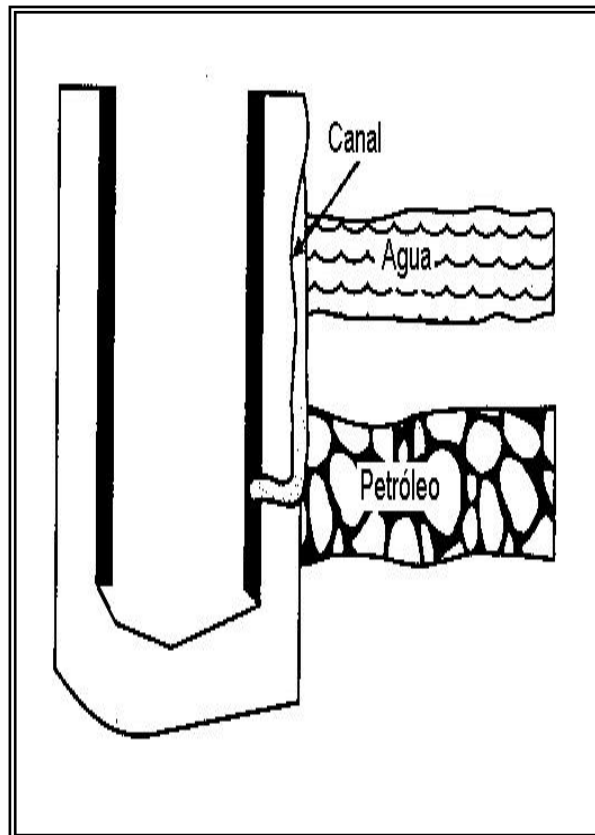
**TABLA 3** - Efecto de la permeabilidad de la formación para una tasa de flujo que pasa por un filtro pastel - Fuente Hook y Ernst, 1969



### 2.3. APLICACIÓN DE CEMENTACIÓN FORZADA

Los casos más frecuentes para la aplicación de una cementación forzada se presentan a continuación:

**2.3.1. Zonas que presentan cementación primaria defectuosa:** Usualmente, estas fallas las ocasionan fluidos de perforación (base aceite) que no son desplazados efectivamente por el cemento. Esto puede originar bolsas o canales en el espacio formación-revestidor, lo cual representa una fuente potencial de problemas durante la etapa productiva del pozo.



**FIGURA 6 -**  
Cementación  
primaria defectuosa,  
permitiendo la  
canalización -  
*Fuente Nelson*

Estas bolsas o canales se pueden cementar mediante la técnica de cementación forzada a baja o a alta presión, según sea el caso, sin embargo, sólo los canales hidráulicamente conectados aceptarán cemento, por lo que, los espacios porosos no conectados no recibirán, por lo tanto, en algunos casos se requiere fracturar a la formación y para ello se debe realizar un forzamiento a alta

presión. La circulación se logra entre las perforaciones usando agua y/o soluciones ácidas como facilitadores. En primer lugar se realiza una limpieza, circulando el intervalo con fluido limpio libre de partículas sólidas y luego se bombea la lechada de cemento al mencionado intervalo. Es importante notar que durante el trabajo de cementación, la presión se mantiene prácticamente constante, excepto por el aumento de la columna hidrostática debido al cemento. Una vez culminado el proceso, se desasienta la empackadura y el cemento excedente es circulado en reversa.

**2.3.2. Aislamiento de zonas indeseables por la intrusión de agua o por altas relaciones gas-petróleo (RGP):** La intrusión de agua o de gas en la zona productora se acentúa a medida que

aumenta el grado de agotamiento del yacimiento o a través de fisuras en el cemento primario. Con este proceso se trata de evitar la intrusión de agua o de reducir las relaciones gas-petróleo. El método que se sigue en este caso, consiste en taponar todas las perforaciones de la zona de petróleo, gas y agua, para luego reperforando un intervalo mucho menor en la zona productora, tratando de mantenerse alejado de los contactos agua-petróleo y gas-petróleo.

**2.3.3. Sellado fugas en la tubería de revestimiento:** Generalmente, estas fugas ocurren debido a la corrosión, fisuras o fallas en las conexiones. El trabajo consiste en agregar cemento dentro y cerca del hueco, con el fin de que el

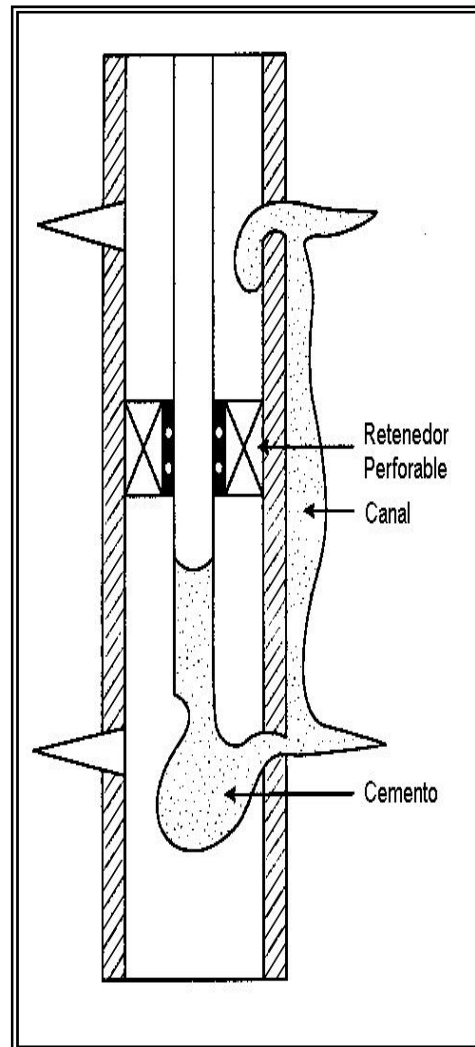


FIGURA 7 - Circulación del cemento en un forzamiento

revestidor pueda soportar las presiones a las cuales es sometido. Usualmente, el trabajo se realiza a bajas presiones, con el fin de evitar extender el daño.

- 2.3.4. Cementación parcial de un revestidor colgado:** Las fallas que se presentan en el revestidor colgado se pueden corregir mediante el siguiente procedimiento, primeramente cañonear el revestidor, seguidamente se fija el retenedor perforable a la profundidad de interés, luego se circula cemento en el espacio entre el revestidor y el hueco, y finalmente se bombea cemento por la parte superior.
- 2.3.5. Corregir pérdidas de circulación durante la perforación:** El método seguido en este caso consiste en colocar un tapón de cemento frente a la formación, posteriormente se levanta la tubería de perforación, se cierran las válvulas de seguridad y seguidamente se bombea la mezcla de cemento hacia la zona de pérdida hasta lograr un sello adecuado. Usualmente, para esta clase de trabajo se acompaña al cemento con material para el control de pérdida de circulación.
- 2.3.6. Taponamiento y abandono de pozos:** Consiste en forzar cemento a bajas presiones, con el fin de taponar una zona dada, sin embargo, se debe impedir dañar zonas vecinas que pudieran ser explotadas económicamente en el futuro.
- 2.3.7. Taponamiento de pozos de inyección en zonas múltiples:** La orientación de los fluidos de inyección en un intervalo deseado del pozo, es un proceso muy complejo, ya que usualmente existe un componente vertical de la permeabilidad de la formación, por lo tanto, el trabajo de dirigir la inyección del fluido a ciertos intervalos, usualmente tienen éxito cuando la diferencia del componente vertical de la permeabilidad es bajo o despreciable. El proceso de cementación es similar al descrito para un procedimiento de taponamiento y abandono, ya que lo que se persigue es sellar la zona deseada con una cementación a baja presión, evitando así dañar al yacimiento.

## 2.4. PRINCIPIO BÁSICO DEL FORZAMIENTO

Las lechadas de cemento son inyectadas hacia la formación permeable, la cual actúa como un filtro, donde, parte del agua que contiene la mezcla pasa a la formación, quedando dentro de la tubería una torta o revoque de cemento parcialmente deshidratado, para que una lechada con un diseño óptimo permita obtener un llenado completo de las cavidades de las perforaciones y reducir a un mínimo el tamaño de los nódulos en el revestidor.

La tasa de incremento del revoque va a depender principalmente de la permeabilidad de la formación, de la presión diferencial aplicada y de la capacidad de la lechada para perder fluido.

Las lechadas con una baja pérdida de filtrado se deshidratan lentamente al ser forzadas contra una formación de baja permeabilidad. Esto hace a una operación de cementación forzada excesivamente larga, dejando cemento sin deshidratar en las perforaciones y el cual puede ser removido en el proceso de circulación en reversa.

Las lechadas con una alta pérdida de filtrado se deshidratan rápidamente al ser forzadas contra formaciones de alta permeabilidad.

Esto trae como consecuencia el taponamiento de los canales con el filtrado y no con el cemento, lo cual es indeseable, trayendo como consecuencia la producción de nódulos muy grandes dentro del revestidor y bloqueando el paso de fluidos hacia la formación o de la formación hacia la tubería.

Por esta razón, es importante que durante el proceso de cementación forzada se controle la tasa de crecimiento del revoque, con la finalidad de lograr un revoque lo más uniforme posible frente a la superficie permeable.

Inicialmente, el revoque de cemento que se forma en la superficie permeable posee alta permeabilidad, esto permite que al inicio del proceso la lechada experimente una rápida deshidratación y que la pérdida de fluido no sea controlada. Por otra parte, hay que tener en cuenta que partículas de grano fino y los aditivos utilizados para el control de filtrado causan una reducción en la permeabilidad del revoque.

Este efecto combinado con un mayor flujo, a través del revoque, reducen la tasa de filtración y por lo tanto se incrementa la presión diferencial a través del revoque.

Finalmente, una vez que el canal está lleno de cemento deshidratado, es necesario mantener diferenciales de presión altos, para forzar al filtrado a pasar a través del revoque. Sin embargo, al incrementar la presión es posible lograr que la lechada se oriente hacia canales o cavidades que aun no han recibido cemento.

Cuando la presión del proceso registrada en la superficie se mantiene constante, es una indicación confiable, de que el trabajo ha alcanzado su fin.

## **2.5. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE UNA LECHADA.**

La presión y temperatura del pozo, así como las condiciones de fondo y los problemas durante la perforación deben considerarse para el diseño de una lechada de cemento. Los parámetros más importantes se describen a continuación:

**2.5.1. Presión:** La presión impuesta a la lechada por el peso de la columna hidrostática de los fluidos de la tubería, reducen el tiempo de bombeabilidad debido a que las altas presiones aplicadas sobre la mezcla inducirían la ruptura del equilibrio químico, propiciando la liberación del filtrado contenida en la lechada. Las estimaciones de presiones estáticas del fondo del pozo se obtienen a partir de estudios realizados por medio de perfiles y del D.S.T. (ensayo de formaciones a pozo abierto).

**2.5.2. Temperatura:** Esta propiedad afecta el tiempo de bombeabilidad y la resistencia a la compresión de las lechadas de cemento. La influencia de la temperatura sobre la lechada consiste en que a medida que la temperatura aumenta, la lechada de cemento se deshidrata y fragua más rápidamente, esto permite el desarrollo de una resistencia para ser bombeada muy alta afectando directamente el tiempo de bombeabilidad, el cual disminuye abruptamente. Los gradientes de temperatura varían según las áreas geográficas, donde el promedio del gradiente geotérmico para la región oriental del país varía entre 0.8° F y 2.2° F por cada 100 pies de profundidad. Las temperaturas de

circulación de fondo del pozo se obtienen por medio de los dispositivos colocados en la tubería. A partir de estos datos, se puede obtener una relación entre la temperatura estática y la temperatura de circulación de fondo del pozo a fin de establecer el tiempo de bombeabilidad de una lechada de cemento.

- 2.5.3. Tipo de cemento a utilizar:** Para la mayoría de las operaciones de forzamiento se usan cementos de las clases A, G o H, los cuales han sido manufacturados para condiciones de trabajo de hasta 6000 pies de profundidad y donde las temperaturas estáticas no excedan los 170 °F. Para pozos más profundos los cementos de las clases G ó H deben ser retardadas adecuadamente sobre la base del tiempo estimado para la operación.
- 2.5.4. Control de filtrado:** Este parámetro es muy importante, debido a que al pasar la lechada a través de un medio poroso, la presión diferencial obliga al agua a separarse de la mezcla, formando un revoque o pastel de cemento de contextura arenosa no consolidada, el cual puede ser eliminado con un chorro de líquido. Este no es bombeable y se requiere aplicar una presión considerable para forzarlo a pasar a través de los espacios porosos. El espesor del revoque dependerá de la permeabilidad de la formación, de las características del controlador de pérdida de filtrado, de la presión diferencial aplicada y del tiempo durante el cual la presión es aplicada. La pérdida de filtrado según las normas API para un cemento puro varía entre 600 a 2500 ml en 30 minutos. En algunos casos, la deshidratación ocurre tan rápidamente que resulta muy difícil medirla. Para un trabajo de forzamiento este valor debe ser reducido a un rango de 25 a 100 ml en 30 minutos, por medio de la adición de aditivos como bentonita, agentes dispersantes o polímeros.
- 2.5.5. Fluidos de trabajo:** Dependiendo de las condiciones del pozo, salmuera o agua fresca, son los fluidos utilizados para los trabajos de forzamiento. Los mismos deben estar libres de partículas sólidas. Otro de los fluidos ampliamente utilizado son las soluciones de ácido clorhídrico (HCl) al 15% y de ácido acético, los mismos tienen como finalidad contraer las partículas de arcillas y permitir flujo de la lechada hacia la formación.

## 2.6. TIPOS DE FORZAMIENTO

La inyección de la lechada se realiza a través de las perforaciones en el revestidor, por lo que, existen dos tipos fundamentales de trabajo de forzamiento; el primero de ellos se denomina forzamiento a baja presión, el cual consiste en mantener la presión de inyección de fondo por debajo de la presión de fractura de la formación y el otro tipo se denomina forzamiento a alta presión, el cual consiste en exceder la presión de fractura de la formación.

### 2.6.1. Forzamiento a baja presión

El objetivo fundamental de esta técnica consiste en llenar las cavidades de las perforaciones o fisuras que se encuentran entre el espacio anular y el cemento primario. El volumen de cemento es usualmente pequeño, debido a que la lechada efectivamente no se bombea dentro de la formación, lo que se busca es formar un pastel de cemento impermeable que aisle el espacio entre el revestidor y la formación. El control preciso de la presión de la columna hidrostática en el proceso de bombeo es esencial, debido a que

una presión excesiva puede ocasionar el fracturamiento de la formación.

En los forzamientos a baja presión, es importante que las perforaciones y cauces estén libres de lodos u otros residuos indeseables. Sin embargo, puede ser necesario limpiar las perforaciones antes de realizar el forzamiento.

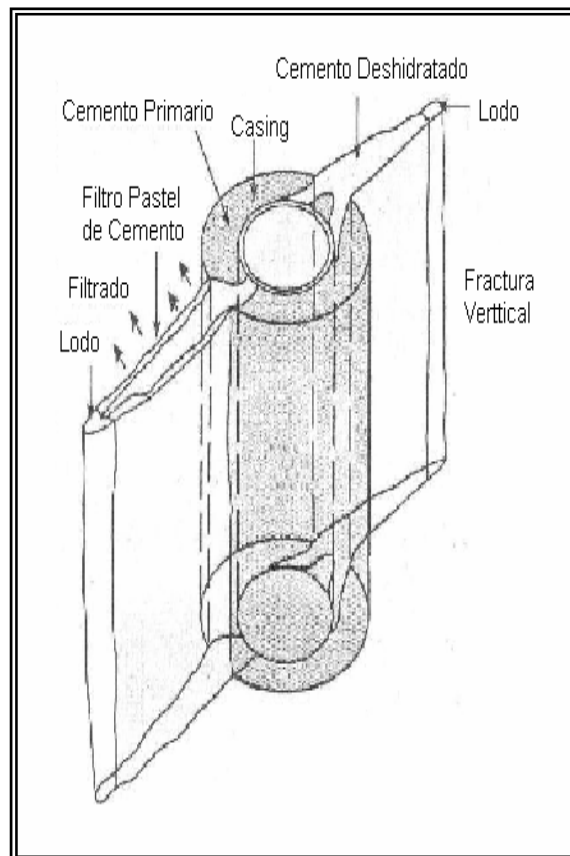


FIGURA 8 - Técnica de forzamiento a alta presión, fractura vertical generada y cementación forzada a alta presión en la formación.

Una lechada optima dejará sólo un nodo pequeño de pastel de cemento dentro del revestidor. Los sistemas inadecuadamente diseñados pueden producir el crecimiento excesivo del pastel de cemento, causando un taponamiento completo en el revestidor, trayendo como consecuencia la pérdida de la transmisión hidráulica de presión hacia la formación, con el contacto insuficiente entre el pastel de cemento y la formación.

### **2.6.2. Forzamiento a alta presión**

En algunos casos, un forzamiento a baja presión no logrará el objetivo fundamental de aislar la zona de interés, ya que la existencia de fisuras pequeñas o microfracturas pueden permitir el flujo de gas e impedir el paso de la lechada de cemento. Para aplicar esta técnica, los canales deben agrandarse a fin de permitir el paso de las partículas sólidas que componen al fluido cementante.

El desplazamiento de la lechada detrás del revestidor se realiza rompiendo o fracturando la formación cerca de las perforaciones. Para esto se desplaza un fluido delante de la lechada con el propósito de originar la fractura, en la cual entrada la lechada y llena los espacios deseados.

La presión aplicada deshidrata la lechada contra las paredes de la formación, mientras deja todos los cauces o fracturas cerca de las perforaciones llenas con el cemento. Sin embargo, durante un forzamiento a alta presión, la situación y orientación de la fractura creada no puede controlarse.

Las formaciones de areniscas normalmente tienen una fuerza tensora baja y se mantiene compactadas principalmente por el peso de las capas superpuestas o por las fuerzas compresivas de la formación. Estas fuerzas cohesivas actúan en todas las direcciones a fin de unir el cuerpo rocoso, pero no tiene la misma magnitud en todas las direcciones.

Cuando se aplica una presión hidráulica suficiente contra una formación, la roca se fractura a lo largo del plano perpendicular a la dirección de la tensión principal. Una fractura horizontal se crea si la presión de fractura es mayor que la presión de sobrecarga.



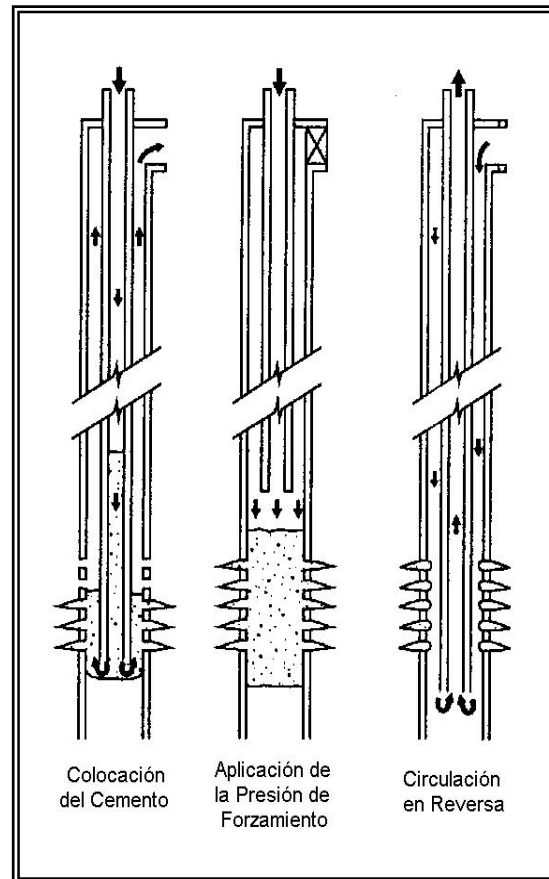
## 2.7. TÉCNICAS DE FORZAMIENTO.

