



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“OPTIMIZACIÓN DE LA CEMENTACIÓN DE TUBERÍA DE
PRODUCCIÓN MEDIANTE EL USO DE UNA PÍLDORA DE
SILICATO”**

Trabajo de titulación presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: DANIEL ALEXANDER ESTRELLA HARO

TUTOR: DRA. JENNY MORENO

Riobamba–Ecuador

2015

©2015, Daniel Alexander Estrella Haro

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor

AGRADECIMIENTO

“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo dondequiera que vayas” Josué 1:9

Por su amor eterno con el cual me amó, le agradezco principalmente a Dios, a mis padres Segundo Estrella y María Haro por creer en mí y alentarme a seguir adelante. Estoy eternamente agradecido con el equipo de laboratorio Well Services por brindarme su apoyo incondicional y las herramientas necesarias para realizar este trabajo.

A la Dra. Jenny Moreno y al Ing. Marco Chuiza, que con su conocimiento y experiencia supieron guiarme en mi formación profesional y en el desarrollo del presente trabajo.

DEDICATORIA

Y todo lo que hagáis, hacedlo de corazón, como para el Señor y no para los hombres; sabiendo que del Señor recibiréis la recompensa de la herencia, porque a Cristo el Señor servís. Colosenses 3:23

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

El tribunal de tesis certifica que: el trabajo de investigación “OPTIMIZACIÓN DE LA CEMENTACIÓN DE UNA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN MEDIANTE EL USO DE UNA PÍLDORA DE SILICATO”, de responsabilidad del señor Daniel Alexander Estrella Haro ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

FIRMA

FECHA

Dra. Jenny Moreno
DIRECTOR DE TESIS

.....

.....

Ing. Marco Chuiza
TRIBUNAL DE TESIS

.....

.....

DOCUMENTALISTA
SISBIB ESPOCH

.....

.....

“Yo DANIEL ALEXANDER ESTRELLA HARO, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este proyecto de titulación, y el patrimonio intelectual del Proyecto de Titulación pertenece a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”

DANIEL ALEXANDER ESTRELLA HARO

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1 MARCO TEÓRICO	5
1.1 Cementación.....	5
1.1.1 Cementación primaria	5
1.1.2 Cementación Secundaria o Squeeze	8
1.1.3 Tuberías de Revestimiento	8
1.1.4 Evaluación del Trabajo de Cementación	11
1.1.5 Cemento	15
1.1.6 Principales Compuestos del Cemento y sus Funciones	19
1.1.7 Clasificación de los Cementos	25
1.1.8 Aditivos del Cemento	26
1.1.9 Pruebas de Laboratorio para cemento	28
1.1.10 Remoción de Lodo	31
1.1.11 Fluidos de Cementación.....	33
1.1.12 Píldora de Silicato	36
CAPÍTULO II	
2 PARTE EXPERIMENTAL	38
2.1 Localización	38
2.2 Metodología	38
2.3 Selección de muestra.....	38
2.4 Simulación del Proceso.....	39
2.4.1 Preparación de las Soluciones de Trabajo	39
2.4.2 Descripción del Procedimiento	41
2.4.3 Pruebas de Laboratorio.....	42

2.4.4	Métodos y Técnicas	43
2.5	Datos Experimentales	43
2.5.1	Datos de las placas	43
2.5.2	Datos de las soluciones de trabajo	44
2.5.3	Datos Adicionales	54
CAPÍTULO III		
3	Cálculos y Resultados	55
3.1	Cálculos	55
3.1.1	Cálculos del Peso de Cemento	55
3.1.2	Cálculo del Espesor de Cemento	57
3.2	Resultados	59
3.2.1	Resultados de Peso	59
3.2.2	Resultados de Espesor	63
3.3	Análisis y Discusión	67
3.4	Propuesta	74
CONCLUSIONES		75
RECOMENDACIONES		76
BIBLIOGRAFÍA		
ANEXOS		

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

<i>UCA</i>	<i>Analizador de cemento ultrasónico</i>
<i>atm</i>	<i>Atmósferas de presión</i>
<i>bbl</i>	<i>Barriles</i>
<i>Bc</i>	<i>Bearden de Consistencia</i>
<i>bpm</i>	<i>Barriles por minuto</i>
<i>CBL</i>	<i>Cement Bond Log - Registro de adherencia de cemento</i>
<i>OPC</i>	<i>Cemento Portland Ordinario</i>
<i>cP</i>	<i>Centipoise</i>
<i>CF</i>	<i>Controlador de filtrado</i>
<i>E</i>	<i>Espaciador</i>
<i>Ecemento</i>	<i>Espesor de cemento</i>
<i>deg</i>	<i>Grados</i>
<i>°C</i>	<i>Grados Celsius</i>
<i>°F</i>	<i>Grados Fahrenheit</i>
<i>CET</i>	<i>Herramienta de Evaluación de Cemento</i>
<i>API</i>	<i>Instituto Americano del Petróleo</i>
<i>L</i>	<i>Lead</i>
<i>ppg</i>	<i>Libras por galón (lbm/gal)</i>
<i>Psi</i>	<i>Libras por pulgada cuadrada</i>
<i>L</i>	<i>Litros</i>
<i>M</i>	<i>Mud – Lodo</i>
<i>Pcemento</i>	<i>Peso de cemento</i>
<i>ft</i>	<i>Pies</i>
<i>P</i>	<i>Píldora</i>
τ_y	<i>Punto de cedencia</i>
<i>in</i>	<i>Pulgadas</i>
<i>RP</i>	<i>Revoluciones por minuto</i>
<i>S</i>	<i>Scavenger</i>
<i>T</i>	<i>Tail</i>
<i>BHS</i>	<i>Temperatura de pozo circulante</i>
<i>VDL</i>	<i>Variable Density Log – Registro de densidad variable</i>
<i>W</i>	<i>Whaser – Lavador</i>

LISTA DE CUADROS

Tabla 1-1	Composición del cemento Portland.....	16
Tabla 2-1	Zonas del Horno	19
Tabla 3-1	Secuencia de la Reacción.....	24
Tabla 4-1	Clasificación de aditivos para el cemento.....	27
Tabla1-2	Composición del Espaciador.....	39
Tabla 2-2	Composición del Lavador.....	39
Tabla 3-2	Composición de la Píldora	40
Tabla 4-2	Composición del Scavenger.....	40
Tabla 5-2	Composición de la Lead.....	40
Tabla 6-2	Composición de la Tail.....	41
Tabla 7-2	Descripción de los Métodos y Técnicas	43
Tabla 8-2	Datos iniciales de las placas	43
Tabla 9-2	Densidad del Lodo	44
Tabla 10-2	Reología para el Lodo.....	44
Tabla 11-2	Densidad del Espaciador	44
Tabla 12-2	Reología para el Espaciador	45
Tabla 13-2	Densidad del Lavador	45
Tabla 14-2	Reología para Lavador.....	45
Tabla 15-2	Densidad del Scavenger	45
Tabla 16-2	Reología para el Scavenger.....	46
Tabla 17-2	Agua Libre Scavenger.....	46
Tabla 18-2	Tiempo de Bombeo Scavenger	46
Tabla 19-2	Densidad de Lead.....	47
Tabla 20-2	Reología para Lead.....	48
Tabla 21-2	Agua Libre Lead.....	48
Tabla 22-2	Tiempo de Bombeo Lead.....	48
Tabla 23-2	Pérdida de Filtrado Lead.....	48
Tabla 24-2	Densidad de la Tail	50
Tabla 25-2	Reología para la Tail	50
Tabla 26-2	Agua Libre Tail.....	50
Tabla 27-2	Tiempo de Bombeo Tail	50
Tabla 28-2	Pérdida de Filtrado Tail	50
Tabla 29-2	Compatibilidad Espaciador – Lodo.....	52
Tabla 30-2	Compatibilidad Scavenger – Lodo.....	52