Dentro de la aplicación de este procedimiento existen dos técnicas básicas, las cuales son; el forzamiento desde el cabezal del pozo y el forzamiento con herramienta.

### 2.7.1. Técnica de Desplazamiento desde el Cabezal (sin empacadura)

Esta técnica es aplicada cuando el forzamiento es realizado a baja presión y cuando no hay ninguna duda de la capacidad del revestidor de resistir la presión de forzamiento. Ninguna herramienta especial está involucrada en este procedimiento, aunque un tapón puente puede necesitarse para aislar zonas más bajas de producción. Este procedimiento culmina cuando el cemento es colocado en la zona de interés. El preventor de ruptura (BOP) encima de la tubería es cerrado y las presiones de inyección chequeadas continuamente, a fin de no

sobrepasar la presión de fractura de la formación. La lechada es bombeada y colocada frente a la cara de las perforaciones. Una vez que el cemento está en el lugar, la tubería se sube a un punto sobre el tope de las perforaciones y la presión es aplicada desde el cabezal a través de la tubería, obligando a la lechada a pasar hacia la formación. Finalmente el cemento en exceso es reversado fuera del revestidor colocando la tubería por debajo de la base de las perforaciones y circulando el fluido de completación.



**FIGURA 9** - Secuencia de la aplicación de la Técnica de forzamiento desde el cabezal comúnmente usada en procedimientos de forzamiento a baja presión

### **2.7.2. Técnica de Desplazamiento con Herramienta**

Esta técnica puede dividirse en dos métodos; el primero se denomina método de forzamiento con empacadura recuperable y el segundo método de retenedor de cemento perforable. El objetivo principal de usar herramientas en un forzamiento es aislar al revestidor y al pozo, mientras la alta presión es aplicada en el fondo del pozo.

#### **a. Forzamiento con Empacadura Recuperable**

Los esfuerzos de compresión y de tensión presentes en una operación de cementación forzada, son aplicados fundamentalmente sobre la empacadura.

Esta herramienta cuenta con una válvula de desviación que permite la circulación del fluido de completación mientras se está corriendo en el hoyo y cuando la empacadura es fijada. Este sistema permite la limpieza de la herramienta después de culminar el trabajo de cementación, soporta las presiones excesivas al reversar el cemento sobrante en el revestidor y minimiza el efecto de arrastre mientras se corre la herramienta fuera del pozo.

La ventaja principal de esta herramienta, es la posibilidad de ser usada muchas veces. La misma se puede correr en conjunto con el tapón puente en un solo viaje y recuperarse después que la lechada en exceso ha sido reversada fuera del pozo. La mayoría de estas operaciones necesita de uno o dos sacos de cemento encima del tapón puente después de finalizar el trabajo, esto con la finalidad de garantizar la transmisión de la presión hidráulica y de prevenir que cemento deshidratado quede acumulado dentro del revestidor cuando sea reversado el exceso.

#### **b. Forzamiento con Retenedor de Cemento Perforable**

Esta herramienta tiene como función principal prevenir los preflujos, en los cuales hay una presión diferencial negativa alta. Esto puede perturbar la estructura del pastel de cemento. Al cementar zonas múltiples, el Retenedor de Cemento aísla las perforaciones más bajas y permite el forzamiento en las

zonas subsecuentes. Los Retenedores de Cemento son empaaduras perforables equipadas con una válvula que se opera a través de guaya. El Retenedor Perforable da más confianza al operador, porque permite colocar a la empaadura más cerca a las perforaciones, esto es muy ventajoso ya que un volumen menor de cemento se acumula debajo de la empaadura, permitiendo que esta pase a través de las perforaciones.

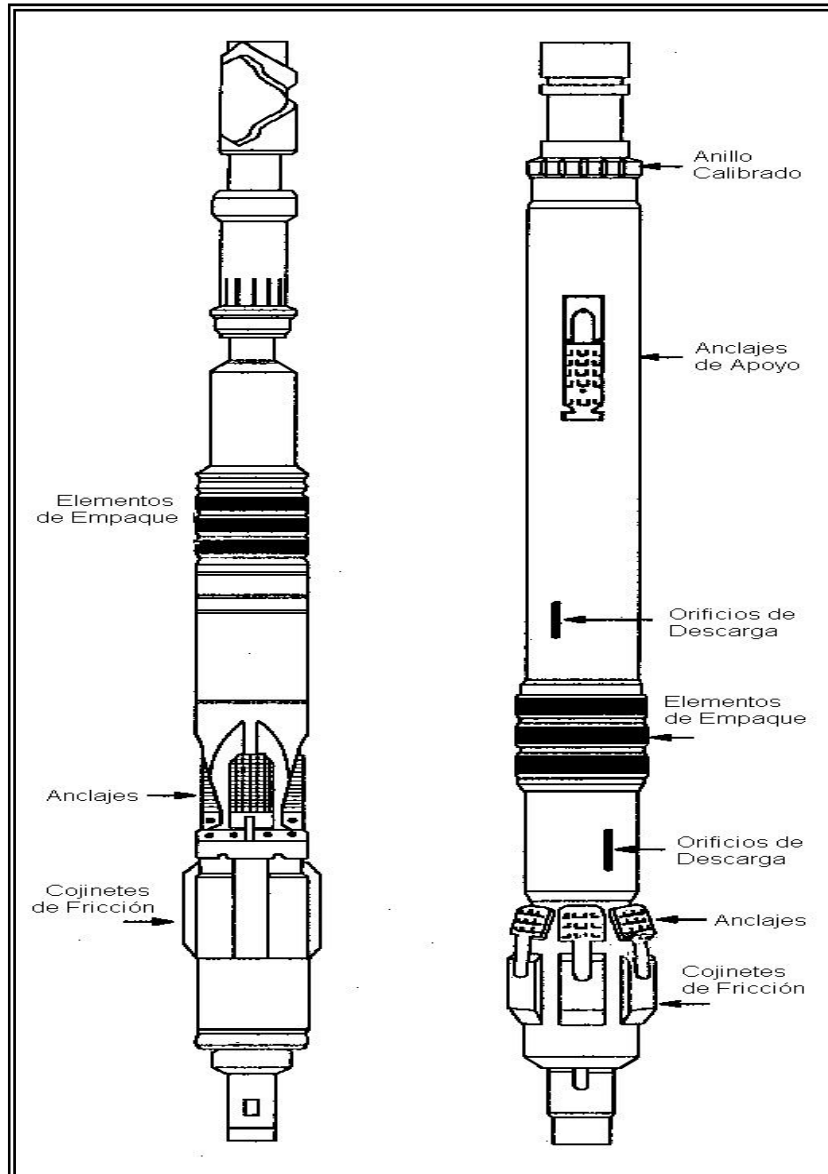


FIGURA 10 - Tapón Puente Recuperable (izquierda) y Empacadura Recuperable (derecha)

## 2.8. MÉTODOS DE BOMBEO

Para la colocación de la lechada de cemento a la profundidad deseada, se utilizan dos métodos de bombeo, denominados Forzamiento Simple y Forzamiento por Hesitación.

### 2.8.1. Bombeo con Forzamiento Simple

En un procedimiento de forzamiento simple, la lechada de cemento se bombea continuamente hasta la presión de forzamiento deseada, la cual puede estar por arriba o por debajo de la presión de fractura. Después de bombear las paradas respectivas, la presión es monitoreada. Si la presión disminuye, esto significa que la relación entre el filtrado y la interfase de la formación, aumenta, por lo que más lechada se debe bombear para mantener la presión de forzamiento. Esto continúa hasta lograr mantener la presión de forzamiento en el pozo durante varios minutos, sin la necesidad de una inyección adicional de lechada. El volumen de lechada inyectada es normalmente grande, por lo que generalmente se utilizan entre 10 y 100 barriles.

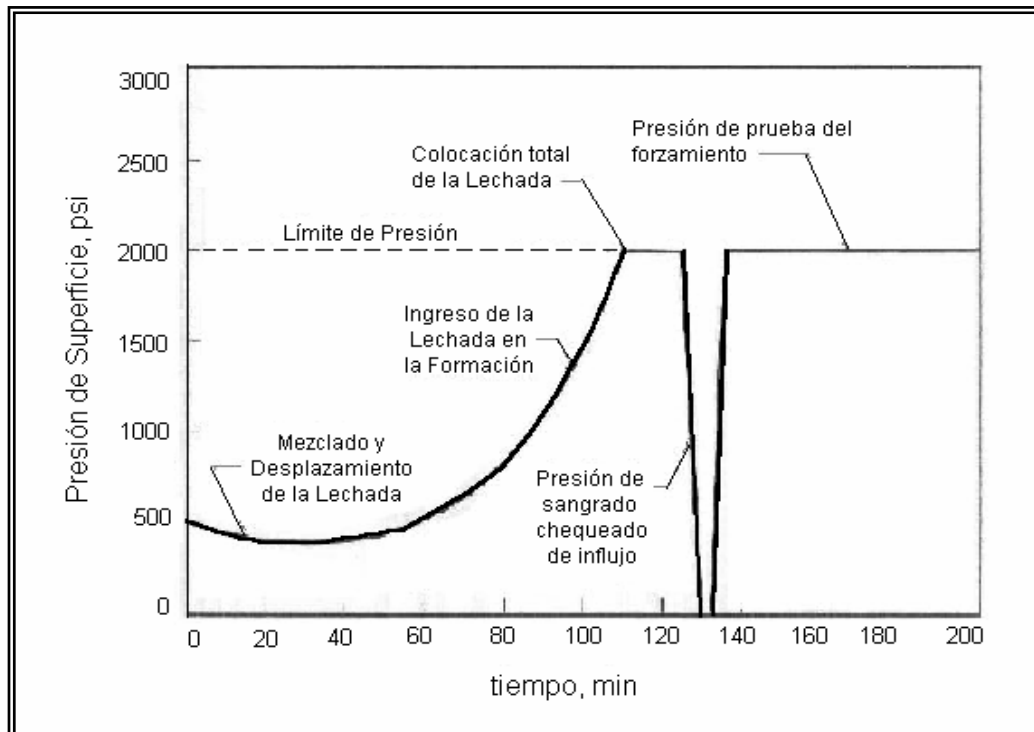
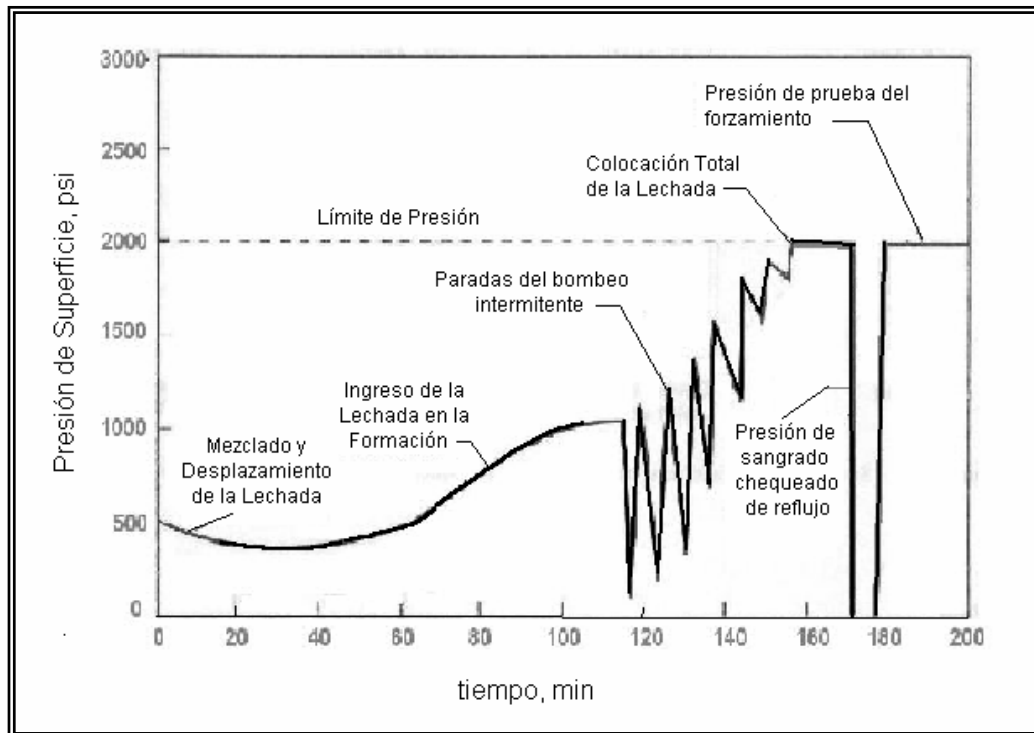


FIGURA 11 - Comportamiento típico de la presión de superficie, en un procedimiento de forzamiento mediante el método de bombeo con forzamiento simple

### 2.8.2. Bombeo con Forzamiento por Hesitación

Una lechada con una cantidad relativamente pequeña de pérdida de filtrado hace impráctico, sino imposible el proceso de bombeo simple, ya que se requiere mantener una tasa de bombeo continua para lograr una presión diferencial constante. La mínima tasa de bombeo que se puede lograr con el equipo de campo existente, es incluso excesivo para el forzamiento a alta presión dónde se crean fracturas grandes.



**FIGURA 12** - Comportamiento típico de la presión de superficie, en un procedimiento de forzamiento mediante el método de bombeo con forzamiento por hesitación

El único procedimiento que hace posible la deshidratación de pequeñas cantidades de cemento hacia las cavidades de la formación es el método de forzamiento por hesitación. Este procedimiento involucra la aplicación intermitente de presión, a una tasa de inyección de 0.25 a 0.5 bbl/min, con intervalos de parada de 10 a 20 minutos, para permitir la fuga de presión debido al flujo de filtrado hacia la formación, donde la fuga inicial es normalmente rápida porque no se ha formado un filtro pastel. Los aumentos

de presión aplicados van a permitir la formación de un pastel de cemento, donde los períodos de filtración se alargan a medida que transcurre el proceso. La diferencia entre la presión inicial y final son cada vez menores. Este trabajo finaliza cuando la fuga de filtrado de la lechada o la caída de presión se hace despreciable. Los volúmenes de lechada necesarios para esta técnica son normalmente mucho menores a los requeridos para un forzamiento simple.

Una formación poco consolidada normalmente exige de un período de hesitación más largo para lograr alcanzar la presión de forzamiento. Un primer período de hesitación de 30 minutos o más, es lo normal. Mientras que un período de hesitación inicial muy corto (posiblemente cinco minutos) es normalmente suficiente para las formaciones consolidadas.

## **2.9. PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES**

Antes de mezclar y bombear la lechada de cemento, una prueba de integridad de presiones o de inyección debe de ser realizada. Este procedimiento consiste en bombear un fluido, por lo general, agua fresca o salmuera hacia el pozo. Las razones fundamentales de la ejecución de esta prueba son:

- Para comprobar la receptividad de la formación a los fluidos inyectados.
- Para estimar las tasas de inyección.
- Para evaluar la presión máxima de inyección.
- Para calcular la cantidad de lechada a ser usada.

En dado caso que el fluido no pueda ser inyectado, el procedimiento de acidificación de la matriz debe ser realizado, en el cual, un ácido es inyectado en la formación con la finalidad de destapar los poros obstruidos. Los ácidos más usados son; el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido fluorhídrico (HF).

Los fluidos a ser inyectados deben estar libres de residuos o partículas sólidas con la finalidad de evitar causar algún daño a la formación, por lo que se debe tener presente las siguientes consideraciones:

- El fluido utilizado debe estar libre de partículas sólidas.
- El fluido debe ser poco compresible.
- El agua usada en la cementación debe ser compatible con el agua de la formación, con la finalidad de evitar efectos de hinchamiento o floculación de las arcillas.
- Se debe evitar que el fluido a ser inyectado no forme emulsiones con los fluidos presentes en el pozo.

Esta prueba consiste en la inyección progresiva de un caudal de fluido a intervalos de tiempo constante, donde dicho caudal va a ir aumentando a una razón constante al igual que la presión en la superficie para cada uno de estos intervalos de tiempo. Es recomendable, que la razón de cambio del caudal de inyección no exceda los 0.5 BPM, debido a que para tasas mucho mayores se corre el riesgo de fracturar a la formación, dificultando la posibilidad de obtener la presión de fractura real.

Antes de comenzar la inyección del fluido, se debe elaborar una tabla, con el fin de ir registrando los cambios de la presión en la superficie a medida que la tasa de inyección varía para cada uno de los intervalos de tiempo.

Cuando la tasa de crecimiento de la aguja del manómetro que registra la presión en la superficie comienza a disminuir durante el cambio de la tasa de inyección, es un indicativo de que nos encontramos cerca de la presión de fractura, por lo que, en este momento debe pararse el proceso de inyección.

Posteriormente, se debe elaborar una tabla de presión en la superficie versus tasa de inyección, donde la presión máxima alcanzada en la gráfica va a ser utilizada para calcular la presión de fractura de la formación, aplicando un balance de presiones.

$$P_{\text{frac}} = P_{\text{sup}} + P_{\text{hid}} - P_{\text{fric}} \quad (\text{Ec. 14})$$

## **2.10. DISEÑO Y PREPARACION DE LA LECHADA**

Para asegurar el éxito de un trabajo de forzamiento deben adaptarse las propiedades de la lechada de cemento a las características de la formación a ser tratada y la técnica a ser usada, por lo que, una lechada optima para un forzamiento debe diseñarse para ajustarse al siguiente patrón de comportamiento:

- Baja viscosidad, para permitir que la lechada pueda penetrar fácilmente en las fisuras y espacios porosos.
- Baja fuerza de gel, donde un sistema gelificado permita restringir los movimientos de la lechada y que los aumentos de presión causados sean fáciles de interpretar en la superficie.
- Sin agua libre.
- Control de pérdida de filtrado apropiado, para asegurar el llenado óptimo de las fisuras y perforaciones.
- Tiempo de espesamiento apropiado, para asegurar el tiempo total para realizar la ejecución total del trabajo, que consiste en la inyección, el forzamiento y el reversado del cemento en exceso.

### **2.10.1 Control de pérdida de filtrado.**

El control de pérdida de filtrado es particularmente importante cuando se realiza un procedimiento de cementación forzada. La pérdida de filtrado de una lechada debe corresponderse con el tipo de formación y a la permeabilidad de la misma.

En un forzamiento a baja presión, una lechada correctamente diseñada debe permitir el completo llenado de las cavidades o perforaciones y dejar únicamente un nodo mínimo en el revestidor.

Un forzamiento a alta presión ocurre cuando se excede la presión de fractura de la formación, la lechada se bombea en las fracturas inducidas y se deshidrata contra las paredes de la fractura. Si la permeabilidad de la formación es sumamente alta, se utiliza una lechada con alta pérdida de



filtrado (200 a 500 ml/30min) esto permitirá el endurecimiento y el subsiguiente llenado de las fracturas pequeñas.