Tabla 31-2	Compatibilidad Lead – Lodo.....	52
Tabla 32-2	Compatibilidad Lead – Espaciador.....	53
Tabla 33-2	Compatibilidad Píldora – Lodo	53
Tabla 34-2	Compatibilidad Espaciador – Píldora.....	53
Tabla 35-2	Compatibilidad Lavador – Píldora	54
Tabla 36-2	Condiciones de Pozo	54
Tabla 37-2	Orden de Bombeo en Pozo.....	54
Tabla 1-3	Peso de cemento con y sin píldora	55
Tabla 2-3	Peso de cemento a varias concentraciones	55
Tabla 3-3	Peso de cemento a varios tiempos de residencia.....	56
Tabla 4-3	Peso de cemento con modificación del tren	56
Tabla 5-3	Peso de cemento a varias densidades.....	56
Tabla 6-3	Peso de cemento con la influencia de CF	56
Tabla 7-3	Espesor de cemento con y sin píldora.....	57
Tabla 8-3	Espesor de cemento a varias concentraciones de píldora.....	57
Tabla 9-3	Espesor de cemento a varios tiempos de residencia.....	57
Tabla 10-3	Espesor de cemento con la modificación del tren	58
Tabla 11-3	Espesor de cemento a varias densidades.....	58
Tabla 12-3	Espesor de cemento con la influencia de CF	58
Tabla 13-3	Resultados de peso de cemento con y sin píldora	59
Tabla 14-3	Resultados de peso de cemento a varias concentraciones.....	59
Tabla 15-3	Resultados de peso de cemento a varios tiempos de residencia	60
Tabla 16-3	Resultados de peso de cemento con la modificación del tren	61
Tabla 17-3	Resultados de peso de cemento a varias densidades.....	61
Tabla 18-3	Resultados de peso de cemento con la influencia de CF	62
Tabla 19-3	Resultados de espesor de cemento con y sin píldora	63
Tabla 20-3	Resultados de espesor de cemento a varias concentraciones	63
Tabla 21-3	Resultados de espesor de cemento a varios tiempos de residencia	64
Tabla 22-3	Resultados de espesor de cemento con la modificación del tren	64
Tabla 23-3	Resultados de espesor de cemento a varias densidades.....	65
Tabla 24-3	Resultados de espesor de cemento con la influencia del CF	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1	Objetivos de una cementación primaria.....	6
Figura 2-1	Trabajo de cementación primaria	7
Figura 3-1	Programa de entubación habitual	9
Figura 4-1	Configuración de herramientas CBL-VDL.....	13
Figura 5-1	Trabajo de evaluación de cemento, señales CBL.....	14
Figura 6-1	Diagrama sistemático del proceso seco	17
Figura 7-1	Diagrama de flujo sistemático del proceso húmedo.....	17
Figura 8-1	Diagrama de flujo sistemático proceso de quema.....	18
Figura 9-1	Zonas del horno	18
Figura 10-1	Diagrama de flujo sistemático del proceso de molido y almacenamiento	19
Figura 11-1	Estructura del cristal de las fases del silicato.....	21
Figura 12-1	Fotografía escaneada de un microscopio electrónico de cristales de etringita	22
Figura 13-1	Rata de hidratación de las fases.....	23
Figura 14-1	Presentación sistemática de la hidratación del cemento.....	24
Figura 15-1	Modelo de la hidratación del cemento	25
Figura 16-1	Consistómetro	29
Figura 17-1	Uso de lavadores y espaciadores.....	36
Figura 1-2	Tiempo de Bombeo Scavenger	47
Figura 2-2	Tiempo de Bombeo Lead	49
Figura 3-2	Resistencia a la compresión Lead.....	49
Figura 4-2	Tiempo de Bombeo Tail.....	51
Figura 5-2	Resistencia a la Compresión Tail	51
Figura 1-3	Gráfica de pesos de la variación de la concentración	60
Figura 2-3	Gráfica de pesos con variación en tiempos de residencia	60
Figura 3-3	Gráfica del peso de cemento con modificación del tren.....	61
Figura 4-3	Grafica de peso de cemento con varias densidades.....	62
Figura 5-3	Grafica de peso de cemento con la influencia de CF.....	62
Figura 6-3	Gráfica de espesor de cemento con variación de concentración	63
Figura 7-3	Gráfica de espesor de cemento a varios tiempos de residencia	64
Figura 8-3	Gráfica de espesor de cemento con la modificación del tren	65
Figura 9-3	Gráfica de espesor de cemento a varias densidades	65
Figura 10-3	Gráfica de espesor de cemento con la influencia de CF	66

RESUMEN

Se optimizó la cementación de tubería de producción usando una píldora de silicato con el propósito de mejorar la adherencia del cemento a la tubería usada en pozos petroleros del oriente ecuatoriano. Se determinó las variables correspondientes al proceso de cementación, mediante ensayos de laboratorio se logró simular el proceso, utilizando todos los fluidos de cementación previamente acondicionados a temperatura de fondo de pozo, además se utilizó equipos como: balanza, estufa, bach y calibrador. Las variables que se determinaron fueron peso y espesor de cemento, en las cuales se fundamenta la optimización. Las técnicas de laboratorio tienen su base científica en las prácticas recomendadas para la cementación de pozos petroleros API 10B-2. Utilizando una concentración de 35% V/V de silicato de sodio en agua, un tiempo de 1 min de residencia de las placas de tubería en la píldora, a temperatura de 65,5°C, y sin el uso de la lechada scavenger, se obtiene una máxima adherencia de 8,25g de peso y 6,14mm de espesor de cemento, a diferencia de un sistema sin píldora con 2,83g de peso y 1,57mm de espesor de cemento adherido.

Se logró mejorar la adherencia del cemento a la tubería, reflejado en los registros finales de cementación. Se recomienda el uso de la píldora como un fluido de cementación bombeado previo al lavador, con las propiedades ya descritas anteriormente.

Palabras clave: <CEMENTACIÓN> <TUBERÍA DE PRODUCCIÓN> <PÍLDORA DE SILICATO> <FLUIDOS DE CEMENTACIÓN> <ADHERENCIA> <REGISTROS DE CEMENTACIÓN>

SUMMARY

Cementation of production pipeline was optimized using a silicate pill in order to improve the cement adhesion to the pipeline used in oil Wells in the Amazon Region. The variables corresponding to the cementation process were determinate, using laboratory tests were obtained to simulate the process, using all cementing fluids previously conditioned to down hole temperature, the equipment used were: balance, stove, batch and caliper gauge. The determined variables were weight and thickness of cement, on which optimization was based. Laboratory techniques have their scientific basis in the best cementation practices for the oil wells API (American Petroleum Institute) 10B-2. Using a concentration of 35% V/V of sodium silicate in water, 1 minute of residence time o pipeline plates in the pill, at 65°C, without the use of scavenger grout, gets a maximum adherence of 8,25g of weight and 6,14mm thickness cement, in contrast to a system without pill with 2,83g of weight and 1,57mm in thickness of bonding cement. It achieved to improve the adhesion cement to pipeline, reflected in the final cementation registers. This study recommended to use of silicate pill as a cementation fluids pumped previous to the washer, with properties already described.

Key words: <CEMENTATION> <PRODUCCION PIPELINE> <SILICATE PILL>
<CEMENTATION FLUIDS> <ADHESION> <CEMENTATION REGISTERS>

INTRODUCCIÓN

La cementación de pozos petroleros es una amalgama de mucha interdependencia científica y disciplinas ingenieriles incluyendo química, geología, física y petróleo, mecánica e ingeniería eléctrica. Cada uno es esencial en el logro de la meta primaria de la cementación durable en la zona de aislamiento. La falta de adherencia de cemento a la tubería, impide proporcionar un buen soporte y aislamiento zonal entre la tubería, el cemento y la formación. En el presente trabajo se va a optimizar la cementación de tubería de producción mediante el uso de una píldora de silicato, con la finalidad de mejorar la adherencia de cemento a la tubería.

En la actualidad Schlumberger-Well Services en sus operaciones de cementación usa un tren conformado por un espaciador, lavador y scavenger para remover el lodo ubicado en el fondo de la tubería, posteriormente las lechadas Lead (relleno) y Tail (principal) que se depositan en el espacio anular entre la tubería y la formación, mediante el siguiente trabajo se pretende bombear adicionalmente una píldora de silicato que mejore la adherencia del cemento a la tubería, asegurando un trabajo de calidad en el que no se requiera de operaciones remediales de cementación.

La simulación del proceso fue realizada a nivel de laboratorio mediante el método experimental, lográndose determinar la composición de la píldora e identificar y establecer las variables idóneas para este sistema, se usó equipos como: balanza, batch, calibrador y estufa. La simulación del proceso así como las pruebas para las lechadas de cemento están fundamentadas en las prácticas recomendadas API 10B e ISO 10426-2.

Esta optimización se fundamenta en el peso y espesor de cemento adherido a la tubería, como variables cuantitativas y se valida mediante los registros finales de cementación.

ANTECEDENTES

La industria del petróleo es la más grande y compleja de las industrias químicas de procesos y el impacto que tiene en la economía y en la vida nacional y mundial es enorme. Schlumberger es una compañía que se ha esforzado en desarrollar recursos con la finalidad de brindar soluciones que mejoran la productividad de los campos petroleros. Fue fundada en 1926 por los hermanos franceses Conrad y Marcel Schlumberger, actualmente suministra a la industria petrolera con servicios como la adquisición de sísmica y la elaboración, evaluación de la formación, pruebas de pozos y la perforación direccional, así como la cementación y estimulación artificial, y consultoría, software y la información de gestión.

Well Services, segmento que inicialmente nació como Dowell, aporta con los conocimientos, innovaciones tecnológicas y trabajo humano para llevar a cabo cementaciones y estimulaciones de calidad que asegure la productividad de los pozos petroleros. Generalmente una operación de cementación requiere de un diseño previo, tomando en consideración varios factores propios de pozo (tipo de campo, arenas que se van a perforar, temperaturas, presiones, profundidades, entre otros).

El laboratorio WS con sede en base Coca dedicado a la investigación e innovación, se encarga del diseño, evaluar el desempeño y las propiedades químicas de las lechadas, mediante la medición bajo ciertas condiciones de fondo de pozo, con el objetivo de predecir el comportamiento del cemento logrando un excelente soporte a la tubería y adherencia a las paredes de la formación, objetivo que se ha visto truncado en el transcurso del último año.

JUSTIFICACIÓN

Well Services es el segmento de Schlumberger que se caracteriza por ofrecer un trabajo de calidad, que cumpla con los estándares requeridos, asegurando una larga vida productiva del pozo; durante la campaña de construcción de pozos petroleros en el último año, se han registrado fallas en su proceso de cementación, el cual es de vital importancia, dado que la operación defectuosa trae drásticas consecuencias; tales como incremento de los costos en operaciones remediales como squeezees (cementación remedial), riesgos hacia el ambiente y la seguridad, e incluso podrían llegar hasta la pérdida del pozo. Algunas de las causas por las cuales la operación resulta deficiente están relacionadas con problemas de formación, condiciones de hoyo, fluidos de cementación y tipo de lechada, que provocan que el cemento no se coloque uniformemente alrededor de la tubería de revestimiento.

Mediante el análisis de los registros de cementación, identificamos que el problema principal es la falta de adherencia de cemento a la tubería. Considerando la estructura química, composición y además la capacidad de hidratar la tubería; la píldora de silicato desempeña la misma función de un fluido de cementación que desplaza al lodo de formación, pero incrementando notablemente la adherencia del cemento a la misma, asegurando una mayor eficiencia en el proceso de cementación. Por lo tanto, la aplicación de este tratamiento permitirá optimizar este proceso alcanzando un trabajo de calidad, que sea evidenciado en los registros de cementación.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Optimizar la cementación de tubería de producción usando una píldora de silicato.

Objetivos específicos:

- Evaluar cuantitativamente la eficiencia de adherencia de cemento a la tubería mediante el uso de una píldora de silicato.
- Determinar la influencia de la lechada y aditivos de lechada en el proceso de gelificación del cemento y la píldora.
- Validar la optimización del uso de la píldora de silicato.

CAPÍTULO I

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Cementación

Proceso que se fundamenta en mezclar cemento seco y aditivos químicos especiales con agua, para crear una lechada de cemento que se bombea al interior del pozo a través de una sarta de tuberías, también conocida como de revestimiento y ubicarlo en el espacio anular entre la formación y la tubería. Una vez fraguado el cemento y endurecido forma una barrera permanente e impermeable que tendrá muchos años de vida y servirá de gran importancia en la producción del pozo.

Existen dos tipos de cementación: cementación primaria y cementación secundaria o squeeze (cementación remedial).

1.1.1 *Cementación primaria*

Una cementación primaria es el proceso de colocar el cemento en el anillo entre la tubería de revestimiento (conocido como casing) y las formaciones expuestas al pozo. Desde su creación, el principal objetivo de cementación primaria siempre ha sido proporcionar aislamiento zonal en petróleo, gas y pozos de agua, es decir, para excluir los líquidos tales como agua o gas en una zona de petróleo en otra zona en el pozo. Para lograr este propósito, se debe crear un sello hidráulico entre la tubería de revestimiento y el cemento y el cemento y la formación, mientras que al mismo tiempo evitando los canales fluidos en la cubierta de cemento. (Fig. 1-1)

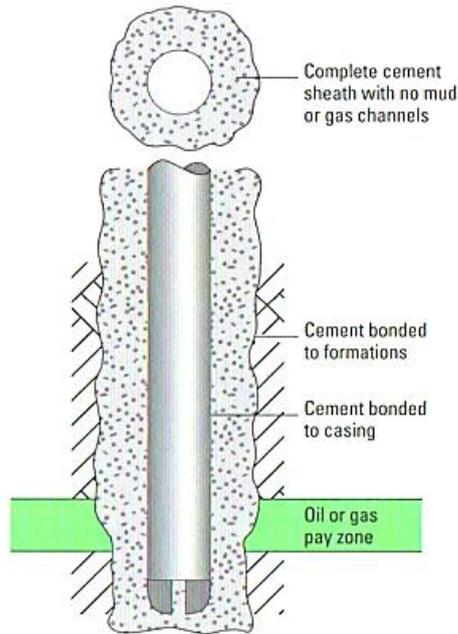


Figura 1-1 Objetivos de una cementación primaria

Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson and D. Guillot

Este requisito hace que la operación más importante realizada en un pozo sea la de cementación. Sin un aislamiento completo en el pozo, éste nunca puede alcanzar todo su potencial de producción. El proceso básico para el cumplimiento de un trabajo de cementación principal utiliza el método de conexión en dos tapones por un bombeo y el desplazamiento. Este método fue utilizado por primera vez en 1910 en pozos poco profundos de California. Después de que el pozo alcanza la profundidad deseada, se retira la tubería de perforación, y una cadena de mayor diámetro de tubería se introduce en el fondo del pozo. En este momento, el lodo de perforación aún está en el pozo. Este lodo debe ser eliminado y reemplazado con una lechada de cemento. El proceso más común para lograrlo, es el método de cementación de dos tapones. (Figura 2-1) Para evitar contaminación con el lodo, se usan dos tapones de aislamiento, mientras se bombea cemento hacia la tubería. La lechada de cemento debe ser suficiente para bombear en el interior de la tubería y llenar la columna anular desde el fondo hasta por lo menos la parte superior las zonas productivas.

El proceso de cemento está completo cuando un aumento de la presión en la superficie indica que el tapón superior ha alcanzado el aterrizaje collar o cuello flotador y desplazamiento de lodo. El pozo se cierra por un tiempo para permitir que el cemento fragüe antes del trabajo de la completación o para comenzar a perforar a un horizonte más profundo.