Cuando un procedimiento de forzamiento es realizado en formaciones de calizas o de dolomitas, la situación es diferente a las formaciones de arenisca, ya que la permeabilidad consiste en cavidades interconectadas o sistemas de fracturas, donde todas las partículas de cemento pueden entrar en estos cauces y como la lechada se deshidrata lentamente, la misma viajará distancias relativamente largas en la formación, por lo que se requerirá de inmensas cantidades de cemento para lograr el objetivo.

### **2.10.2 Volumen de lechada.**

El volumen apropiado de lechada de cemento depende en la longitud del intervalo a ser cementado y de la técnica de desplazamiento usada. Un forzamiento a baja presión requiere de un volumen de lechada necesario para construir un pastel de cemento en cada perforación más una cantidad adicional mínima a fin de alcanzar la presión de forzamiento. En muchos casos, menos de un barril es suficiente. Sin embargo, para la conveniencia del trabajo se requieren preparar normalmente de 5 a 15 bbl de mezcla. Las tasas de bombeo utilizadas comúnmente son tan bajas como 0.25 bbl/min.

El cemento en exceso puede ser inyectado según la experiencia que se tenga en el área; sin embargo, debe tenerse presente que estos excesos pueden ser perjudiciales para la productividad de la formación.

En un forzamiento a alta presión, en la cual la formación se fractura, se requiere un volumen más alto de lechada. El volumen requerido esta en función de la anchura y profundidad de las fracturas inducidas.

En algunos casos donde se han ejecutado este tipo de operaciones, en las cuales las fracturas generadas fueron excesivas, volúmenes de más de 100 barriles de lechada fueron inyectados. El volumen requerido puede minimizarse, fracturando a tasas de bombeo baja y manteniendo la presión de inyección por debajo de la presión de propagación de la fractura.

Si los forzamientos son realizados a alta presión y alta tasa de bombeo, las fracturas que se desarrollarán requerirán de grandes cantidades de cemento.

La presión hidrostática y de superficie deben ser controlada durante toda la ejecución del trabajo, ya que una columna de cemento muy alta durante el desplazamiento podría causar un fracturamiento, lo cual causaría grandes daños a la formación. Cuando grandes cantidades de cemento son necesarias debido a que existen fracturas naturales, es recomendable el uso de lechada con una baja densidad.

### **2.10.3 Tiempo de espesamiento.**

Al igual que en una cementación primaria, la temperatura y presión son parámetros importantes que influyen en el tiempo de desplazamiento de una lechada. Las temperaturas encontradas en un procedimiento de forzamiento suelen ser más altas que en un trabajo de cementación primaria, lo cual altera de manera significativa el proceso de deshidratación de la lechada, por esta razón se realiza una prueba denominada tiempo de espesamiento, a través del uso consistómetro presurizado, según las especificaciones de la API.

En un pozo poco profundo, las lechadas deben diseñarse para un tiempo de bombeo bastante corto (dos horas), normalmente se usan aditivos aceleradores, sin embargo, un trabajo de forzamiento por hesitación puede requerir de un tiempo de bombeo de aproximadamente seis horas, por consiguiente, se debe agregar un aditivo retardador en la cantidad suficiente para asegurar la colocación de la lechada y la extracción del cemento en exceso.

### **2.10.4 Viscosidad de la lechada.**

La habilidad de la lechada de fluir en el espacio poroso es proporcional a su fluidez. Una lechada muy viscosa, es útil cuando se realiza una cementación primaria a través del espacio anular, la misma no fluirá hacia los espacios porosos pequeños, a menos que se apliquen presiones diferenciales altas.

Las presiones aplicadas están limitadas por la presión de fractura de formación, por consiguiente, es recomendable utilizar en los procedimientos de forzamiento lechadas de baja viscosidad las cuales contienen aditivos dispersantes.

### 2.10.5 Fuerzas compresivas.

Las fuerzas compresivas altas, aunque son deseables por resistir la agitación de las herramientas subsecuentes utilizadas y previenen el agrietamiento del cemento al momento de la reperforación.

### 2.10.6 Espaciadores y lavadores.

Es importante limpiar las perforaciones y el espacio anular, ya que fluidos indeseables, residuos sólido o lodo de perforación pueden interrumpir el paso de la lechada a través de la cara de la formación. Esto puede alterar el proceso de deshidratación de la lechada, lo cual impide completar el llenado de los espacios libres. La contaminación es evitada, bombeando una mezcla acuosa compatible con el cemento, en dos etapas, una por delante y la otra por detrás de la lechada. Si el cemento no está contaminado, un químico lavador o una solución ácida débil pueden forzarse delante de la lechada, separado por un fluido compatible.

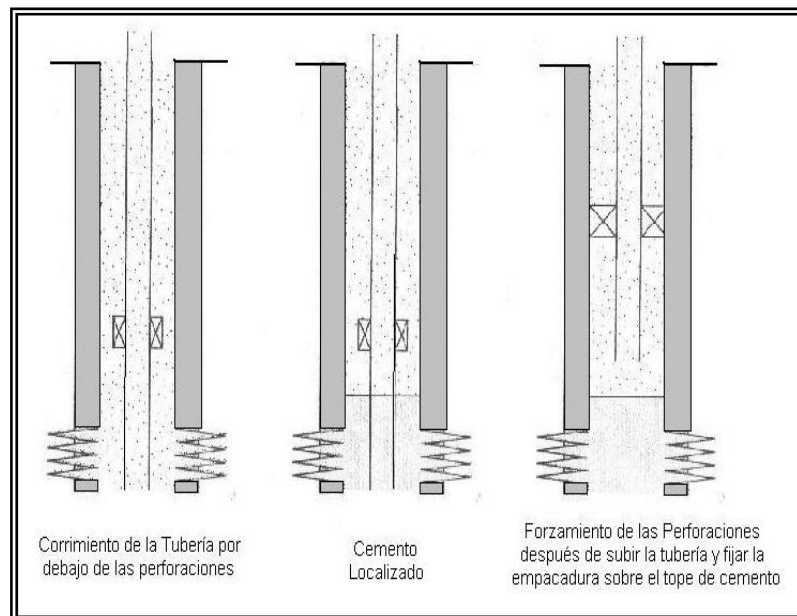


Figura 13 - Forzamiento con empacadura removible y tubería -Fuente Economides

## **2.11. PROCEDIMIENTO BÁSICO PARA UN TRABAJO DE FORZAMIENTO**

A continuación, se enumeran los pasos necesarios para la ejecución de un trabajo de forzamiento.

- a) Las zonas más bajas son aisladas con un tapón recuperable o perforable.
- b) Las perforaciones son lavadas con una herramienta o son abiertas mediante la acidificación.
- c) La herramienta de lavado de las perforaciones se recupera y si el método de la empacadura es escogido, esta se debe correr en el hoyo con guaya fina, colocarse a la profundidad deseada y probarse. Donde una presión de prueba en el anular de 1000 psi, es normalmente suficiente.
- d) La prueba de integridad de presiones o de inyección se realiza usando agua fresca libre de sólidos o salmuera. Si un fluido de completación de baja pérdida de circulación está en el hoyo, este debe ser desplazado de las perforaciones antes de empezar la prueba de inyección.
- e) Se circula el fluido seguido por la lechada de cemento en el hoyo con la empacadura abierta. Esta circulación se realiza para evitar el forzamiento de los fluidos delante de la lechada en la formación. Una presurización es aplicada en el espacio anular para prevenir que la lechada se regrese como resultado del efecto de tubo en "U".
- f) Si un fluido de cola no es corrido, debe pararse el proceso de bombeo dos a tres barriles antes de que el total de la lechada alcance a la empacadura. Cuando el cemento se coloca delante de las perforaciones, con la empacadura asentada, la circulación se detiene cuando el cemento cubra la zona seleccionada.
- g) La profundidad a la cual la empacadura es fijada debe escogerse cuidadosamente. Si el fluido de cola se corre, la distancia mínima entre las perforaciones y la empacadura se limita a la longitud que alcanza el fluido de cola.

- h) La empacadura no puede fijarse cerca de las perforaciones, ya que la comunicación de la presión a través del anular sobre la empacadura puede causar la fractura del revestidor.
- i) La posible contaminación del cemento de forzamiento por el fluido presente en el pozo puede limitar el espacio máximo entre la empacadura y la zona a ser tratada.
- j) La empacadura recuperable debe colocarse a una distancia no mayor de 25 pies sobre el tope de las perforaciones.

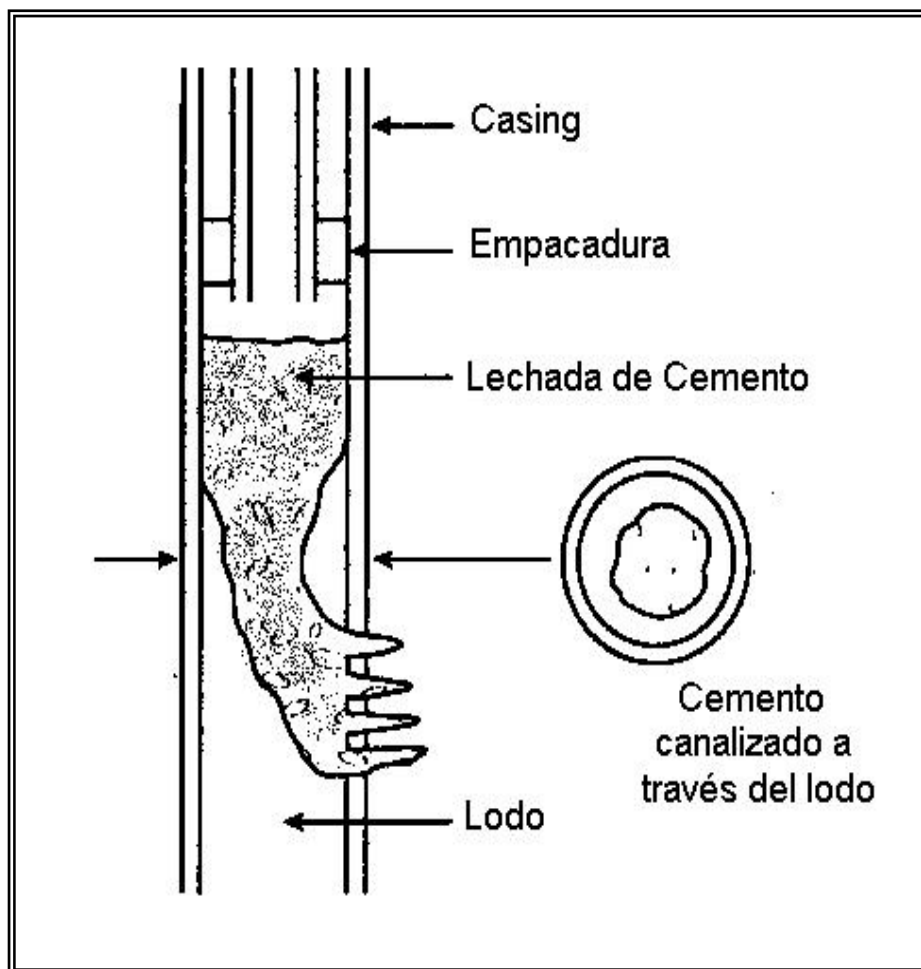


FIGURA 14 - Lechada de cemento contaminada canalizada a través del lodo

- k) La presión de forzamiento es aplicada, teniendo en cuenta que si el método de hesitación se usa con la técnica de forzamiento a alta presión, la formación es fracturada y la lechada de cemento comienza a circular en la fractura antes de que el método de bombeo de hesitación sea aplicado. Pero si la técnica de forzamiento de baja presión se elige, el bombeo de hesitación de empieza en el momento en que la empacadura es fijada.
- l) Se bombea continuamente hasta lograr que no se observe ningún escape de presión. Cuando se logra conseguir una presión sostenida de aproximadamente 500 psi, por encima de la presión de inyección final es un indicativo del fin del proceso de inyección. Normalmente, las perforaciones de un pozo cementado acepta una presión superior a la presión de fractura de la formación, pero el riesgo de fracturamiento existe si se intenta verificar tal condición.
- m) La empacadura es desasentada y el cemento en exceso se invierte fuera del pozo, inyectando fluido a través del espacio anular.
- n) Se recuperan las herramientas en un proceso lento de extracción evitando alterar la estructura del filtro pastel formado y el pozo queda estático para permitir que la lechada pueda esperar el tiempo recomendado (WOC).

Al preparar la lechada, el uso de un mezclador de recirculación o un tanque de almacenamiento es altamente recomendado, porque asegura que las propiedades de la lechada a bombear en el pozo sean lo mas parecido posible al diseñado en el laboratorio.

En la mayoría de los trabajos de forzamiento, la cantidad de lechada involucrada es bastante pequeña, pero los requisitos para su calidad son altos; por consiguiente, debe tenerse un cuidado especial en su preparación.

## 2.12. EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE FORZAMIENTO

Los resultados de un trabajo de forzamiento son evaluados de acuerdo al funcionamiento subsiguiente del pozo, por lo que algunas de estas pruebas son detalladas a continuación:

### 2.12.1 Prueba de Presión Positiva.

Después que el tiempo estático de curado ha pasado, es práctica común probar las perforaciones cementadas. Sin embargo, esto no debe ser considerado como una prueba de la habilidad del cemento para contener al fluido de la formación, más bien, la prueba sirve como un método para diagnosticar el fracaso del tratamiento de forzamiento.

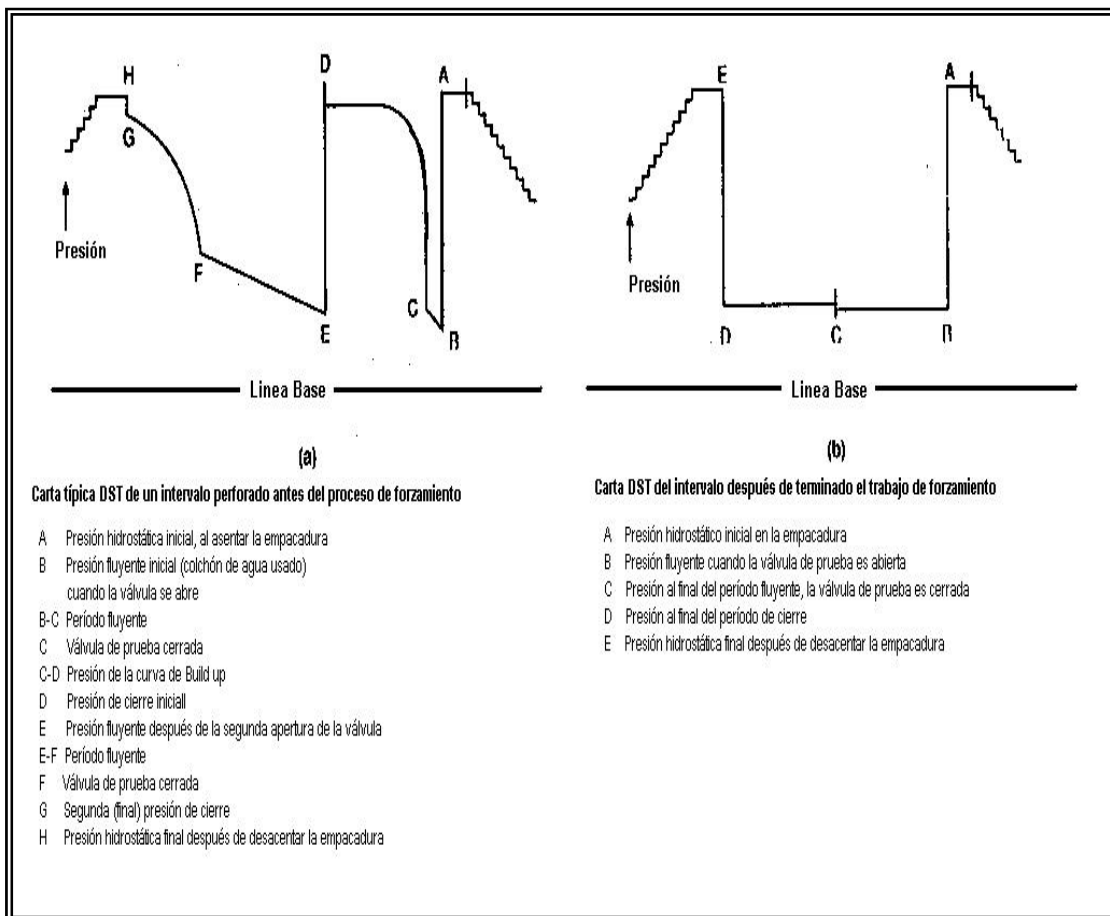


FIGURA 15 - Comportamiento de una Prueba DST - Fuente Nelson Dowell

Para ello es aplicada una presión a la cara de las perforaciones, esta puede ser la presión del yacimiento o una presión mayor, pero no debe exceder la presión de fractura de la formación.

Un pastel de cemento puede resistir más de 5000 psi de presión diferencial cuando el esfuerzo es aplicado del pozo hacia la formación, pero el mismo pastel no puede resistir una presión diferencial significativa cuando esta se aplica de la formación hacia el pozo.

#### **2.12.2 Prueba de Presión Negativa.**

La técnica aplicada consiste en confirmar si el cemento colocado tendrá la capacidad de contener a los fluidos de la formación a las condiciones de producción, para ello se aplica una presión diferencial negativa en la cara de las perforaciones cementadas. Esto se realiza de acuerdo a los pasos siguientes:

- a) Se circula un fluido de baja densidad a través del anular.
- b) Se limpia el pozo, y
- c) Se ejecuta una prueba seca.

Si la cementación logra el sellado de las perforaciones, ningún influjo debe ocurrir mientras se realiza la prueba.

#### **2.12.3 Registro Acústico.**

Cuando el objetivo del forzamiento es reparar un trabajo de cementación primario, los registros de cementación estándar deben ser corridos a fin de evaluar la efectividad de la reparación, comparando las condiciones antes del forzamiento y posteriores al forzamiento.

#### **2.12.4 Perfiles de Temperatura.**

Para ellos se toman perfiles de temperatura antes y después del forzamiento, si los registros son iguales, esto indica que fracasó el trabajo de forzamiento, por el contrario, un aumento de temperatura en el registro posterior al forzamiento determinará el éxito del trabajo de forzamiento.



### **2.12.5 Dureza del Cemento.**

El esfuerzo de corte aplicado para la perforación del cemento residual dentro del revestidor, es un indicativo del éxito del procedimiento de forzamiento, por lo que, si el cemento es sólido a lo largo del proceso de perforación, el resultado será bueno, por el contrario, si existen espacios suaves al perforar el cemento residual, esto indica el fracaso del procedimiento de forzamiento.

### **2.12.6 Trazadores Radiactivos.**

Los trazadores radiactivos son agregados a la lechada de cemento con la finalidad de que a través de estudios subsecuentes puedan indicar si el cemento fue colocado en el intervalo deseado.

Los isótopos más usados son;  $\text{Ir}^{131}$ ,  $\text{Ir}^{192}$  y  $\text{Sc}^{46}$ , esto es debido a que tiene una vida promedio muy corta, los cuales son 8 días, 75 días y 85 días, respectivamente, razón por la cual, no contaminan al medio ambiente.