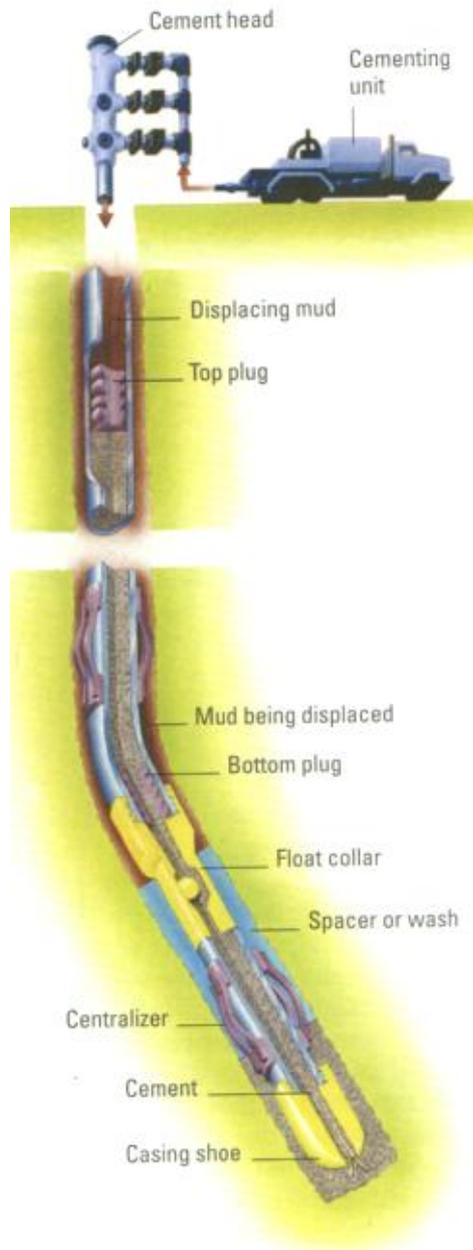


Figura 2-1 Trabajo de cementación primaria

Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson and D. Guillot

Entre las funciones principales de una cementación tenemos:

- Sustener la tubería de revestimiento, así que los centralizadores deben mantener la tubería correctamente centrada para que el cemento cubra en su totalidad a la tubería.
- Aislamiento a la formación, el cemento crea una barrera que evita que los fluidos de la formación migren hacia abajo o arriba del agujero y así se contaminen con fluidos extraños al pozo. (Asilamiento zonal)
- Prevención de corrosión, el cemento evita que la tubería de revestimiento tenga contacto con los fluidos de formación, previniendo así la corrosión.

- Proteger la tubería del choque de cargas cuando se perfora para ahondar un pozo.

La operación de cementación primaria tiene gran importancia en la vida del pozo, ya que los trabajos de una buena completación (trabajos que se efectúan para la obtención de hidrocarburos) dependen directamente de una buena cementación.

1.1.2 Cementación Secundaria o Squeeze

Es el proceso que se efectúa inyectando cemento a presión a través de perforaciones en la tubería de revestimiento al espacio anular. Este es un proceso forzado y se usa como disposición para corregir una cementación primaria defectuosa.

La cementación secundaria o también conocida como remedial, tiene varias aplicaciones entre las más comunes están:

- Reparar una cementación primaria fallida debido a canalización de lodo o una altura de cemento insuficiente en el espacio anular.
- Abandonar una zona no productiva.
- Eliminar la intrusión de agua proveniente de arriba, debajo o dentro de la zona productora de hidrocarburos.
- Reducir la relación gas petróleo de producción a través del aislamiento de la zona de gas del intervalo de petróleo adyacente.
- Reparar tuberías fracturadas debido a corrosión o fallas por ruptura.
- Sellar zonas de pérdida de circulación.
- Prevenir la migración vertical de los fluidos del reservorio dentro de las zonas productoras.

1.1.3 Tuberías de Revestimiento

Las tuberías de revestimiento son tuberías con un diseño especial que se introducen en el pozo perforado, que luego serán cementadas con el fin de proteger al hoyo y permitir el flujo de fluidos desde el fondo a la superficie y viceversa. También son conocidas como casing, revestidores y tubulares y cada una posee diámetro nominal, peso nominal, grado, resistencia a la tensión, resistencia al colapso y resistencia al entallamiento. Las propiedades de cada tubería están controladas por la composición química del acero utilizado.

Las funciones que cumplen son:

- Evitar derrumbes o depresiones
- Servir de conducto para los fluidos tanto de entrada como de salida del pozo.
- Dar soporte para la instalación del equipo superficial
- Prevenir el ensanchamiento del hoyo debido a la erosión
- Impedir la contaminación de los acuíferos
- Posibilitar la instalación del equipo de terminación

Este tipo de tuberías son fabricadas con la más alta tecnología, bajo estrictos controles de seguridad y con acero de la mejor calidad. Obtenidas por fusión en horno y soldadas eléctricamente.

Se han creado especificaciones y parámetros por el API, para las tuberías de revestimiento, aceptados internacionalmente por la industria petrolera. Éstas incluyen las características físicas, propiedades de resistencia y procedimientos de pruebas para la evaluación de la calidad con el objetivo de minimizar posibles fallas.

Se clasifican de la siguiente manera:

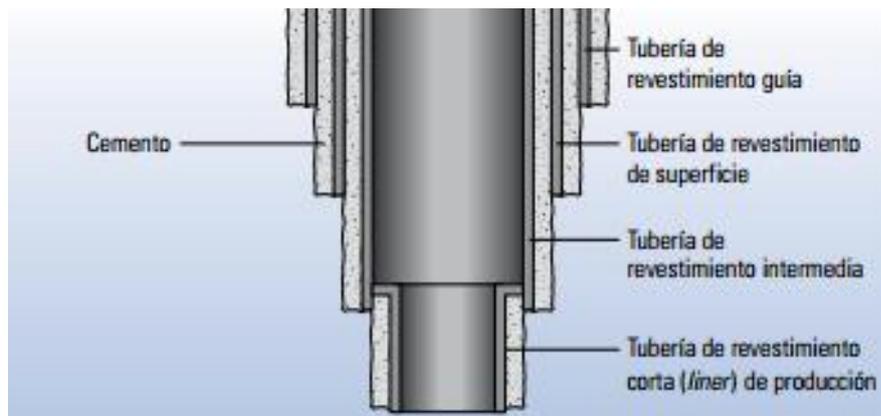


Figura 3-1 Programa de entubación habitual

Fuente: Oilfield Review. Fundamentos de la cementación pozos. Erik B.Nelson.

1.1.3.1 Tubería de Conductora

Generalmente es la primera tubería que se cementa al iniciar el proceso de perforación. Su objetivo es proteger las formaciones superficiales de ser contaminadas por los fluidos de perforación y evitar lavados que fácilmente pueden ocurrir cerca de la superficie en capas no consolidadas y sedimentos.

El diámetro que generalmente posee este tipo de tubería varía entre 24 a 30 pulgadas, y alcanza profundidades no mayores a 300 pies (91m).

1.1.3.2 Tubería Superficial

La segunda sarta de tubería, la cual sirve para formaciones relativamente poco profundas no consolidadas y acuíferos, se conoce como tubería superficial. Además de mantener la integridad del agujero, la tubería superficial previene la contaminación del agua subterránea fresca por perforación fluidos, salmueras subterráneas, petróleo o gas.

Los diámetros usados varían entre 7 y 26 pulgadas, alcanzando profundidades de 12550 pies (3,885 m).

1.1.3.3 Tubería Intermedia

La tubería intermedia aísla zonas de hidrocarburo, presiones anormales, fracturado y zonas de pérdida de circulación, como también un problema lutitas y horizontes geológicos similares.

Una o varias tuberías intermedias generalmente se emplean para aislar zonas débiles que pueden fracturar y causar pérdida por circulación en presencia de lodo de alta densidad.

A veces la sarta intermedia sella la mayor parte de zonas productoras, permitiendo al operador a profundizar la perforación.

Protege el agujero de secciones desviadas, particularmente a través de formaciones inestables.

1.1.3.4 Tubería de Producción

La tubería de producción o producción liner es el último elemento tubular en el pozo. Se aísla de las diferentes zonas por encima y dentro de la zona de producción y soporta todas las cargas anticipadas durante las pruebas de operaciones y producción a lo largo de la vida de pozos. Cualquier tubería que crea un espacio anular con el tubo de producción es tratada como una tubería de producción o liner. Las funciones que esta tubería desempeña son: cubrir la sarta de tubería intermedia desgastada o dañada, instalación de rejillas para arena, terminación con zonas múltiples, entre otras. La cementación de esta tubería utiliza lechadas de cemento con aditivos específicos adecuados para las condiciones de altas temperaturas y presiones. Las lechadas de cemento deben contener cantidades adecuadas de controlador por pérdida de fluido para minimizar las cantidades de fluido perdido hacia las zonas. Buenos controladores por pérdida de filtrado minimizan daños en la matriz crítica del pozo y evita la prematura deshidratación de la lechada en el anillo anular.

Los diámetros usados para este tipo de tubería pueden ser de 4 a 7 pulgadas, siendo la más usada la de 7 pulgadas.

1.1.4 Evaluación del Trabajo de Cementación

Después de ejecutar una operación de cementación y luego de fraguar el cemento, se efectúan pruebas para confirmar que el desempeño e integridad del cemento satisfacen los criterios del diseño previsto. Las técnicas de evaluación del cemento son: pruebas hidráulicas y registros de pozos.

Las pruebas de presión constituyen el método de prueba hidráulica más común usado, se efectúa luego de cada operación de cementación de la tubería de revestimiento de superficie o intermedia este tipo de prueba. Primero, realizan una prueba de presión de la tubería de revestimiento para verificar la integridad mecánica de la sarta de tuberías e inmediatamente remueven el cemento residual de la zapata de la tubería. Posteriormente, se lleva a cabo una prueba de integridad de presión mediante el incremento de la presión interna de la tubería de revestimiento hasta que excede la presión que será aplicada durante la fase de perforación siguiente. Si no se detecta pérdida alguna. El sello del cemento se considera exitoso.

Para valorar la calidad del cemento detrás del casing se pueden seleccionar una de las diversas técnicas de adquisición de registros de pozos. El equipo de adquisición de registros baja los dispositivos de medición en el pozo y representa gráficamente los datos recibidos versus la profundidad.

Los registros de temperatura ayudan a localizar el tope de la columna de cemento en el espacio anular. Debido a que la hidratación del cemento es un proceso exotérmico la temperatura se eleva en el medio circundante. Los datos adquiridos con las herramientas de adquisición de registros acústicos y ultrasónicos sirven para analizar las interfaces entre el cemento y el casing y entre el cemento y la formación. Estos equipos proporcionan información sobre la calidad de la cementación y acerca de cuán bien se adhiere, o liga, el cemento a la tubería y a la formación.

El registro de adherencia del cemento exhibe la amplitud reflejada de una señal acústica transmitida por una herramienta de adquisición de registro que se localiza en el interior de la tubería de revestimiento. La integridad de la adherencia entre el cemento y la tubería de revestimiento es directamente proporcional a la atenuación de la señal reflejada. Otro registro acústico enseña las formas de ondas de las señales reflejadas, detectadas por el receptor de las herramientas de adquisición de registros y proporciona conocimientos cualitativos sobre la tubería de revestimiento, la cementación y la formación.

1.1.4.1 CBL y VDL

Los principales criterios que un cliente usa y entiende para evaluar el desempeño de una operación de cementación para una zona de producción, se encuentra en los resultados de los registros de cementación (CBL y VDL).

El registro CBL (Cement Bond Log – registro de adherencia de cemento) y VDL (Variable Density Log – registro de densidad variable) sirve para determinar si una zona potencialmente productiva que esta hidráulicamente aislada de otras zonas no deseables; permite la verificación de la integridad del cemento en el espacio anular, estudiando la adherencia a la tubería y a las paredes del pozo. La evaluación de la calidad del cemento comprende tres fases:

- Evaluación de la calidad del cemento a la tubería
- Evaluación de la calidad del cemento a la formación y
- Evaluación de la extensión vertical de buena calidad de adherencia

Los registros CBL y VDL se fundamentan en que la energía acústica es energía mecánica. Estas ondas de sonido llevan suficiente energía a través de los diferentes medios que atraviesa a medida que se alejan de su origen. En la toma de registros un transmisor como fuente de energía y un receptor localizado a cierta distancia de la fuente detecta la onda de sonido y transforma su energía en impulsos eléctricos. Un transmisor omnidireccional, emite periódicamente una onda acústica de aproximadamente de 20 KHz hacia la formación, a través del fluido dentro del casing (tubería de revestimiento) y la pared del revestimiento.

La herramienta que se introduce y corre en el interior del pozo (Figura 4-1), mide la amplitud de las ondas para el registro CBL, que nos indica que una baja amplitud será signo de una buena adherencia y por lo contrario, una alta amplitud de onda nos muestra una mala adherencia. En cambio, el registro VDL mide el tiempo de tránsito de la onda, es decir el primer arribo positivo en microsegundos captado por el receptor.

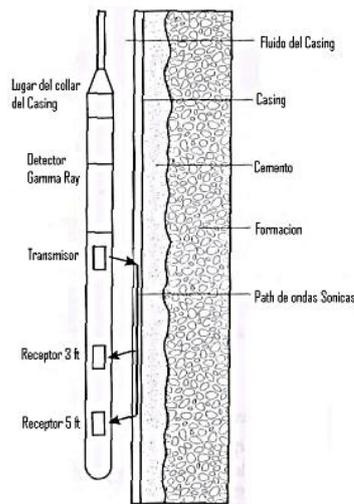


Figura 4-1 Configuración de herramientas CBL-VDL
 Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson

El tiempo de tránsito y la amplitud de la señal son usadas para demostrar la calidad de la mezcla del cemento. Debido a que la velocidad del sonido es mayor dentro de la tubería de revestimiento que en la formación o el lodo, las primeras señales en retornar son las que provienen de la tubería de revestimiento. Si la amplitud de la primera señal es grande, esto indica que la tubería está libre (mezcla pobre). Cuando el cemento está firmemente unido a la tubería de revestimiento y a la formación la señal es atenuada (debilitada) y es particular de la formación detrás de la tubería de revestimiento. La señal también puede indicar en donde el cemento está unido a la tubería de revestimiento pero no a la formación. El efecto de canalización también puede ser detectado.

Usualmente el CBL da una curva de amplitud mientras que el Registro de Densidad Variable (VDL), indica la fuerza de las señales por medio de la intensidad de las líneas oscuras y claras. Las señales de la tubería de revestimiento aparecen como líneas paralelas. Una buena mezcla es representada por líneas onduladas. No hay una escala estándar de API para medir la efectividad del CBL y muchos factores pueden resultar en malas interpretaciones como por ejemplo:

- Mientras se da el proceso de instalación, la velocidad y amplitud de las señales varía significativamente. Es recomendable no correr el CBL hasta 24-36 horas después del trabajo de cementación, para obtener resultados reales.
- La composición del cemento afecta la transmisión de la señal.
- El espesor del cemento causara cambios en la atenuación de la señal.

Una de las limitaciones del CBL es que solo da una vista dimensional, cuando la mezcla del cemento está a una profundidad aceptada. Un instrumento alternativo que

puede ser corrido es la Herramienta de Evaluación de Cemento (CET) que maneja transductores ultrasónicos y los principios de una resonancia de espesor de la tubería de revestimiento para dar una imagen radial completa de la mezcla de cemento que se encuentra alrededor de la tubería de revestimiento. Esto es extremadamente ventajoso para saber si hay un canal presente y en pozos direccionales, la orientación exacta de este canal.

La valoración de la calidad de adherencia del cemento a la tubería, está acompañada por el análisis de las características del viaje del sonido a través de la tubería. La magnitud del sonido que retorna al receptor depende de algunos factores como:

- La magnitud del pulso original del sonido.
- El diámetro interno de la tubería.
- El tipo de fluido en el pozo.
- El espesor de las paredes del revestimiento.
- La cantidad de cemento adherido al revestimiento.
- El esfuerzo compresivo del cemento adherido a la tubería.