El iridio y radioisótopos del scandium son los más recomendados, ya que el isótopo de yodo es soluble y puede salir fuera del cemento con el filtrado, contaminando a los fluidos de la formación.

### 2.13. RAZONES DEL FRACASO DE UN FORZAMIENTO

Siempre que un trabajo de forzamiento no ha cumplido su objetivo, una investigación completa debe dirigirse para analizar las posibles fallas, con el propósito de entender por qué ocurrió el fracaso y mejorar el plan de tratamiento subsiguiente.

#### 2.13.1 Conceptos Erróneos.

El más común, consiste en creer que la lechada de cemento penetra en los poros de la roca, lo cual no es cierto, ya que sólo el agua de la mezcla y las sustancias disueltas en esta penetran, mientras que los sólidos son depositados aumentando la acumulación de los mismos en la cara de la formación, contribuyendo a la formación del filtro pastel. Hay que tener en cuenta que se requeriría de una permeabilidad superior a los 100.000 mD, para lograr que el cemento penetre en la matriz del cuerpo rocoso, por lo que, la única manera de lograr que la lechada penetre en la formación es fracturando a la misma.

Otro concepto erróneo, consiste en creer que se necesita de una presión alta para obtener un buen trabajo de forzamiento, lo cual no es completamente cierto, puesto que si la presión de fractura se excede, el control del proceso de colocación de la

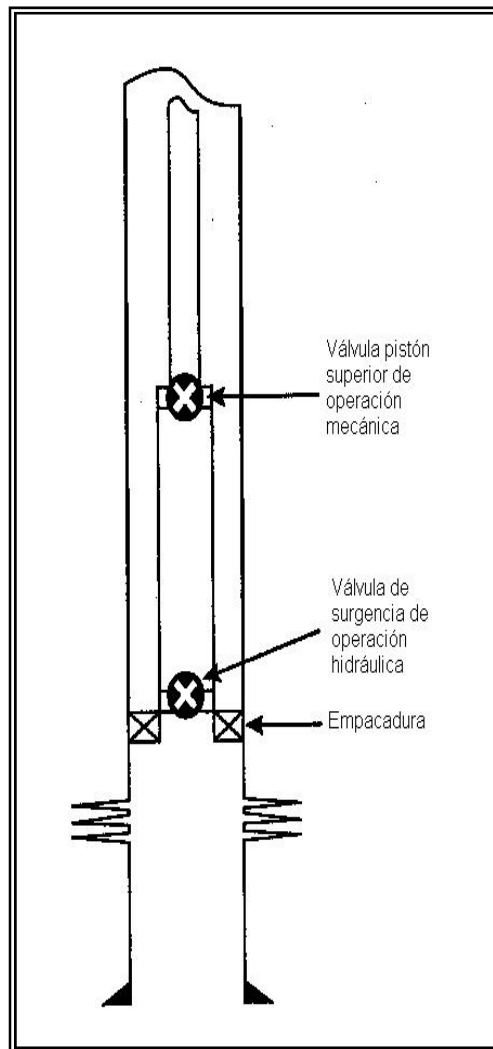


FIGURA 16 - Herramienta de Agitación

lechada se pierde y la lechada penetra en áreas no deseadas, donde el propósito de aplicar una presión no es de ninguna manera poner la lechada en todos los lugares deseados. Una vez que es creada la fractura, esta puede extenderse y abrir cauces no deseados de comunicación entre las zonas previamente aisladas.

Otro error muy común, consiste en creer que todos los espacios porosos de las perforaciones están abiertos y receptivos a los fluidos, por lo que es importante tener en cuenta que el revoque de un lodo es capaz de resistir una presión diferencial muy grande, cuando esta se aplica del pozo hacia la formación, la cual fácilmente se puede limpiar cuando se somete al pozo a una

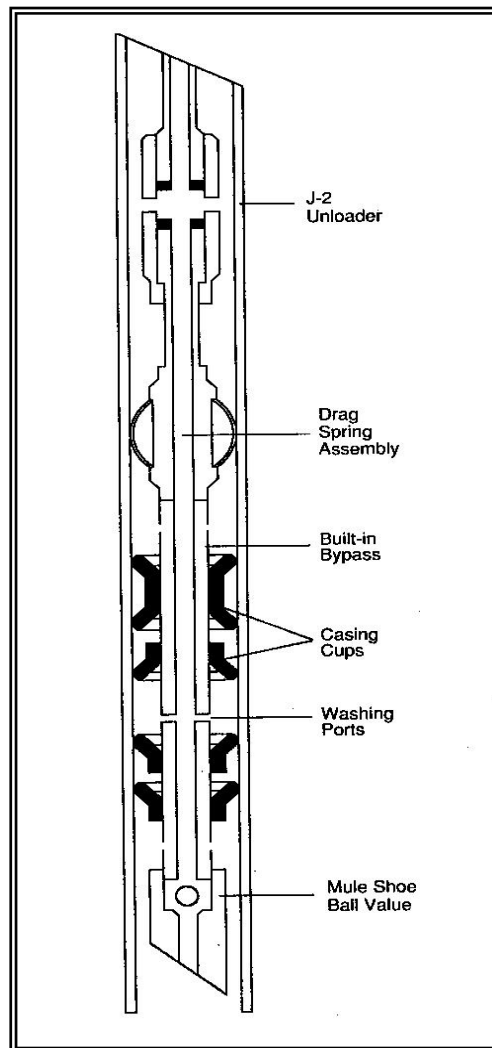


FIGURA 17 - Herramienta para el lavado de las perforaciones

presión diferencial en una dirección contraria, además del revoque del lodo, los ripios, parafinas, arena de la formación, raspaduras de la tubería, óxido, recubrimiento, etc, pueden aumentar y contribuir a tapar las perforaciones. En un pozo productor las perforaciones superiores están normalmente abiertas, mientras que las perforaciones tapadas generalmente se encuentran en las zonas más bajas. Un forzamiento bajo estas condiciones tendrá como resultado el fracaso o la imposibilidad de llenar todas las perforaciones con la lechada de cemento.

### 2.13.2 Perforaciones Obstruidas.

El lavado de las perforaciones antes de realizar un forzamiento es muy útil con la finalidad de preparar a las

perforaciones para que estén receptivas a la lechada de cemento. Esto se realiza a través de medios mecánicos o químicos.

El lavado mecánico de las perforaciones, involucra el uso de una herramienta para el lavado y la técnica de agitación. La herramienta que lava las perforaciones aísla un número pequeño de perforaciones en un momento.

El procedimiento consiste en que el fluido de lavado se bombea hacia el fondo del pozo a través de la tubería, forzando al mismo a entrar en las perforaciones. La herramienta se mueve despacio hacia arriba para cubrir el intervalo perforado totalmente.

Los fluidos de lavado comúnmente usados son productos químicos que contienen surfactantes, seguido por ácidos débiles cuando restos o revoque de lodo quieren ser removidos y se usan solventes cuando depósitos de parafinas están presentes.

La herramienta de agitación es básicamente una cámara aérea entre una válvula superior y una inferior. La herramienta se corre en el pozo en conjunto con una empaadura para aislar el intervalo de interés. Una vez que la empaadura es fijada, la válvula inferior se abre, permitiendo a los fluidos entrar en la cámara. La despresurización rápida del pozo crea una presión diferencial alta en las perforaciones, limpiando los ripios y otros materiales que obstruyen las perforaciones. Para establecer la circulación después de la agitación, la válvula superior se abre (esto se realiza moviendo la tubería) y los ripios son extraídos circulando en reversa los fluidos del pozo. El lavado químico de las perforaciones es una técnica que involucra el uso de ácidos y solventes, bombeado delante de la lechada de forzamiento.

### **2.13.3 Localización Inapropiada de la Empaadura.**

Si la empaadura se localiza demasiado arriba del tope de las perforaciones, la lechada de cemento se contamina encauzándola a través del lodo o del fluido de completación. Esto trae como consecuencia que las propiedades de una lechada como; pérdida de filtrado, el tiempo de espesamiento y la viscosidad

sean severamente afectadas debido a la contaminación, lo cual trae como resultado que el desplazamiento sea alterado.

La empacadura para el forzamiento no debe colocar a más de 75 pies sobre el tope de las perforaciones, es recomendable colocar la empacadura a una distancia sobre el tope de las perforaciones que oscile entre 30 y 60 pies. El uso de fluidos espaciadores compatibles colocados delante y detrás de la lechada de cemento también es recomendado.

#### **2.13.4 Presión Final de Forzamiento Alta.**

Una presión final alta no aumenta las posibilidades de éxito, al contrario, aumenta las oportunidades de fracturar la formación y de perder el control de la colocación de la lechada de cemento.

## **2.14. APLICACIÓN DE LA LEY DE DARCY**

La Ley de Darcy enuncia que la velocidad de un fluido homogéneo en un medio poroso es proporcional al gradiente de presión e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, o:

$$V = \frac{-K \cdot \partial P}{\mu \cdot \partial S} = \frac{q}{A} \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde la velocidad aparente (V) en centímetros por segundo, la tasa volumétrica del flujo (q) en centímetros cúbicos por segundo y el área de la sección transversal total (A) o aparente de la roca, en centímetros cuadrados.

La viscosidad ( $\mu$ ) del fluido se expresa en centipoises (cP), y el gradiente de presión ( $\partial P/\partial S$ ) tomado en la misma dirección de q y de V, en atmósferas por centímetro.

La constante de proporcionalidad (K) representa la permeabilidad de la roca expresada en darcys (D) (esta constante también puede denominarse como la conductividad del fluido).

Esta ley es aplicada sólo en la región de flujo laminar, ya que en flujo turbulento ocurre a altas velocidades, el gradiente de presión aumenta a una rata mayor que la del flujo.

A excepción del caso de muy altas ratas de inyección o de producción en la vecindad del pozo, el flujo en el yacimiento es laminar y la Ley de Darcy se cumple cabalmente.

Esta ley no se aplica a flujo en canales porosos individuales, sino a partes de la roca de dimensiones razonablemente grandes comparadas con el tamaño de los canales porosos, en otras palabras, es una ley estadística que promedia el comportamiento de un gran número de canales.

La Ley de Darcy para un flujo radial hacia un pozo vertical y en unidades de campo, se denota de la siguiente manera:

$$Q = \frac{-K \cdot h \cdot (P_2 - P_1)}{141,2 \cdot \mu \cdot \ln(r_2/r_1)} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde la tasa de flujo (Q) se expresa de barriles por día (Bbl/Día), la permeabilidad promedio (K) se expresa en miliDarcy (mD), el espesor del intervalo de flujo (h) se expresa en pies, la presión (P) se expresa en libras por pulgada cuadrada (psi), la viscosidad del fluido ( $\mu$ ) en centiPoises (cP) y el radio de la sección (r) se expresa en pies (ft).

## CAPITULO III

### 3.1. METODOLOGIA

El método propuesto para cuantificar el volumen de lechada de cemento necesario para un procedimiento de forzamiento, se basa fundamentalmente en el desarrollo de tres principios básicos; la Prueba de Integridad de Presiones, la Ley de Formación del Filtro Pastel y la Ley de Darcy, tomando en cuenta el conocimiento de las características de la lechada a utilizar, para un número determinado de datos operacionales de cementación forzada a baja presión realizados en campos petrolíferos ubicados de la región oriental del país.

Los datos utilizados para validar la metodología propuesta, corresponden a operaciones de campo realizada por la Empresa San Antonio PRIDE / División Oriente, ubicada en la población de San Tomé, Estado Anzoátegui.

Para realizar una evaluación cuantitativa apropiada de la situación, es importante tener una visión clara del propósito y objetivo que busca un procedimiento de forzamiento, para ello se destacan dos fases claramente definidas, las cuales son; la fase dinámica o fase de desplazamiento y la segunda es la fase estática o fase de curado del cemento (WOC), en ambos casos, el denominador común es la deshidratación del cemento o la pérdida de filtrado.

Durante la fase dinámica, la lechada es desplazada hacia la zona de interés, llenando los espacios que permiten el ingreso de la lechada. Al llegar la misma a la cara permeable de la formación, es cuando comienza el proceso de formación del filtro pastel.

Este pastel inicialmente presenta una pérdida de filtrado muy alta y al constituir un revoque de cemento adecuado, es cuando la estructura del pastel de cemento comienza a formarse. Una vez que el proceso de bombeo se detiene es cuando la fase de curado permite el libre crecimiento del pastel de cemento a fin obtener un sello impermeable entre el pozo y la formación.

Desde el punto de vista operacional el parámetro pertinente durante el desplazamiento es la disminución del contenido de líquido en la lechada de cemento y

durante la fase estática el parámetro fundamental es el aumento continuo del espesor del pastel de cemento.

Las propiedades de una lechada son muy sensibles a la variación de la relación agua/cemento (W/C). El parámetro crítico lo representa el aumento de la densidad debido a la pérdida de fluido (líquido), por lo tanto, se considera que la relación W/C alcanza niveles muy altos cuando esta llega a un 38% o 40%, donde una variación de 10% en la densidad de la lechada no tiene una influencia significativa en el valor del rendimiento, pero el efecto sobre el tiempo de curado es sustancial.

El procedimiento aplicado para la determinación del volumen de lechada, consiste en calcular a través de un programa de computación desarrollado bajo el lenguaje Microsoft EXCEL 2000, en el cual se realizan procesos de cálculo puntuales para cada uno de los pozos sometidos a estudio.

Los cálculos se realizan en tres fases, las cuales se muestran a continuación:

1. Inicialmente se calculan todos los parámetros relacionados a las condiciones de fondo del pozo y de los fluidos de desplazamiento, algunos de estos son; espesor y profundidad promedio del intervalo, presión de la columna hidrostática, de fractura y máxima de trabajo, permeabilidad de la formación, viscosidad del fluido de completación, temperatura de fondo, área de la superficie permeable.
2. Seguidamente se calculan los parámetros que describen a la lechada utilizada, los más importantes son; densidad del cemento, fracción volumétrica del agua y del cemento, la relación agua/cemento (Fw/c) en peso, fracciones mínimas de líquido.
3. Finalmente, la última fase caracteriza el proceso de inyección y filtrado de la lechada, bajo las condiciones determinadas en las fases previas. El resultado de los cálculos permiten obtener el comportamiento del proceso de deposición de sólidos o formación del filtro pastel y el flujo de filtrado hacia la formación permeable, con estos parámetros se determina el volumen acumulado de filtrado, el cual es un parámetro fundamental para



determinar el volumen de lechada requerido para la cementación secundaria.

Es importante, tener en cuenta que durante el proceso de desplazamiento la Ley de Darcy es aplicable, por lo tanto, se asume que la permeabilidad del pastel es constante con respecto a la proporción de flujo, a la presión diferencial aplicada y al espesor del intervalo. Para ello, se considera que el pastel es homogéneo e incompresible, también se asume que el tamaño del anular es despreciable comparado con el diámetro del hoyo y la resistencia de la formación para dejar pasar fluidos a través de la zona permeable es despreciable.

Los parámetros definidos en la Ley de Formación del Filtro Pastel, como son; la fracción del volumen de sólidos en suspensión, la permeabilidad del filtro pastel (anexo A), la constante de deposición, la presión diferencial aplicada y la viscosidad estimada del filtrado (anexo B).

Al determinar el volumen acumulado de filtrado (según la Ley de Formación del Filtro Pastel), para un período de tiempo de treinta minutos y comparando este volumen con una relación equivalente de la medición de la pérdida de filtrado obtenida en el laboratorio, partiendo del hecho de que esta prueba alcanza la mayor acumulación de filtrado en un período de treinta minutos.

Se define un parámetro denominado Pérdida de Filtrado Dinámica Aparente, el cual constituye la fracción líquida total de la lechada. Esto es debido a que la pérdida de filtrado medida en condiciones dinámicas es mucho mayor que en las condiciones estáticas, puesto que la turbulencia producto del proceso de inyección perturba el normal desarrollo de la estructura del filtro pastel, propiciando altas pérdidas de filtrado inicialmente, las cuales disminuyen a medida de que el revoque de cemento es depositado.

Finalmente, al conocer el volumen de filtrado para cada barril de lechada, se puede decir que las proporciones volumétricas se conservan, razón por la cual, al conocer el volumen total de filtrado acumulado se puede determinar el volumen requerido de lechada de cemento para un procedimiento de forzamiento.

**3.2. DATOS EXPERIMENTALES** Fuente: San Antonio-PRIDE / División Oriente

Identificación del Pozo	<b>Araivel-1</b>	<b>Araivel-2</b>	<b>Araivel-3</b>	<b>Araivel-4</b>
Campo / Estado	Araivel / Monagas	Araivel / Monagas	Araivel / Monagas	Araivel / Monagas
Tipo de Trabajo	Aislamiento Zona Productora	Forzamiento Zona Product	Forzamiento Zona Product	Aislamiento Zona Product
Fluido de Completación	Salmuera	Salmuera	Salmuera	Salmuera
Densidad Fluido, lb/gal	8.4	8.4	8.4	8.4
<b>CONFIGURACIÓN DEL POZO</b>				
Revestidor	7 in; 32 lb/ft	7 in; 32 l/ft	7 in; 32 l/ft	7 in; 32 l/ft
Tubing	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft
Intervalo, ft	11196 - 11200	11150 - 11155	11220 - 11223	11100 - 11105
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA</b>				
Densidad, lb/gal	15,8	15,8	15,8	15,8
Rendimiento ft <sup>3</sup> /sks	1,513	1,513	1,513	1,513
Pérdida Filtrado, ml/30min	89	86	88	87
Grad Temp., °F/100 ft	1,33	1,33	1,33	1,33
Tiempo de Espesam, hr	2:08	2:05	2:04	2:08
Requerim Agua, bbl/sks	6,18	6,17	6,17	6,18
<b>PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES</b>				
<b>Q, bbl/min</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>
0.5	2700	2500	2200	2700
1.0	2750	2650	2500	2850
2.0	3000	3000	3000	3000
<b>ESTUDIO REOLÓGICO</b>				
<b>r.p.m.</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>
300	114	117	114	116
200	82	84	84	86
100	49	48	48	50
60	37	34	37	36
30	26	23	25	26
20	20	20	21	22
10	15	13	15	15
6	12	11	11	11
3	10	9	10	9
<b>VOLÚMENES RESULTANTES DEL PROCESO DE FORZAMIENTO</b>				
En la Formación, bbl	10,0	12,0	7,2	11,4
En el Revestidor, bbl	4,0	2,8	2,8	1,2
Reversados, bbl	2,0	2,2	1,0	4,4
Presión de Cierre, psi	5000	5000	5000	4900