La medida del CBL, en donde el transmisor genera un pulso de sonido el cual viaja por diferentes ambientes del pozo hasta alcanzar el receptor, los tres medios más comunes por los cuales viajan los pulsos de sonido son: la tubería de revestimiento o liner, la formación y el fluido del pozo. El orden más común de los arribos son: (1) la señal del revestimiento, (2) la señal de la formación y (3) la señal del fluido (Figura 5-1). El orden de los arribos depende de la velocidad de la formación, tamaño del hueco y tamaño del revestimiento.

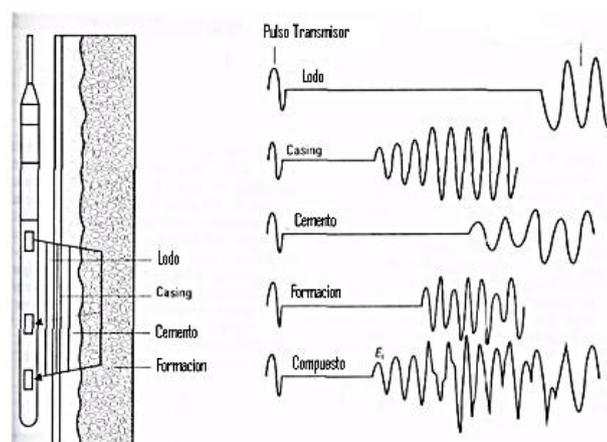


Figura 5-1 Trabajo de evaluación de cemento, señales CBL
Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson

El primer punto de análisis es la curva de amplitud de rayos gamma en la CBI y los criterios más simples que evaluaron como exitosa o no, es la posibilidad de mantenerlo en una gama baja generalmente de 0 a 10 milivoltios.

1.1.5 **Cemento**

El primer tipo de cemento usado en un pozo petrolero fue el llamado cemento portland ordinario (OPC), y hoy en día es el más importante y más usado para la cementación de pozos de petróleo; de hecho, es posiblemente el más abundante material fabricado. Las condiciones a las que cementos portland se exponen en un pozo difieren significativamente de los encontrados en las condiciones ambientales durante las operaciones de construcción; como resultado, cementos portland son fabricados para el uso especial en pozos.

El cemento portland desarrolla resistencia a la compresión como resultado de la hidratación, que implican reacciones químicas entre el agua y los compuestos presentes en el cemento. Propiedad exclusiva de los cementos hidráulicos. El ajuste y endurecimiento se producen no sólo si la mezcla de cemento y agua se deja reposar en el aire, sino también si se coloca bajo el agua. El desarrollo de resistencia es relativamente rápido, uniforme y predecible.

El cemento conjunto también tiene baja permeabilidad y es casi insoluble en agua; por lo tanto, la exposición al agua no destruye el material endurecido. Estos atributos son esenciales para lograr y mantener el aislamiento zonal.

1.1.5.1 **Notación química**

Existe una notación química especial establecida por los químicos del cemento. Las fórmulas químicas de muchos compuestos de cemento se pueden expresar como una suma de óxidos; por ejemplo, silicato tricálcico, Ca_3SiO_5 , puede ser escrita como $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Las abreviaturas se dan para los óxidos más frecuentemente encontrados, tales como C por CaO (cal), S para SiO_2 (sílice) y A para Al_2O_3 (alúmina). Ca_3SiO_5 se convierte así en CIS. Abajo se presenta una lista de abreviaturas.

C = CaO

F = Fe_2O_3

N = Na_2O

P = P_2O_5

A = Al_2O_3

Mg = MgO

K = K_2O

$\text{K}_2\text{O} = \text{FeO}$

S = SiO_2

H = H_2O

L = Li_2O

T = TiO_2

Otros son comúnmente usados, tales como $S = \text{SO}_3$ y $C = \text{CO}_3$. Esta notación ha sido adoptada como un método simple para describir compuestos cuyas fórmulas moleculares ocupan mucho espacio.

1.1.5.2 *Fabricación de cemento Portland*

Cemento portland es producido por la pulverización de clinker. Clinker es el material calcinado (quemado) que sale del horno rotatorio en una fábrica de cemento. El clinker consiste principalmente de silicatos de calcio hidráulicos, aluminatos de calcio, calcio aluminoferrites. Para obtener el producto terminado uno o más formas de sulfato de calcio (generalmente yeso, CSH_2) son entregados con el clinker.

Los materiales utilizados en la fabricación de clinker de cemento portland deben contener cantidades adecuadas de calcio, sílice, alúmina y compuestos de hierro. Durante el proceso de su fabricación, se hacen frecuentes análisis químicos de todos los materiales para garantizar la uniformidad y alta calidad del producto terminado.

1.1.5.3 *Las materias primas*

Existen dos tipos de materias primas que son necesarias para preparar una mezcla de clinker de cemento portland: materiales calcáreos, que contienen cal y materiales arcillosos, contienen alúmina, sílice y óxido de hierro.

Los materiales calcáreos más importantes son calizas sedimentarias y metamórficas, depósitos de conchas, coral, y “cemento roca” que naturalmente tiene una composición similar al cemento portland. También es común el empleo de materiales calcáreos artificiales que incluyen el carbonato de calcio precipitado y otros desechos de diversos procesos industriales.

Los materiales arcillosos naturales utilizados como materias primas incluyen arcillas, cenizas volcánicas, lutitas, margas, lodolitas y sedimentos aluviales.

Tabla 1-1 Composición del cemento Portland

Compuesto	Porcentaje
CaO	60-70%
SiO ₂	18-22%
Al ₂ O ₃	4-6%
Fe ₂ O ₃	2-4%

Fuente: Portland Cement Association, 2002

En cementos especiales, el contenido de C_3A y C_4AF pueden diferir significativamente los óxidos principales componen aproximadamente el 93%.

Los materiales crudos primero se muelen y luego se mezclan vigorosamente para obtener una mezcla homogénea en las proporciones requeridas, para lograrlo existen dos procesos, seco y húmedo.

1.1.5.4 Proceso Seco

El proceso es sencillo, inicialmente a las materias primas se las prepara para luego pasarlas a un molino que homogeniza el tamaño de las partículas y su cantidad. Posteriormente se pasa por un separador de aire y se lleva a silos mezcladores que sirven como almacenaje antes de pasarse al horno rotatorio.

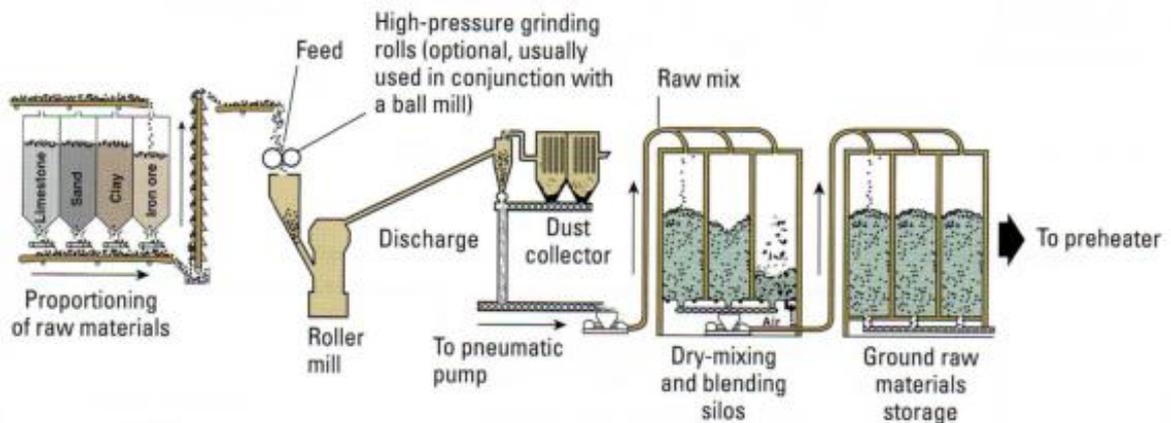


Figura 6-1 Diagrama sistemático del proceso seco

Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson and D. Guillot

1.1.5.5 Proceso Húmedo

Este proceso se diferencia del anterior ya que se efectúa la mezcla de las materias primas con agua para mantener de forma homogénea la mezcla. También pasa por un molino para igualar el tamaño de la partícula y, luego se pasa a unos contenedores que mantienen en movimiento continuo a la mezcla antes de pasarla al horno rotatorio.

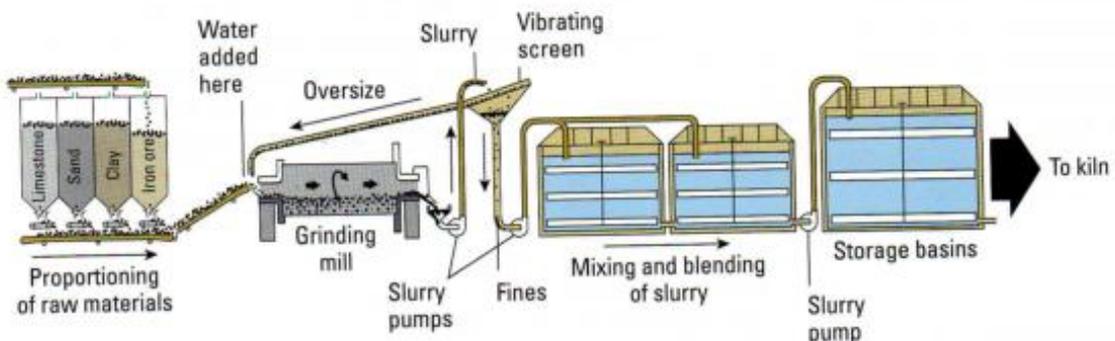


Figura 7-1 Diagrama de flujo sistemático del proceso húmedo

Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson and D. Guillot

Esta mezcla de materia cruda seca o húmeda, según el proceso de abrasión, se introduce en la parte más alta del horno rotatorio inclinado, a un gasto uniforme, y viaja lentamente por gravedad a la parte inferior del mismo.

El horno se calienta con gas a temperaturas de 1430 a 1540 °C (aproximadamente la mitad de la temperatura del sol), estas temperatura originan reacciones químicas entre los ingredientes de la mezcla cruda, resultando un material llamado clinker.

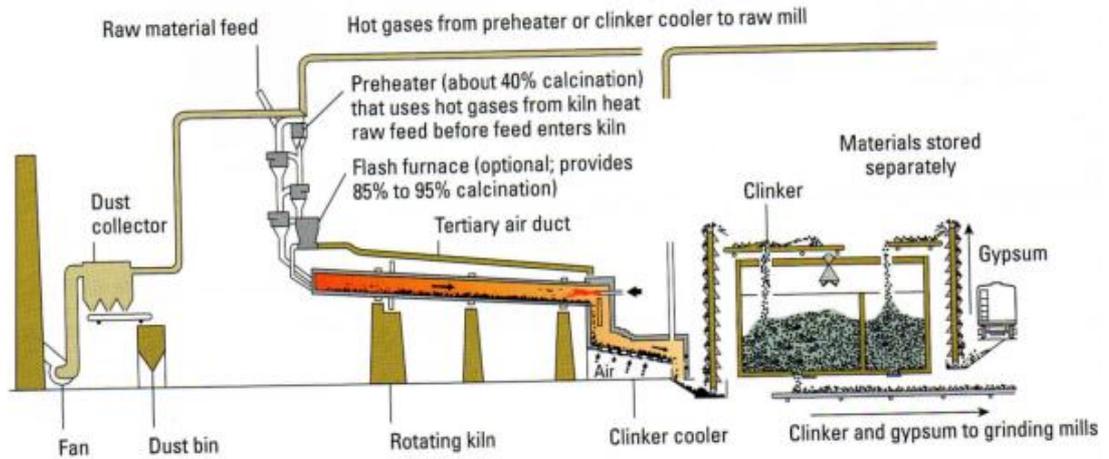


Figura 8-1 Diagrama de flujo sistemático proceso de quema

Fuente: Well Cementing. Erik B. Nelson and D. Guillot

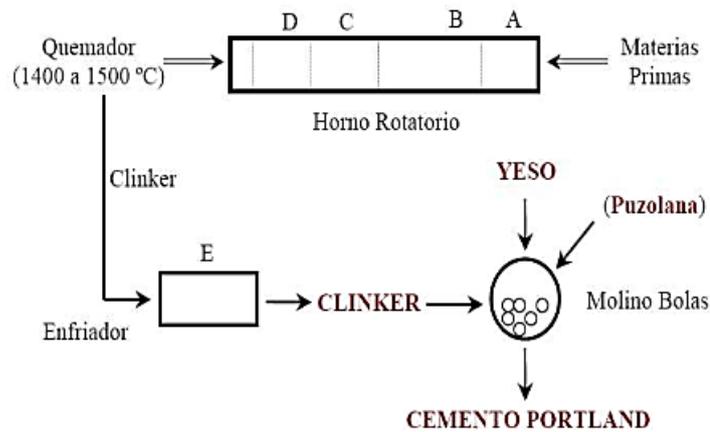


Figura 9-1 Zonas del horno

Fuente: Componentes del Cemento, C. Videla, 1982

El clinker se enfría a temperatura ambiente con corriente de aire, controlando la velocidad de enfriamiento. Una vez frío, se almacena y se muele posteriormente en molinos de bola de acero, para darle el tamaño deseado a las partículas.

El clinker se alimenta al molino de cemento simultáneamente con cierta cantidad de sulfato de calcio dihidratado, con lo que se obtiene el producto terminado de cemento Portland.

Tabla 2-1 Zonas del Horno

ZONAS DEL HORNO		
Zona	Rango Temp	Perfil de Reacción
A	Sube hasta 200	Secado, se elimina agua
B	200-800	Descarbonatación, se libera CO ₂ : CaCO ₃ → CaO + CaO ₂
C	800-1100	Se forma C ₂ S, C ₃ A, C ₄ AF
D	1100-1300	Clinkerización o fusión parcial, se forma C ₃ S: C ₂ S + C → C ₃ S
E	1300-1000	Si enfriamiento es lento, se revierte formación de C ₃ S y se forma cal libre

Fuente: Componentes del cemento, C. Videla, 1982

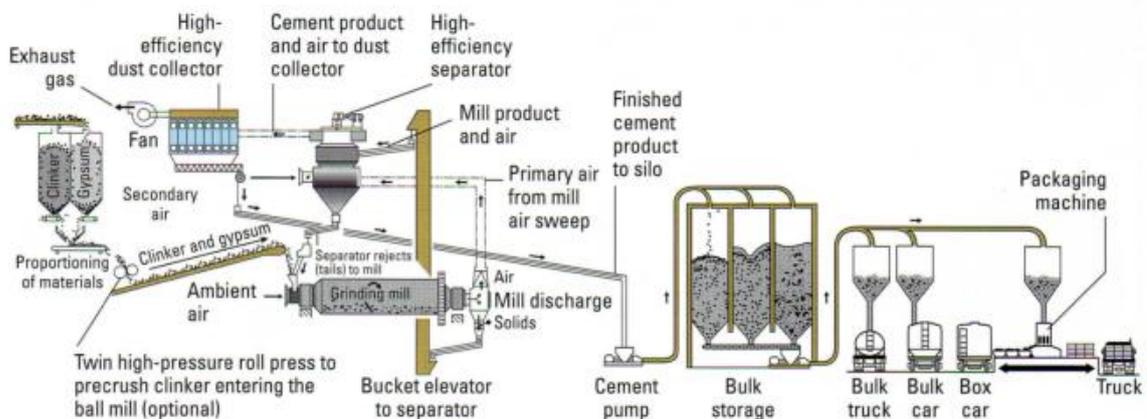


Figura 10-1 Diagrama de flujo sistemático del proceso de molido y almacenamiento

Fuente: Portland Cement Association, 2002

1.1.6 Principales Compuestos del Cemento y sus Funciones

Las reacciones de carbonatos y arcillas producidas por la manufactura del cemento Portland, conduce a la formación de 4 principales productos, que incluyen cuatro distintas fases cristalinas:

1.1.6.1 Silicato Tricálcico (3CaO•SiO₂)

Regularmente conocido como C₃S es el componente más abundante en la totalidad de los cementos y, también es el factor principal para producir la resistencia temprana o inmediata (1 a 28 días). El C₃S es el responsable de reaccionar rápido con el agua, liberando calor y formando silicato de calcio hidratado (CSH).