Identificación del Pozo	Oritupan - 1	Oritupan - 2	Oritupan - 3	Oritupan - 4
Campo / Estado	Oritupano / Monagas	Oritupano / Monagas	Oritupano / Monagas	Oritupano / Monagas
Tipo de Trabajo	Forzamiento en Arena Productora	Forzamiento en Arena Product	Forzamiento en Arena Product	Aislamiento Zona Product
Fluido de Completación	Salmuera	Salmuera	Salmuera	Salmuera
Densidad Fluido, lb/gal	8.4	8.4	8.4	8.4
<b>CONFIGURACIÓN DEL POZO</b>				
Revestidor	5,5 in;15,5 lb/ft	5,5 in;15,5 lb/ft	5,5 in;15,5 lb/ft	5,5in;15,5 lb/ft
Tubing	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft	2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> in; 6,5 lb/ft
Intervalo, ft	6197 - 6203	6130 - 6134	6212 - 6218	6154 - 6159
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA</b>				
Densidad, lb/gal	15,8	15,8	15,8	15,8
Rendimiento ft <sup>3</sup> /sks	1,148	1,148	1,148	1,148
Pérdida Filtrado, ml/30min	110	106	98	108
Grad Temp., °F/100 ft	1,05	1,05	1,05	1,22
Tiempo de Espesam, hr	1:17	1:17	1:05	1:10
Requerim Agua, bbl/sks	4,96	4,97	4,96	4,96
<b>PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES</b>				
<b>Q, bbl/min</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>
0.5	600	750	600	650
1.0	1000	1000	900	950
2.0	1500	1500	1500	1500
<b>ESTUDIO REOLÓGICO</b>				
<b>r.p.m.</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>
300	159	162	160	164
200	124	126	124	128
100	78	90	80	92
60	53	55	56	57
30	32	34	34	36
20	24	25	25	25
10	14	14	16	19
6	12	12	12	11
3	9	10	9	9
<b>VOLÚMENES RESULTANTES DEL PROCESO DE FORZAMIENTO</b>				
En la Formación, bbl	9,8	6,2	8,8	7,9
En el Revestidor, bbl	3,1	2,5	2,8	2,5
Reversados, bbl	1,0	1,6	0	1,3
Presión de Cierre, psi	3000	2900	3000	3000

Fuente: Empresa San Antonio-PRIDE / División Oriente

Identificación del Pozo	<b>Leona - 1</b>	<b>Leona - 2</b>	<b>Leona - 3</b>	<b>Leona - 4</b>
Campo / Estado	Leona / Anzoátegui	Leona / Anzoátegui	Leona / Anzoátegui	Leona / Anzoátegui
Tipo de Trabajo	Forzamiento en Arena Productora	Forzamiento en Arena Product	Forzamiento en Arena Product	Forzamiento Arena Product
Fluido de Completación	Salmuera	Salmuera	Salmuera	Salmuera
Densidad Fluido, lb/gal	8.4	8.4	8.4	8.4
<b>CONFIGURACIÓN DEL POZO</b>				
Revestidor	7 in; 23 lb/ft	7 in; 23 lb/ft	7 in; 23 lb/ft	7 in; 23 lb/ft
Tubing	3 1/2 in; 9,3 lb/ft	3 1/2 in; 9,3 lb/ft	3 1/2 in; 9,3 lb/ft	3 1/2 in; 9,3 lb/ft
Intervalo, ft	6439 - 6448	6382 - 6388	6412 - 6420	6395 - 6401
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA</b>				
Densidad, lb/gal	15,8	15,8	15,8	15,8
Rendimiento ft <sup>3</sup> /sks	1,149	1,149	1,149	1,149
Pérdida Filtrado, ml/30min	38	36	40	39
Grad Temp., °F/100 ft	1,73	1,73	1,73	1,73
Tiempo de Espesam, hr	1:14	1:16	1:10	1:12
Requerim Agua, bbl/sks	3,37	3,36	3,36	3,36
<b>PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES</b>				
<b>Q, bbl/min</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>
0.5	2700	1800	2400	2500
1.0	2750	2400	2700	2700
2.0	3000	3000	3000	3000
<b>ESTUDIO REOLÓGICO</b>				
<b>r.p.m.</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>
300	91	86	89	87
200	66	63	66	64
100	42	39	41	41
60	30	27	25	32
30	21	18	17	17
20	15	13	12	12
10	11	9	8	9
6	9	7	6	6
3	7	4	4	4
<b>VOLÚMENES RESULTANTES DEL PROCESO DE FORZAMIENTO</b>				
En la Formación, bbl	5,1	5,8	8,8	6,2
En el Revestidor, bbl	5,0	1,2	1,2	2,3
Reversados, bbl	3,2	2,0	2,0	2,5
Presión de Cierre, psi	3800	4000	4000	4000

Fuente: Empresa San Antonio-PRIDE / División Oriente

Identificación del Pozo	S.Tomé - 1	S.Tomé - 2	S.Tomé - 3	S.Tomé - 4
Campo / Estado	San Tomé / Anzoátegui	San Tomé / Anzoátegui	San Tomé / Anzoátegui	San Tomé / Anzoátegui
Tipo de Trabajo	Aislamiento Zona Productora	Aislamiento Zona Product	Aislamiento Zona Product	Aislamiento Zona Product
Fluido de Completación	Agua Fresca	Salmuera	Salmuera	Agua Fresca
Densidad Fluido, lb/gal	8.33	8.4	8.4	8.33
<b>CONFIGURACIÓN DEL POZO</b>				
Revestidor	7 in; 23 lb/ft	7 in; 23 lb/ft	7 in; 23 lb/ft	7 in; 23 lb/ft
Tubing	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in	2 <sup>3</sup> / <sub>8</sub> in
Intervalo, ft	4846 - 4848	4882 - 4884	4898 - 4901	4912 - 4914
<b>CARACTERÍSTICAS DE LA LECHADA</b>				
Densidad, lb/gal	15,6	15,6	15,6	15,6
Rendimiento ft <sup>3</sup> /sks	1,18	1,18	1,18	1,18
Pérdida Filtrado, ml/30min	60	64	62	60
Grad Temp., °F/100 ft	1,72	1,72	1,72	1,72
Tiempo de Espesam, hr	1:32	1:29	1:30	1:32
Requerim Agua, bbl/sks	5,2	5,2	5,1	5,2
<b>PRUEBA DE INTEGRIDAD DE PRESIONES</b>				
<b>Q, bbl/min</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>	<b>Psup, psi</b>
0.5	1800	1450	1600	1800
1.0	1900	1750	1800	1900
2.0	2200	2200	2200	2200
<b>ESTUDIO REOLÓGICO</b>				
<b>r.p.m.</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>	<b>LECTURA</b>
300	122	123	125	122
200	84	86	88	84
100	46	49	51	46
60	30	33	36	30
30	18	23	25	18
20	13	14	14	13
10	10	11	10	10
6	6	7	6	6
3	4	5	4	4
<b>VOLÚMENES RESULTANTES DEL PROCESO DE FORZAMIENTO</b>				
En la Formación, bbl	3,2	3,5	5,1	3,4
En el Revestidor, bbl	2,1	1,2	1,4	1,5
Reversados, bbl	1,2	1,5	1,0	0,8
Presión de Cierre, psi	3000	3000	3000	3100

Fuente: Empresa San Antonio-PRIDE / División Oriente

### 3.3. PROCEDIMIENTO REALIZADO

Con los datos de las operaciones obtenidos tanto en el campo como en las pruebas de laboratorio de la lechada de cemento a utilizar, se realizan algunos cálculos previos a fin de determinar parámetros de interés, tales como:

- **Área de la Superficie de Interés:**

$$A = \pi \cdot D_h \cdot h \quad (\text{Ec. 17})$$

donde:

$A$  = Área de la superficie permeable,  $\text{ft}^2$ .

$D_h$  = Diámetro del hoyo, ft.

$h$  = Espesor del intervalo, ft.

- **Fracción Volumétrica de Sólidos en Suspensión:**

$$V_{\text{Total}} = 7,48 \text{ (gal/ft}^3\text{)} \cdot \text{Rendimiento (ft}^3\text{)} \quad (\text{Ec. 18})$$

$$V_{\text{Agua}} \text{ (gal)} = \text{Requerimiento de Agua (gal/sks)} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$f = 1 - \frac{V_{\text{Agua}}}{V_{\text{Total}}} \quad (\text{Ec. 20})$$

donde:

$f$  = Fracción volumétrica de sólidos en suspensión, adim.

$V_{\text{Agua}}$  = Volumen total de agua por volumen de lechada, gal.

$V_{\text{Total}}$  = Volumen de lechada por saco de cemento, gal.

- **Constante de Deposición del Filtro Pastel:**

$$w = \frac{f}{1 - f - \emptyset} \quad (\text{Ec. 21})$$

donde:

$w$  = Constante de deposición del filtro pastel, adim.

$\emptyset$  = Porosidad promedio de la formación, fracción.

$f$  = Fracción volumétrica de sólidos en suspensión, adim.

- ***Profundidad Promedio del Intervalo:***

$$H_{\text{Prom}} = H_{\text{Tope}} + (0,5 \cdot h) \quad (\text{Ec. 22})$$

donde:

$H_{\text{Prom}}$  = Profundidad promedio, ft.

$H_{\text{Tope}}$  = Profundidad del tope del intervalo, ft.

$h$  = Espesor del intervalo, ft.

- ***Temperatura de Fondo:***

$$T_{\text{Fondo}} = T_{\text{Amb}} + (\text{Grd}_{\text{Temp}} \cdot H_{\text{Prom}}) \quad (\text{Ec. 23})$$

donde:

$T_{\text{Fondo}}$  = Temperatura de fondo, °F.

$T_{\text{Amb}}$  = Temperatura ambiental, °F.

$\text{Grd}_{\text{Temp}}$  = Gradiente de temperatura, °F/100 ft.

$H_{\text{Prom}}$  = Profundidad promedio, ft.

- ***Permeabilidad del Filtro Pastel:***

Este valor es determinado a través del uso de la gráfica desarrollada por el estudio de Hook y Ernst (anexo A), el cual presenta una relación entre la permeabilidad del filtro pastel en función de la pérdida de filtrado medida a través de pruebas de laboratorio.

- ***Viscosidad del Filtrado:***

Este valor es determinado a través de la gráfica desarrollada por el estudio de Craft y Hawkins (anexo B), el cual presenta una relación del comportamiento de la viscosidad del agua en función de la temperatura.

- ***Ley de Formación del Filtro Pastel:***

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{w \cdot q}{A} \quad (\text{Ec. 24}) .$$

donde:

$q$  = Tasa de flujo de filtrado por unidad de área superficial,  $\text{ft}^3/\text{min}$ .

$\partial S/\partial t$  = Velocidad de crecimiento del espesor del pastel,  $\text{ft}/\text{min}$ .

$A$  = Área de la superficie permeable,  $\text{ft}^2$ .

$w$  = Constante de deposición del filtro pastel, adim.

- **Ley de Darcy:**

$$q = \frac{k \cdot A \cdot \Delta P}{\mu \cdot S} \quad (\text{Ec. 25})$$

donde:

$q$  = Tasa de flujo,  $\text{bbl}/\text{min}$ .

$k$  = Permeabilidad del filtro pastel, Darcy.

$\Delta P$  = Diferencial de presión aplicado,  $\text{psi}$ .

$\mu$  = Viscosidad del filtrado,  $\text{cP}$ .

$A$  = Área de la superficie permeable,  $\text{ft}^2$ .

$S$  = Espesor del filtro pastel,  $\text{ft}$ .

- **Crecimiento del Filtro Pastel:**

La combinación de la Ley de Darcy y la Ley de Formación del Filtro Pastel, se tiene lo siguiente:

$$A \cdot \frac{\partial S}{\partial t} = w \left( \frac{k \cdot A \cdot \Delta P}{\mu \cdot S} \right)$$

reagrupando:

$$S \cdot \partial S = \frac{w \cdot k \cdot \Delta P}{\mu} \partial t$$

después de la integración numérica, se tiene que:

$$0,5 \cdot S^2 = \left( \frac{w \cdot k \cdot \Delta P}{\mu} \right) t$$



reagrupando los términos, se llega a la siguiente expresión:

$$S(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot w \cdot k \cdot \Delta P}{\mu}} \cdot t^{1/2} \quad (\text{Ec. 26})$$

donde:

$k$  = Permeabilidad del filtro pastel, Darcy.

$\Delta P$  = Diferencial de presión aplicado, psi.

$\mu$  = Viscosidad del filtrado, cP.

$S$  = Espesor del filtro pastel, ft.

$w$  = Constante de deposición del filtro pastel, adim.

$t$  = Tiempo, min.

Esta ecuación representa la variación del crecimiento del filtro pastel en función del tiempo, para determinar el volumen acumulado de filtrado se procede de la siguiente manera, sabiendo que:

$$q = \frac{\partial Q}{\partial t}$$

donde:

$q$  = Tasa de flujo, ft<sup>3</sup>/min.

$\partial Q$  = Volumen acumulado, ft<sup>3</sup>.

$\partial t$  = Tiempo de acumulación, min

sustituyen en la Ley de Formación del Filtro Pastel, se tiene que:

$$\frac{A \cdot \partial S}{\partial t} = w \left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right)$$

$$A \cdot S = w \cdot Q$$

$$Q(t) = \frac{A}{w} \sqrt{\frac{2 \cdot w \cdot k \cdot \Delta P}{\mu}} \cdot t^{1/2}$$

reagrupando los términos, se llega a la siguiente expresión:

$$Q(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot A^2 \cdot k \cdot \Delta P}{w \cdot \mu}} \cdot t^{1/2} \quad (\text{Ec. 25})$$

donde:

$k$  = Permeabilidad del filtro pastel, Darcy.

$\Delta P$  = Diferencial de presión aplicado, psi.

$\mu$  = Viscosidad del filtrado, cP.

$A$  = Área de la superficie permeable, ft<sup>2</sup>.

$Q$  = Tasa de flujo de filtrado, ft<sup>3</sup>.

$w$  = Constante de deposición del filtro pastel, adim.

$t$  = Tiempo, min.

Esta ecuación representa el volumen acumulado de filtrado en función del tiempo. Al graficar el comportamiento de esta ecuación (anexo C), se puede observar dos tendencias claramente definidas. Inicialmente, hay una brusca caída y posteriormente hay una estabilización a medida que transcurre el tiempo. El punto de inflexión en el cambio de comportamiento en la gráfica ocurre a los 30 minutos.

Para establecer una relación entre los datos conocidos y los valores calculados, hay una relación de equivalencia para las condiciones de laboratorio en la cual un barril es equivalente a 350 ml.

Conociendo el volumen de filtrado para cada barril de lechada y estableciendo que las proporciones volumétricas se conservan, por lo tanto, al conocer el volumen total de filtrado acumulado se puede determinar el volumen requerido de lechada de cemento.

Para determinar el volumen de filtrado por barril, se define un parámetro denominado Pérdida de Filtrado Dinámica Aparente, la cual constituye la

fracción líquida total de la lechada usada. Las unidades de este parámetro se establecen en ml/30min, a fin de ajustarla a las condiciones de laboratorio.

- ***Cálculo de la Pérdida de Filtrado Dinámica Aparente:***

$$V_{\text{Perd Filtr}} = 350 * (1 - f) \quad (\text{Ec. 26})$$

donde:

$V_{\text{Perd Filtr}}$  = Volumen Pérdida de Filtrado Dinámica, ml/30min.

$f$  = Fracción volumétrica de sólidos en suspensión, adim.

- ***Volumen de Lechada Calculada Requerida:***

$$V_{\text{Lech Req}} = \frac{Q \cdot 350 \text{ ml}}{5,615 \text{ ft}^3/\text{bbl} \cdot V_{\text{Perd Filtr}}} \quad (\text{Ec. 27})$$

donde:

$Q$  = Volumen acumulado de filtrado,  $\text{ft}^3$ .

$V_{\text{Lech Req}}$  = Volumen de Lechada Requerida, bbl.

### 3.4. LIMITACIONES

La imposibilidad de realizar la prueba de integridad de presiones, limita la viabilidad de conocer previamente las presiones de fractura y las presiones máximas de trabajo.

La inadecuada selección o el diseño incorrecto de la lechada a ser utilizada, la cual debe ajustarse a las características de los fluidos presentes en el proceso de forzamiento y a las características de la formación a ser reparada.

El desconocimiento de las características inherentes de la lechada y de las condiciones de fondo del pozo, dificulta la posibilidad de realizar la caracterización del proceso de forzamiento.

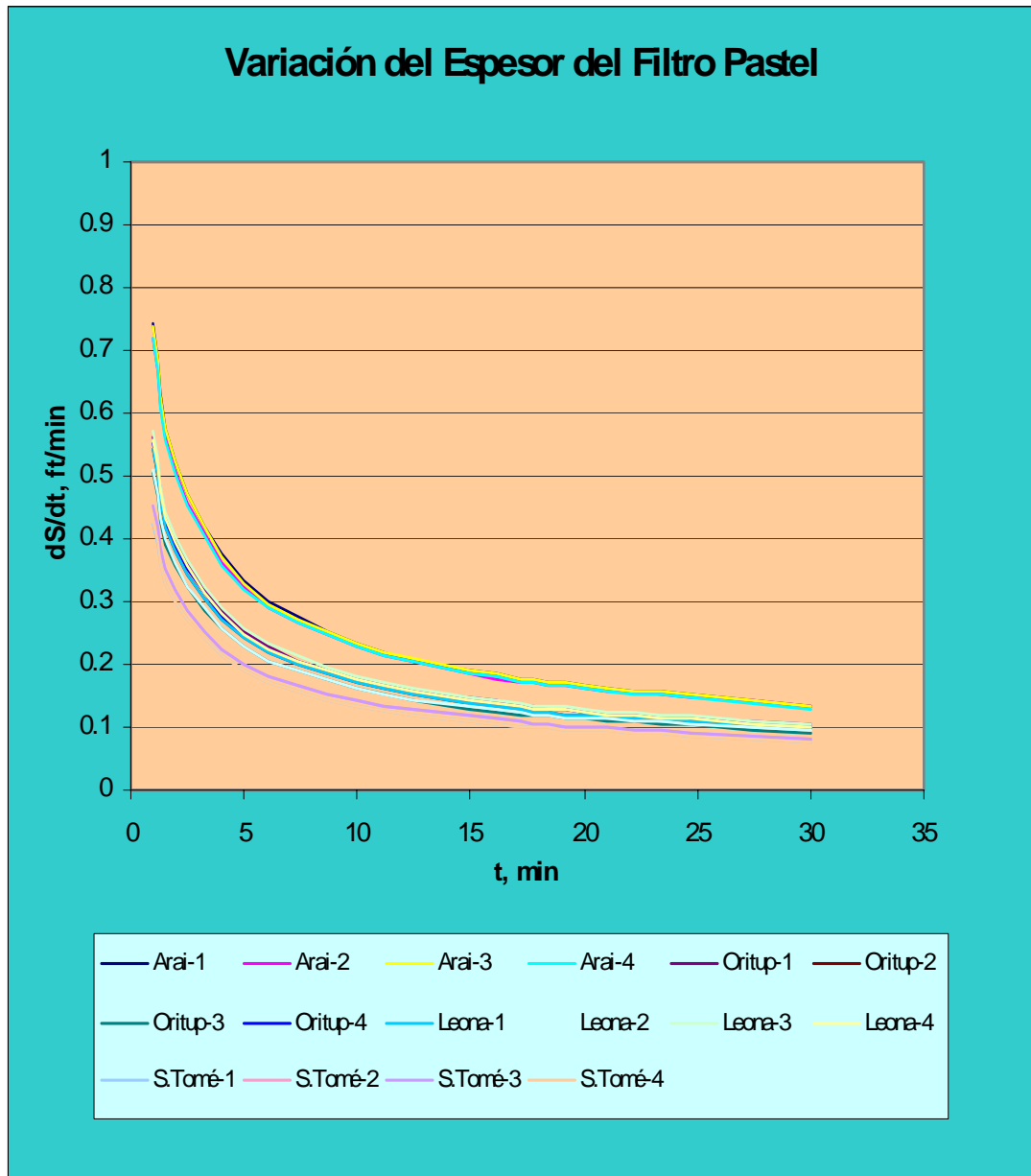
La incorrecto recolección de los datos de campo, puede traer como consecuencia distorsiones perjudiciales en el proceso de estimación de los volúmenes de lechada.

El uso de lechadas especiales o condiciones del pozo anormales, son parámetros no estudiados o tomados en cuenta en este procedimiento.

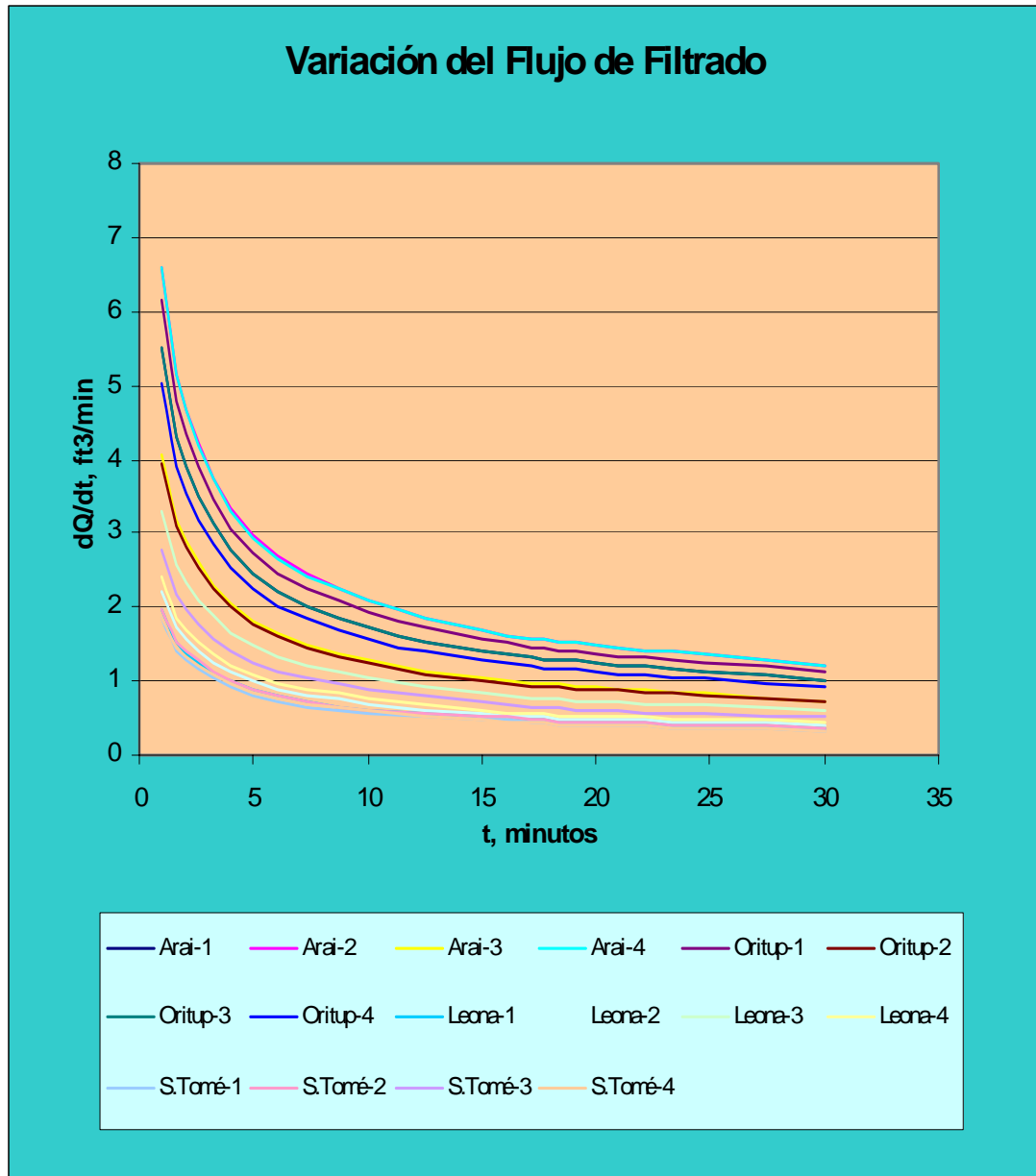
### 3.5. RESULTADOS FINALES

<b>VOLÚMENES LECHADA</b>	<b>Araivel-1</b>	<b>Araivel-2</b>	<b>Araivel-3</b>	<b>Araivel-4</b>
Real en la Formación, bbl	10.0	12.0	7.2	11.4
Totales Utilizados, bbl	16.0	17.0	11.0	17.0
Calculados, bbl	9.8	11.8	7.3	11.8
Diferencia Calc / Real, bbl	0.2	0.2	-0.1	-0.4
<b>VARIACION PORCENTUAL</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Comparación Calc./Real	2.0	1.7	-1.4	-3.5
Exceso Utilizado en Campo	60.0	41.7	52.8	49.1
<b>VOLÚMENES LECHADA</b>	<b>Oritupan-1</b>	<b>Oritupan-2</b>	<b>Oritupan-3</b>	<b>Oritupan-4</b>
Real en la Formación, bbl	9.8	6.2	8.8	7.9
Totales Utilizados, bbl	13.9	10.3	11.6	11.7
Calculados, bbl	10.4	6.7	9.3	8.5
Diferencia Calc / Real, bbl	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6
<b>VARIACIÓN PORCENTUAL</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Comparación Calc./Real	-6.1	-8.1	-5.7	-7.6
Exceso Utilizado en Campo	41.8	66.1	31.8	48.1
<b>VOLÚMENES LECHADA</b>	<b>Leona-1</b>	<b>Leona-2</b>	<b>Leona-3</b>	<b>Leona-4</b>
Real en la Formación, bbl	5.1	5.8	8.8	6.2
Totales Utilizados, bbl	13.3	9.0	12.0	11.0
Calculados, bbl	4.9	5.5	8.2	6.0
Diferencia Calc / Real, bbl	0.2	0.3	0.6	0.2
<b>VARIACIÓN PORCENTUAL</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Comparación Calc./Real	3.9	5.2	6.8	3.2
Exceso Utilizado en Campo	160.8	55.2	36.4	77.4
<b>VOLÚMENES LECHADA</b>	<b>S.Tome-1</b>	<b>S.Tome-2</b>	<b>S.Tome-3</b>	<b>S.Tome-4</b>
Real en la Formación, bbl	3.2	3.5	5.1	3.4
Totales Utilizados, bbl	6.5	6.2	7.5	5.7
Calculados, bbl	3.0	3.2	4.7	3.1
Diferencia Calc / Real, bbl	0.2	0.3	0.4	0.3
<b>VARIACIÓN PORCENTUAL</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
Comparación Calc./Real	6.3	8.6	7.8	8.8
Exceso Utilizado en Campo	103.1	77.1	47.1	67.6

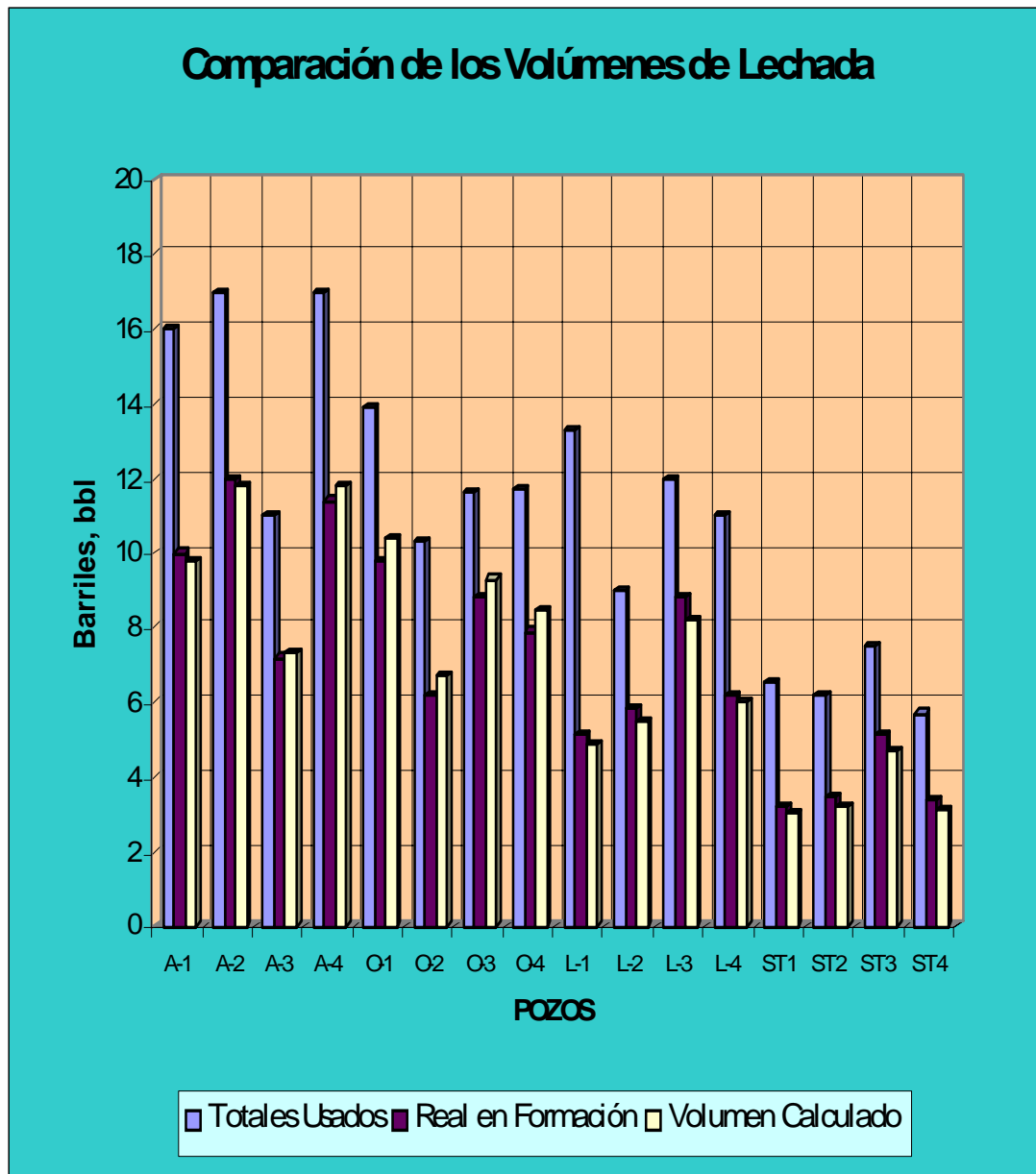
**GRAFICO 2:** El presente gráfico, muestra el comportamiento de la variación del espesor del Filtro Pastel en función del tiempo para período de treinta minutos.



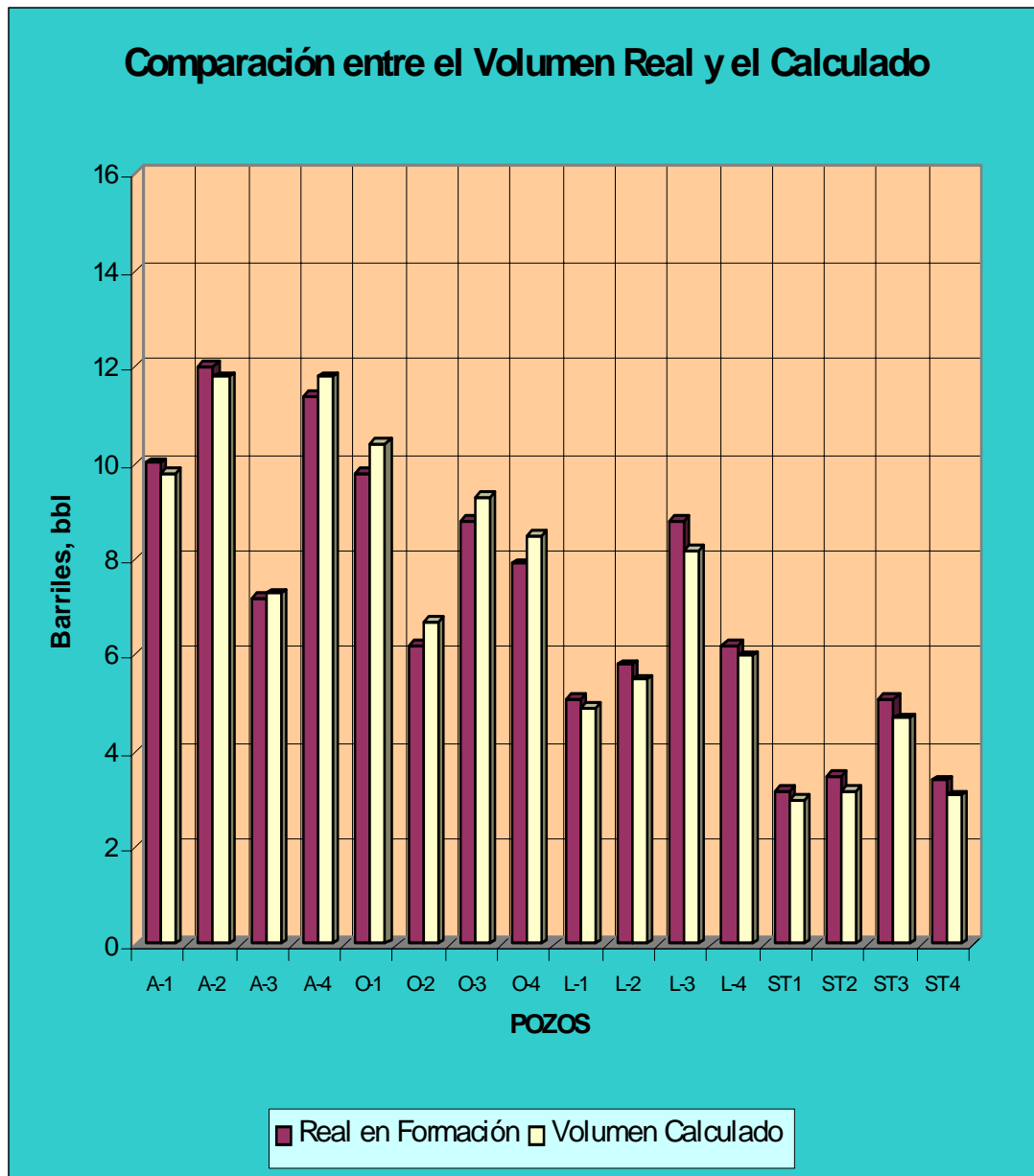
**GRAFICO 3:** El presente gráfico, muestra el comportamiento de la variación del flujo de Filtrado a través del filtro pastel desarrollado para período de treinta minutos.



**GRAFICO 4:** El presente gráfico, muestra la comparación de los volúmenes sometidos a estudio, en el cual se observa, los volúmenes totales usados en la operación de cementación secundaria, los volúmenes de lechada colocada en la formación y los volúmenes de lechada requerida calculada.

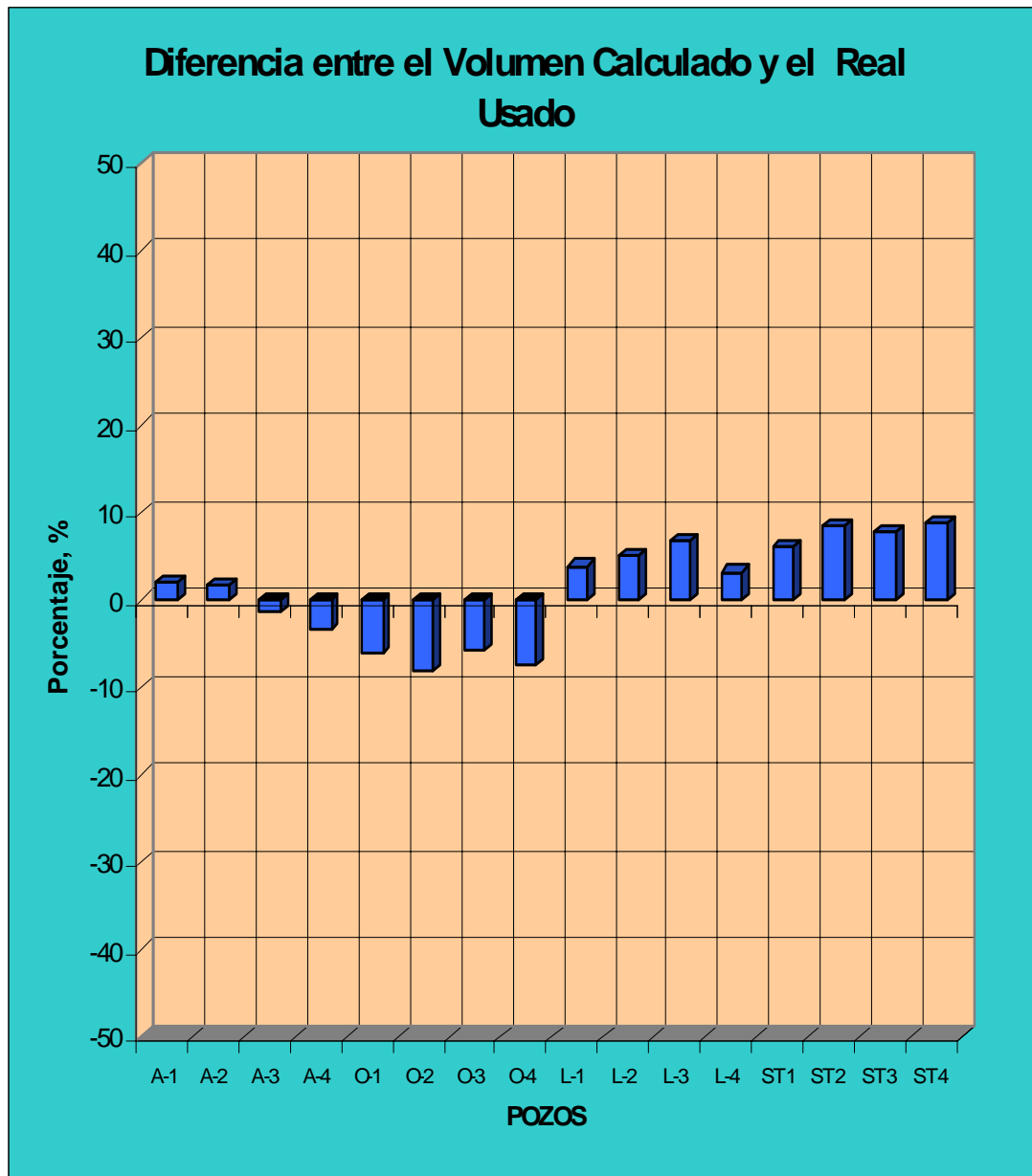


**GRAFICO 5:** El siguiente gráfico, muestra la comparación entre el volumen real de lechada colocada en la formación y el volumen calculado requerido.

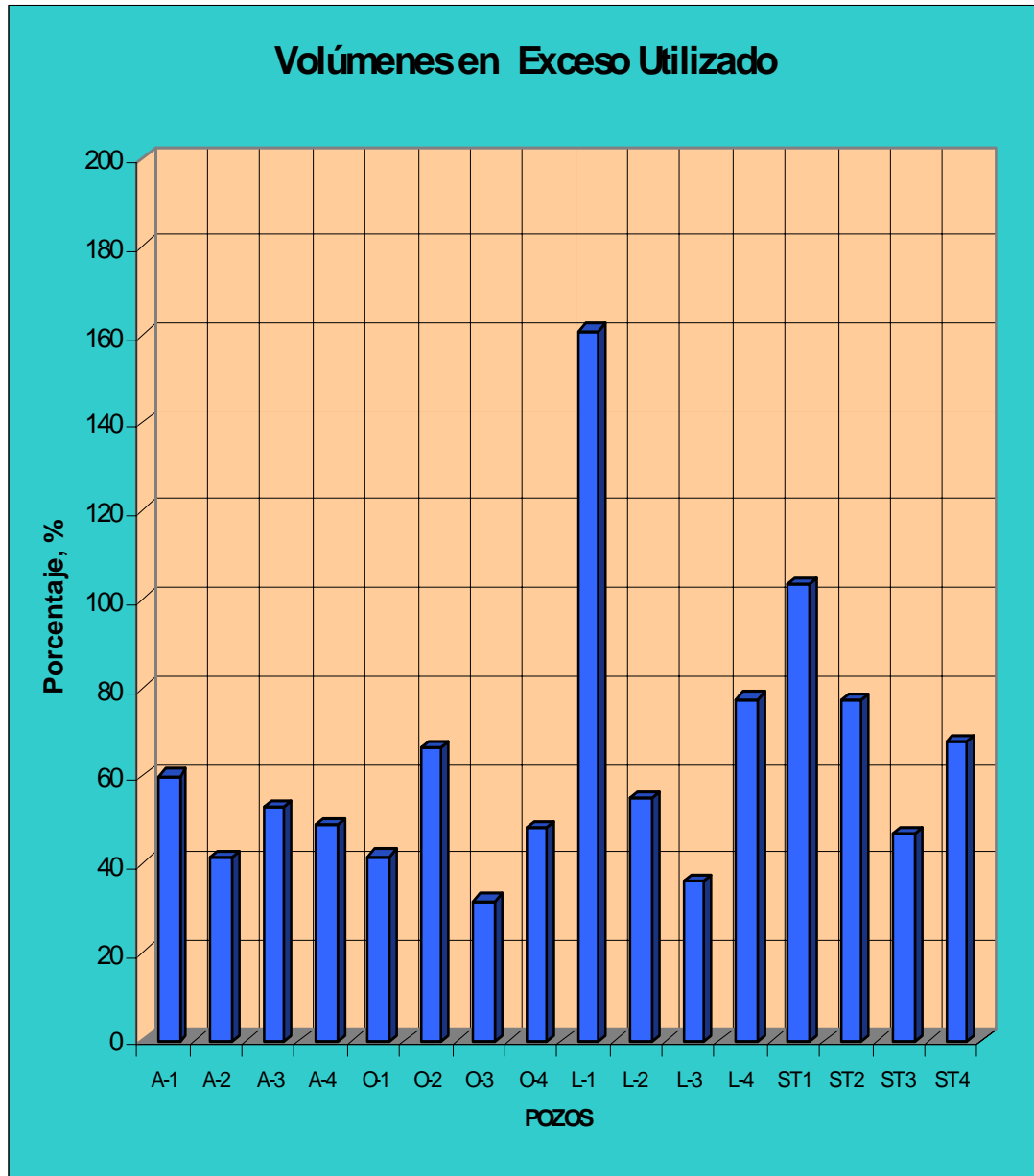




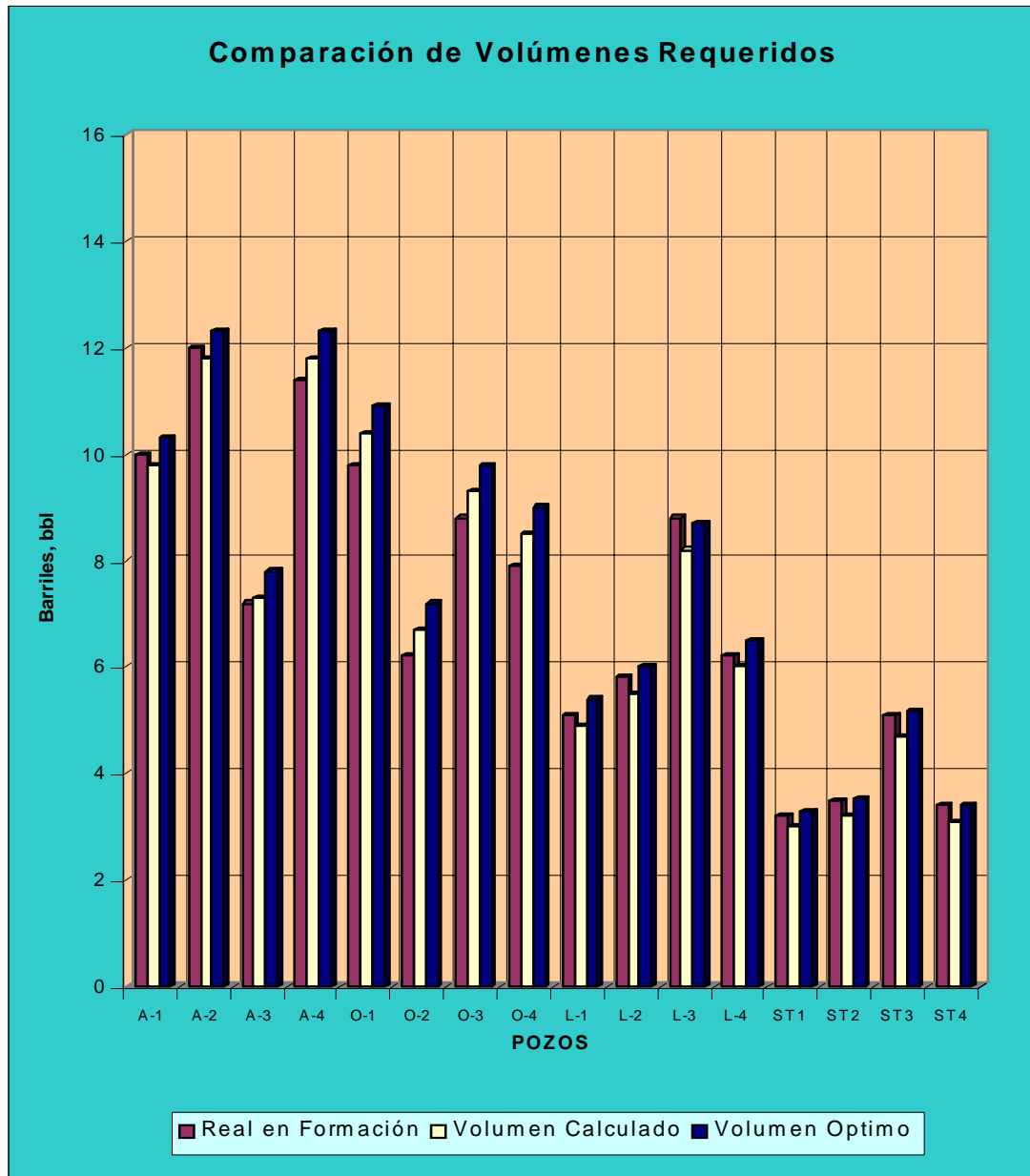
**GRAFICO 6:** El siguiente gráfico, muestra la variación porcentual entre los volúmenes de lechada colocados en la formación y los estimados analíticamente.



**GRAFICO 7:** El siguiente gráfico, muestra la variación porcentual de los excesos en los volúmenes de lechada totales utilizados.



**GRAFICO 8:** El siguiente gráfico, muestra la comparación de los volúmenes en formación, calculados y con exceso de lechada adicional.



### **3.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

La comparación entre el volumen calculado por este procedimiento y el volumen real colocado en la formación en trabajos realizados, muestran una similitud en los requerimientos de lechada para un procedimiento de cementación secundaria.

La máxima desviación porcentual alcanzada, producto de la comparación entre el volumen calculado y el volumen real colocado en la formación, es de 8,8%, sin embargo, esto representa un volumen aproximado de 0,3 barriles de lechada.

El 37% de los valores estimados, presentan volúmenes superiores a las cantidades requeridas, sin embargo, estos excesos no son mayores de medio barril, por lo cual, los mismos pueden ser fácilmente bombeados hacia la formación o retirados mediante el procedimiento de flujo en reversa.

Los volúmenes adicionales de lechada a ser colocados en la formación, no deben ser mayores al 10% (si este es menor a medio barril) del total necesario, de lo contrario el volumen adicional es exactamente medio barril de lechada.

Los volúmenes totales utilizados en los procesos de forzamiento realizados, alcanzan un exceso de hasta 158%, razón por la cual los costos operacionales se incrementan, al igual la posibilidad de daño a la formación mediante un fracturamiento no deseado.

Los volúmenes en exceso de lechada para el proceso de bombeo, dependen de la técnica de desplazamiento aplicada a fin de dar la continuidad de presión hidráulica necesaria, estos volúmenes no son considerados por el presente método.

## CONCLUSIONES

- Existe una relación directamente proporcional entre el volumen calculado y el volumen real inyectado en la formación.
- El espesor desarrollado por el filtro pastel esta sujeto a las características inherentes de la lechada, fundamentalmente a la concentración de controlador de filtrado.
- La pérdida de filtrado dinámica estimada es mucho mayor que la pérdida de filtrado en condiciones estáticas.
- El volumen de acumulación de filtrado es inversamente proporcional al período de tiempo transcurrido.
- El flujo del filtrado que pasa hacia la formación depende de la permeabilidad del pastel de cemento.
- La permeabilidad del pastel de cemento es directamente proporcional a la concentración de aditivos para el control de pérdida de filtrado.
- El uso de la metodología propuesta, permite estimar las cantidades adecuadas de lechada para un procedimiento de forzamiento, reducir los volúmenes de lechada en exceso, minimizando los costos operacionales y los riesgos de fracturamiento tanto en la formación como en la tubería.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un seguimiento de las operaciones ejecutadas y de los resultados alcanzados con el propósito de ajustar el procedimiento de cálculo, en la estimación de los volúmenes requeridos de lechada, a fin de reducir el tiempo de operación y los costos involucrados, optimizando el proceso de forzamiento.
- Ampliar la muestra sometida a estudio, a fin de ajustar los resultados obtenidos en la estimación de los volúmenes de lechada necesarios en un proceso de cementación secundaria.
- Obtener la correcta recolección de datos tanto en el laboratorio y en campo, a fin de minimizar las distorsiones que puedan ocasionar errores involuntarios, trayendo como consecuencia estimaciones erróneas de los volúmenes de lechada requerida.
- Evitar el uso del método propuesto en zonas o intervalos con presiones anormales o con temperaturas de fondo irregulares, debido a que estos factores no fueron tomados en cuenta en el desarrollo de la ecuación de cálculo y los mismos pueden dificultar el proceso de estimación de los volúmenes e influir en la precisión de los resultados.

---

## BIBLIOGRAFÍA

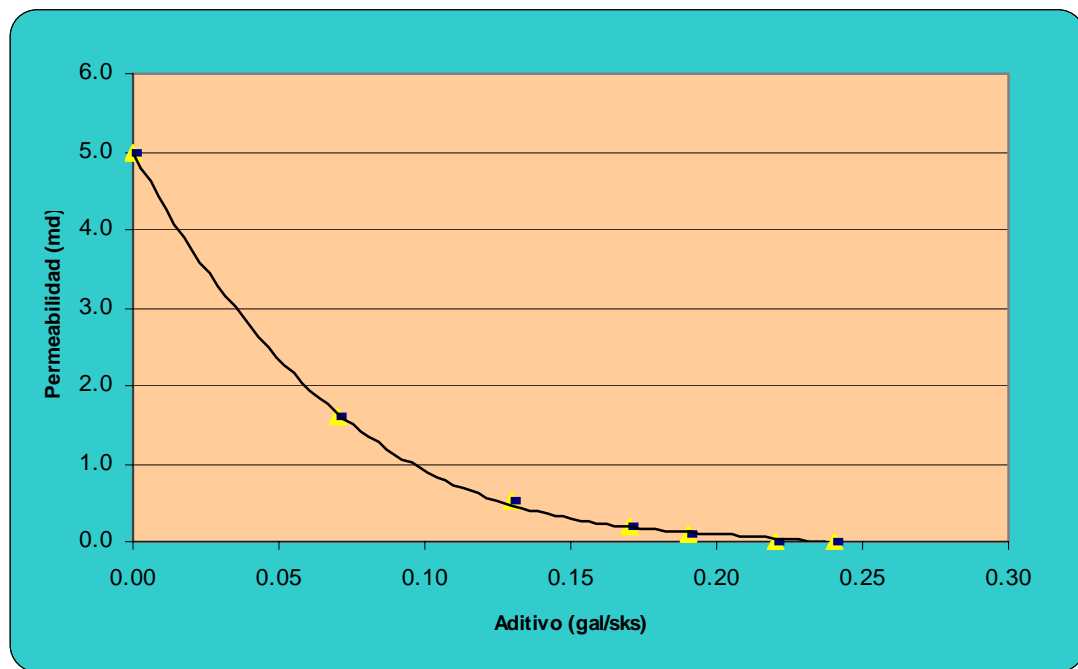
- ADAMS, Neal. "Drilling Engineering". Penn Well Books. Tulsa - EEUU, 1990.
- A.P.I. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice for Testing Well Cements. 22th. Edition. Washington, D. C., EEUU, 1997.
- A.P.I. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification 10 Fifth Edition. No. 130. Texas - EEUU, 1996.
- B.J. Hughes. "Manual de Operaciones. Hidráulica Aplicada". Publicaciones B.J. Hughes. Oklagona - EEUU, 1981.
- BOURGOYNE, A. "Applied Drilling Engineering". Society of Petroleum Engineers, Texas - EEUU, 1990.
- BROWN, K. "Production Optimization of Oil and Gas Wells by Nodal Systems Análisis". Volumen 4. PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, EEUU, 1984.
- ECONOMIDES, M. "Petroleum Well Construction". Penn Well Books. Tulsa - EEUU, 1992.

- NELSON, W. "Cementing". Dowell Schumberger Books. Tulsa - EEUU, 1996.
- INTEVEP. "Prácticas Recomendadas para Pruebas de Cementos y Aditivos usados en cementación de pozos petroleros". Primera Edición. Publicaciones PDVSA/INTEVEP. Los Teques. 1998.
- TUCAN, C. A. "Manual de Procedimientos del Laboratorio de Cementación". Código ML-1. Edición 2000. El Tigre, Estado Anzoátegui, Venezuela.
- TUCAN, C. A. "Manual de Operaciones de Cementación". Código MOP-1. Edición 1999. El Tigre, Estado Anzoátegui Venezuela.
- WEBSTER, W. "Daño a la formación durante las operaciones de cementación". Artículo Drilling Dew, Texas - EEUU, Publicación 1979.

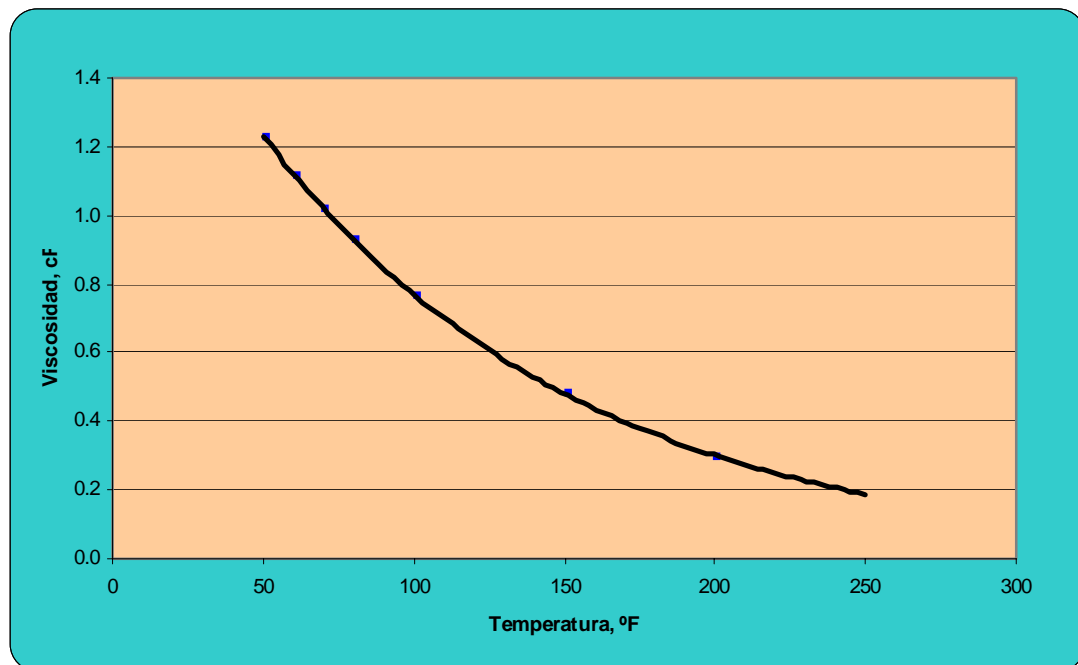


## **ANEXOS**

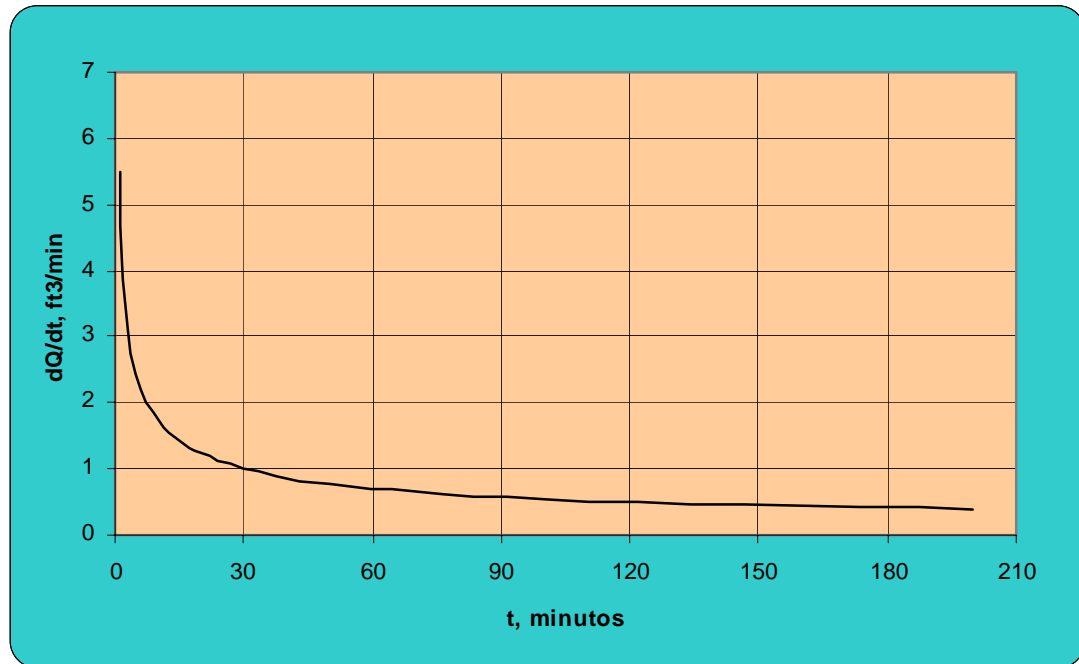
### A. Variación del Espesor del Filtro Pastel



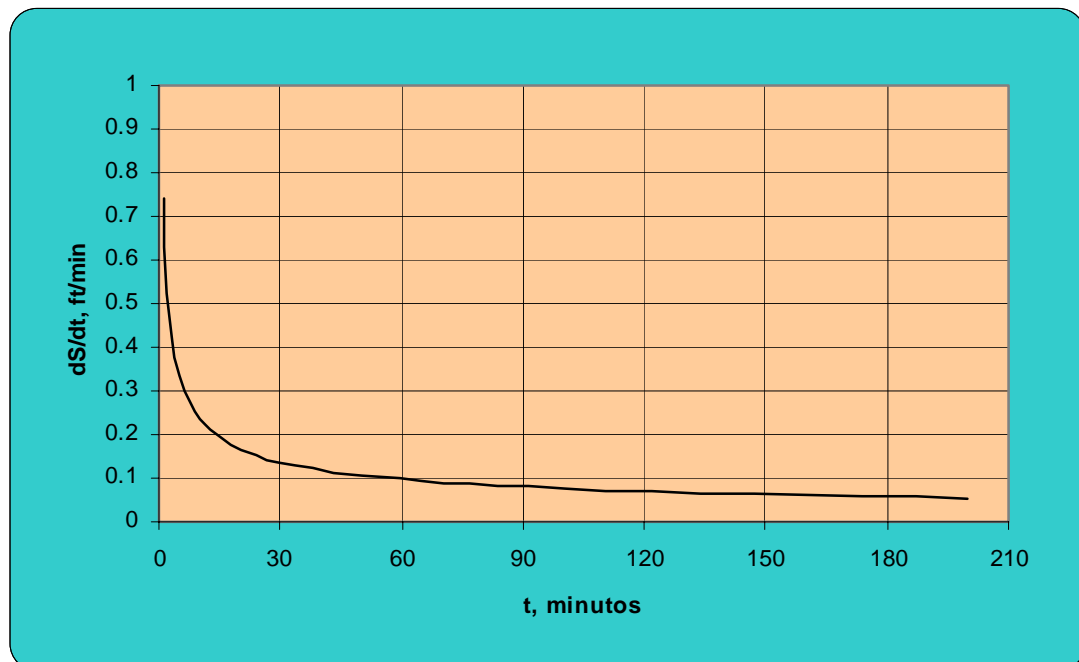
### B. Variación de la Viscosidad del Filtrado



### C. Comportamiento Tipo de la Variación de Flujo del Filtrado



### D. Comportamiento Tipo del Aumento de Espesor del Filtro Pastel



## E. Formato de los Datos de Entrada en el Programa de Cálculo

Identificación del Pozo:	
Ubicación Tope, ft:	
Ubicación Base, ft:	
Densidad Fluido Complet, lpg:	
Densidad Lechada, lpg:	
Rendimiento, pc/sk:	
Pérdida Filtrado, ml/30min:	
Requerimiento de Agua, gal/sk:	
Grd Temp., °F/100 ft:	
Temperatura Ambiente, °F:	
Factor de Seguridad, psi:	
Tasa de Inyección, bbl/min:	

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor			
Tubing			

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	
1,0	
2,0	

## F. Formato de los Datos de Salida en el Programa de Cálculo

Condiciones del Pozo y de los Fluidos		
$\partial h$ , ft		Espesor del Intervalo
H prom, ft		Profundidad Promedio
Dhoyo, in		Diámetro del hoyo
Phid, psi		Presión Hidrostática
Pfrac psi		Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft		Gradiente de Fractura
Pmax, psi		Presión Máxima de Trabajo
K, mD		Permeabilidad Formación
Tfondo, °F		Temperatura de Fondo
Visc, cP		Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>		Area Permeable

Condiciones de la Lechada		
Dcmto, lpg		Densidad del Cemento
F.V. agua, adim		Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim		Fracción Volumen Cemento
F w/c		Relación agua/cemento
F w/c minima		Relac agua/cemento minima

Caracterización del Proceso de Forzamiento		
F, adim		Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD		Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim		Constante de Deposición
$\partial P$ , psi		Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min		Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min		Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl		Volumen de Lechada Requerida

## G. Resultados de los Cálculos del Programa

### DATOS DE ENTRADA

#### POZO ARAIVEL - 1

Identificación del Pozo:	
Densidad Lechada, lpg:	15.8
	1.513
Pérdida Filtrado, ml/30min:	89
Requerimiento de Agua, gal/sk:	6.18
Grd Temp., °F/100 ft:	1.33
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	32	6 1/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2700
1,0	2750
2,0	3000

## DATOS DE SALIDA

### POZO ARAIVEL - 1

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	4	Espesor del Intervalo
H prom, ft	11198	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	9 1/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	4891.3	Presión Hidrostática
Pfrac psi	8891.3	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.794	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	8591.3	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	421.2	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	228.9	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2288	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	9.6866	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	24.8	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.546	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.454	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.404	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.242	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.454	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0688	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.3117	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	30.06	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	191.12	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	9.8	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO ARAIVEL - 2**

Identificación del Pozo:	ARAIVEL - 2
Ubicación Tope, ft:	11150
Ubicación Base, ft:	11155
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.513
Pérdida Filtrado, ml/30min:	86
Requerimiento de Agua, gal/sk:	6.17
Grd Temp., °F/100 ft:	1.33
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	32	6 1/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2500
1,0	2650
2,0	3000



## DATOS DE SALIDA

### POZO ARAIVEL - 2

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	5	Espesor del Intervalo
H prom, ft	11152.5	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	9 1/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	4871.4	Presión Hidrostática
Pfrac psi	8871.4	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.795	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	8571.4	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	209.1	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	228.3	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2302	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	12.1082	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	24.8	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.545	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.455	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.403	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.242	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.455	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0646	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.3176	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	36.21	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	190.82	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	11.8	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO ARAIVEL - 3**

Identificación del Pozo:	ARAIVEL - 3
Ubicación Tope, ft:	11220
Ubicación Base, ft:	11223
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.513
Pérdida Filtrado, ml/30min:	88
Requerimiento de Agua, gal/sk:	6.17
Grd Temp., °F/100 ft:	1.33
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	32	6 1/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2200
1,0	2500
2,0	3000

## DATOS DE SALIDA

### POZO ARAIVEL - 3

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	3	Espesor del Intervalo
H prom, ft	11221.5	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	9 1/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	4901.6	Presión Hidrostática
Pfrac psi	8901.6	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.793	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	8601.6	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	219.4	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	229.3	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2282	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	7.2649	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	24.8	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.545	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.455	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.403	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.242	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.455	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0674	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.3176	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	22.29	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	190.82	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	7.3	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO ARAIVEL - 4**

Identificación del Pozo:	ARAIVEL - 4
Ubicación Tope, ft:	11100
Ubicación Base, ft:	11105
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.513
Pérdida Filtrado, ml/30min:	86
Requerimiento de Agua, gal/sk:	6.17
Grd Temp., °F/100 ft:	1.37
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	32	6 1/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2650
1,0	2750
2,0	3000

## DATOS DE SALIDA

### POZO ARAIVEL - 4

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	5	Espesor del Intervalo
H prom, ft	11102.5	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	9 1/2	Diámetro del hoyo
Phid, psi	4849.6	Presión Hidrostática
Pfrac psi	8849.6	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.797	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	8549.6	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	299.7	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	220.7	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2316	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	12.1082	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	24.8	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.545	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.455	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.403	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.242	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.455	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0646	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.3176	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	36.10	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	190.82	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	11.8	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO ORITUPANO - 1**

Identificación del Pozo:	ORITUP - 1
Ubicación Tope, ft:	6197
Ubicación Base, ft:	6203
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.148
Pérdida Filtrado, ml/30min:	110
Requerimiento de Agua, gal/sk:	4.96
Grd Temp., °F/100 ft:	1.05
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	5 1/2	15.5	4 3/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	600
1,0	1000
2,0	1500

## DATOS DE SALIDA

### POZO ORITUPANO - 1

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	6	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6200	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	7 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2708.2	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5208.2	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.840	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	4908.2	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	218.4	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	145.1	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.5033	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	12.1737	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.0	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.578	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.422	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.438	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.263	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.422	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.1023	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.1186	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	33.63	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	202.17	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	10.4	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO ORITUPANO - 2**

Identificación del Pozo:	ORITUP - 2
Ubicación Tope, ft:	6130
Ubicación Base, ft:	6134
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.148
Pérdida Filtrado, ml/30min:	106
Requerimiento de Agua, gal/sk:	4.97
Grd Temp., °F/100 ft:	1.05
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	5 1/2	15.5	4 3/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	750
1,0	1000
2,0	1500



## DATOS DE SALIDA

### POZO ORITUPANO - 2

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	4	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6132	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	7 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2678.5	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5178.5	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.844	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	4878.5	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	386.3	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	144.4	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.5066	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	8.1158	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.1	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.579	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.421	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.439	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.263	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.421	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0955	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.1120	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	21.65	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	202.57	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	6.7	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO ORITUPANO - 3**

Identificación del Pozo:	ORITUP - 3
Ubicación Tope, ft:	6212
Ubicación Base, ft:	6218
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.148
Pérdida Filtrado, ml/30min:	98
Requerimiento de Agua, gal/sk:	4.96
Grd Temp., °F/100 ft:	1.05
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	5 1/2	15.5	4 3/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	600
1,0	900
2,0	1500

## DATOS DE SALIDA

### POZO ORITUPANO - 3

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	6	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6215	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	7 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2714.7	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5214.7	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.839	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	4914.7	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	212.9	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	145.3	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.5025	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	12.1737	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.0	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.578	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.422	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.438	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.263	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.422	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0824	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.1186	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	30.21	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	202.2	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	9.3	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO ORITUPANO - 4**

Identificación del Pozo:	ORITUP - 4
Ubicación Tope, ft:	6154
Ubicación Base, ft:	6159
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.148
Pérdida Filtrado, ml/30min:	108
Requerimiento de Agua, gal/sk:	4.96
Grd Temp., °F/100 ft:	1.07
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	300
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	5 1/2	15.5	4 3/4
Tubing	2 7/8	6.5	2 1/2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	650
1,0	950
2,0	1500

## DATOS DE SALIDA

### POZO ORITUPANO - 4

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	5	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6156.5	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	7 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2689.2	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5189.2	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	0.843	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	4889.2	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	273.2	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	144.6	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.505	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	10.1447	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.0	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.578	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.422	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.438	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.263	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.422	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0988	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.1186	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	700	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	27.49	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	202.17	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	8.5	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO LEONA - 1**

Identificación del Pozo:	LEONA - 1
Ubicación Tope, ft:	6439
Ubicación Base, ft:	6444
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.149
Pérdida Filtrado, ml/30min:	38
Requerimiento de Agua, gal/sk:	3.37
Grd Temp., °F/100 ft:	1.73
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	3 1/2	9.3	3 1/8

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2700
1,0	2750
2,0	3000

## DATOS DE SALIDA

### POZO LEONA - 1

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	5	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6441.5	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2813.6	Presión Hidrostática
Pfrac psi	6813.6	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.058	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	6813.6	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	422.4	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	191.4	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2869	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	11.4537	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	20.63	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.3921	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.6079	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.260	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.156	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.608	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0133	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	3.1643	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	10.74	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	137.2	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	4.9	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO LEONA - 2**

Identificación del Pozo:	LEONA - 2
Ubicación Tope, ft:	6382
Ubicación Base, ft:	6388
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.149
Pérdida Filtrado, ml/30min:	36
Requerimiento de Agua, gal/sk:	3.36
Grd Temp., °F/100 ft:	1.73
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	3 1/2	9.3	3 1/8

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	1800
1,0	2400
2,0	3000



## DATOS DE SALIDA

## POZO LEONA - 2

## Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	6	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6385	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2789.0	Presión Hidrostática
Pfrac psi	6789.0	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.063	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	6789.0	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	95.5	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	190.5	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2899	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft2	13.7445	Area Permeable

## Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	20.6	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.391	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.609	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.2595	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.1557	Relac agua/cemento minima

## Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.609	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0119	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	3.1896	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft3/30min	12.06	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	136.83	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	5.5	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO LEONA - 3**

Identificación del Pozo:	LEONA - 3
Ubicación Tope, ft:	6412
Ubicación Base, ft:	6420
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.149
Pérdida Filtrado, ml/30min:	40
Requerimiento de Agua, gal/sk:	3.36
Grd Temp., °F/100 ft:	1.75
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	3 1/2	9.3	3 1/8

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2400
1,0	2700
2,0	3000

**DATOS DE SALIDA****POZO LEONA - 3****Condiciones del Pozo y de los Fluidos**

$\partial h$ , ft	8	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6416.0	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2802.5	Presión Hidrostática
Pfrac psi	6802.5	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.060	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	6802.5	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	142.45	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	191.0	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.2682	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	18.326	Area Permeable

**Condiciones de la Lechada**

Dcmto, lpg	20.6	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.391	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.609	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.2595	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.1557	Relac agua/cemento minima

**Caracterización del Proceso de Forzamiento**

F, adim	0.609	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0148	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	3.1896	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	18.01	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	136.8	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	8.2	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA****POZO LEONA - 4**

Identificación del Pozo:	LEONA - 4
Ubicación Tope, ft:	6395
Ubicación Base, ft:	6401
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.8
Rendimiento, pc/sk:	1.149
Pérdida Filtrado, ml/30min:	39
Requerimiento de Agua, gal/sk:	3.36
Grd Temp., °F/100 ft:	1.73
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	3 1/2	9.3	3 1/8

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	2500
1,0	2700
2,0	3000

## DATOS DE SALIDA

### POZO LEONA - 4

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	6	Espesor del Intervalo
H prom, ft	6389.0	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2794.6	Presión Hidrostática
Pfrac psi	6794.6	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.062	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	6794.6	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	223.69	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	190.7	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.289	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	13.7445	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	20.6	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.3909	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.6091	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.2595	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.1557	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.6091	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0140	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	3.1896	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	13.14	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	136.8	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	6.0	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO SAN TOMÉ - 1**

Identificación del Pozo:	S.TOMÉ - 1
Ubicación Tope, ft:	4846
Ubicación Base, ft:	4848
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.33
Densidad Lechada, lpg:	15.6
Rendimiento, pc/sk:	1.180
Pérdida Filtrado, ml/30min:	60
Requerimiento de Agua, gal/sk:	5.2
Grd Temp., °F/100 ft:	1.72
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	2 3/8	6.2	2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	1800
1,0	1900
2,0	2200

## DATOS DE SALIDA

### POZO SAN TOMÉ - 2

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	2	Espesor del Intervalo
H prom, ft	4847.0	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2099.5	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5299.5	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.093	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	5299.5	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	1082.22	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	163.4	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.3853	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	4.5815	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.04	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.5891	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.4109	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.4587	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.2752	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.4109	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0328	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.0558	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	10.08	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	206.2	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	3.0	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO SAN TOMÉ - 2**

Identificación del Pozo:	S.TOMÉ - 2
Ubicación Tope, ft:	4882
Ubicación Base, ft:	4884
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.6
Rendimiento, pc/sk:	1.180
Pérdida Filtrado, ml/30min:	64
Requerimiento de Agua, gal/sk:	5.2
Grd Temp., °F/100 ft:	1.72
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	2 3/8	6.2	2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	1450
1,0	1750
2,0	2250



## DATOS DE SALIDA

### POZO SAN TOMÉ - 2

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	2	Espesor del Intervalo
H prom, ft	4883.0	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2132.9	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5382.9	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.102	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	5382.9	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	552.13	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	163.99	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.3826	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	4.5815	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.04	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.5891	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.4109	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.4587	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.2752	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.4109	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0371	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.0558	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	10.75	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	206.2	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	3.2	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO SAN TOMÉ - 3**

Identificación del Pozo:	S.TOMÉ - 3
Ubicación Tope, ft:	4898
Ubicación Base, ft:	4901
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.4
Densidad Lechada, lpg:	15.6
Rendimiento, pc/sk:	1.180
Pérdida Filtrado, ml/30min:	62
Requerimiento de Agua, gal/sk:	5.1
Grd Temp., °F/100 ft:	1.72
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	2 3/8	6.2	2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	1600
1,0	1800
2,0	2200

## DATOS DE SALIDA

### POZO SAN TOMÉ - 3

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	3	Espesor del Intervalo
H prom, ft	4899.5	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2140.1	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5340.1	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.090	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	5340.1	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	484.96	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	164.3	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.3816	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	6.8722	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	25.56	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.578	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.422	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.448	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.268	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.422	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0349	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.1175	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	15.23	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	202.23	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	4.7	Volumen de Lechada Requerida

**DATOS DE ENTRADA**  
**POZO SAN TOMÉ - 4**

Identificación del Pozo:	S.TOMÉ - 4
Ubicación Tope, ft:	4912
Ubicación Base, ft:	4914
Densidad Fluido Complet, lpg:	8.33
Densidad Lechada, lpg:	15.6
Rendimiento, pc/sk:	1.180
Pérdida Filtrado, ml/30min:	60
Requerimiento de Agua, gal/sk:	5.2
Grd Temp., °F/100 ft:	1.72
Temperatura Ambiente, °F:	80
Factor de Seguridad, psi:	100
Tasa de Inyección, bbl/min:	0.5

Configuración del Pozo			
	OD, in	Peso, lb/ft	ID, in
Revestidor	7	23	6 1/4
Tubing	2 3/8	6.2	2

Prueba de Integridad	
Q, bbl/min	P, psi
0,5	1800
1,0	1900
2,0	2200

## DATOS DE SALIDA

### POZO SAN TOMÉ - 4

#### Condiciones del Pozo y de los Fluidos

$\partial h$ , ft	2	Espesor del Intervalo
H prom, ft	4913.0	Profundidad Promedio
Dhoyo, in	8 3/4	Diámetro del hoyo
Phid, psi	2126.1	Presión Hidrostática
Pfrac psi	5326.1	Presión de Fractura
Grd frac, psi/ft	1.084	Gradiente de Fractura
Pmax, psi	5326.1	Presión Máxima de Trabajo
K, mD	1069.4	Permeabilidad Formación
Tfondo, °F	164.5	Temperatura de Fondo
Visc, cP	0.3807	Viscosidad del Filtrado
A perm, ft <sup>2</sup>	4.5815	Area Permeable

#### Condiciones de la Lechada

Dcmto, lpg	26.04	Densidad del Cemento
F.V. agua, adim	0.5891	Fracción Volumen Agua
F.V. cmto, adim	0.4109	Fracción Volumen Cemento
F w/c	0.4587	Relación agua/cemento
F w/c minima	0.2752	Relac agua/cemento minima

#### Caracterización del Proceso de Forzamiento

F, adim	0.4109	Fracción Sólidos en Suspensión
Kpast, mD	0.0328	Permeabilidad Filtro Pastel
W, adim	1.0558	Constante de Deposición
$\partial P$ , psi	1000	Presión Diferencial Aplicada
Q, ft <sup>3</sup> /30min	10.14	Volumen Acumulado de Filtrado
P.F.Din, ml/30min	206.2	Pérdida Filtrado Dinámica
Vreq, bbl	3.1	Volumen de Lechada Requerida