En general, los cementos de alta consistencia inmediata contienen en mayor concentración este compuesto.

1.1.6.2 Silicato Dicálcico ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

También conocido como C_2S , a diferencia del C_3S , este es un compuesto de hidratación lenta para formar el mismo tipo de compuestos (CSH), proporcionando una ganancia gradual de resistencia; esto ocurre en un periodo largo: mayor a 28 días.

1.1.6.3 Aluminato Tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)

Su principal función es influir en el tiempo de bombeabilidad de las lechadas, posee una susceptibilidad moderada al ataque químico de los sulfatos sobre el cemento. Tiene un mecanismo de reacción muy rápido liberando mucho calor al hidratarse. Contribuye a resistencia a muy temprana edad, pero poco a la resistencia final.

A este compuesto también conocido como C_3A , se le añade óxido férrico (transformándolo en C_4AF) para limitar el contenido de este compuesto en los cementos resistentes a sulfatos.

1.1.6.4 Aluminoferrita Tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)

También conocido como C_4AF , es específico para influir en la reología del cemento, formación de geles, y durabilidad, reaccionando rápido con el agua pero no produciendo mucho calor de hidratación y resistencia a la compresión.

La hidratación del cemento es un proceso exotérmico, y cada uno de los componentes del cemento tiene un calor característico de hidratación que contribuye al calor total de hidratación liberado. La cantidad total del calor de hidratación depende de las cantidades respectivas de cada uno de los constituyentes en el cemento. Aquel cemento que contiene alta proporción de fases de aluminato y ferrita generará una gran cantidad de calor de hidratación.

1.1.6.5 Hidratación de las Fases del Clinker

Los compuestos presentes en el cemento Portland son anhídros, cuando se ponen en contacto con el agua, ellos se unen o descomponen conformando compuestos hidratados. Se forman soluciones súper saturadas inestables, depositándose gradualmente los excesos de sólidos.

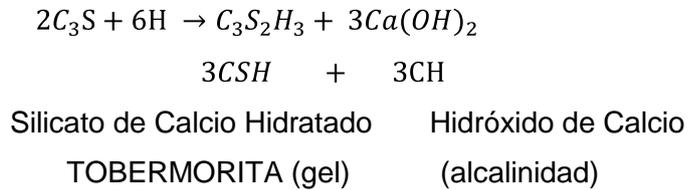
Los componentes principales del cemento portland (C_2S , C_3S , C_3A , C_4AF), presentan diferentes cinéticas de hidratación para diferentes productos de hidratación.

1.1.6.6 Hidratación de las Fases del Silicato

Los silicatos del cemento Portland son los más abundantes, cerca del 70% del total del material. La cantidad de C_2S normalmente no excede el 20%.

La ecuación química idealizada se muestra a continuación, los productos de la hidratación de las dos fases son hidróxido de calcio (conocido como portlantina) y silicato de calcio hidratado.

Para C_3S



Para C_2S

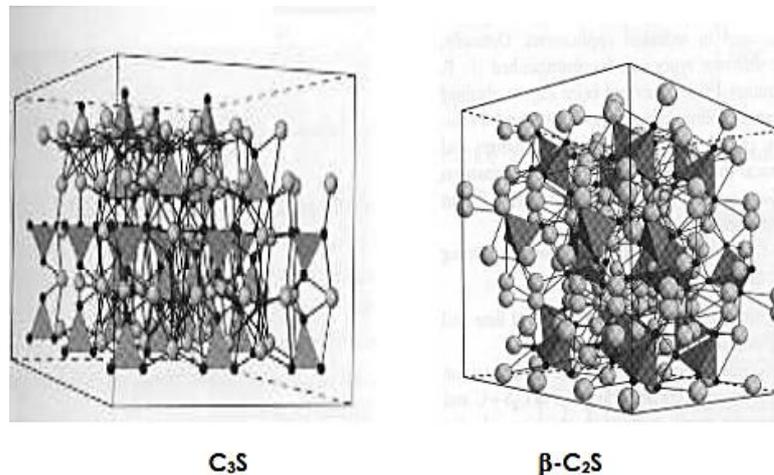
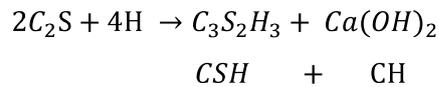


Figura 11-1 Estructura del cristal de las fases del silicato

Fuente: Componentes del Cemento, C. Videla, 1982

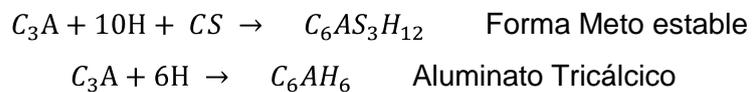
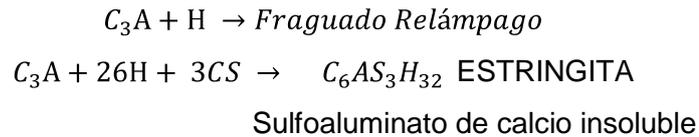
1.1.6.7 Hidratación de las Fases del Aluminato

Las fases aluminato especialmente el C_3A , son las más reactivas en tiempos de hidratación cortos. Sin embargo su abundancia es menor que los silicatos, tienen una influencia grande sobre la reología de la lechada de cemento, y en el desarrollo de resistencia temprana. La primera etapa de la hidratación del C_3A es igual a la del C_3S , es una reacción interfacial entre la superficie del anhidro sólido y el agua. La solución inmediatamente empieza a súper saturarse respecto a algunos aluminatos de calcio hidratados, precediendo a su precipitación.

El aluminato de calcio hidratado es meta estable, y surge como cristales hexagonales que eventualmente se convierten en una forma cubica más estable, esta reacción ocurre dentro de varios días.

El calcio y los iones sulfato sueltos en la solución reaccionan con el aluminato y los iones hidróxido sueltos por el C₃A para formar trisulfoaluminato hidratado, conocido como mineral de etringita.

Para C₃A



La etringita precipita en la superficie del C₃A, como cristales en forma de agujas (véase en la Figura 12-1). De manera diferente al silicato de calcio hidratado, el aluminato de calcio no es amorfo, y no forma una capa protectora en la superficie C₃A.

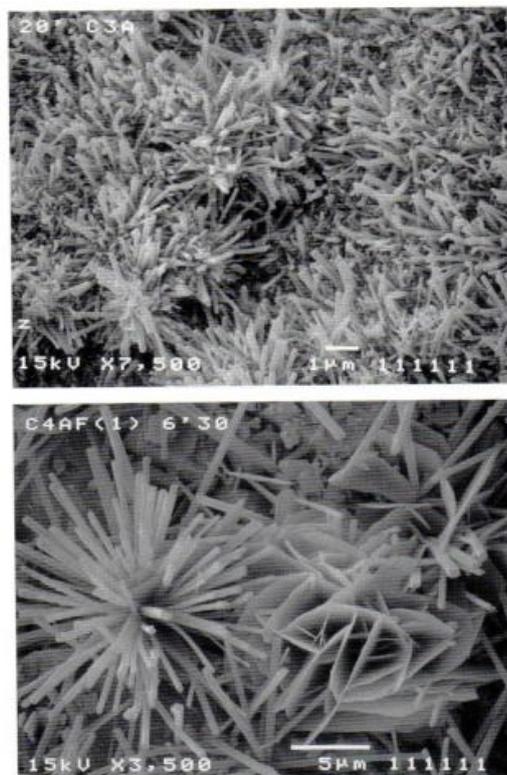


Figura 12-1 Fotografía escaneada de un microscopio electrónico de cristales de etringita

Fuente: Well cementing, Erik B. Nelson and D. Guillot, 2006.

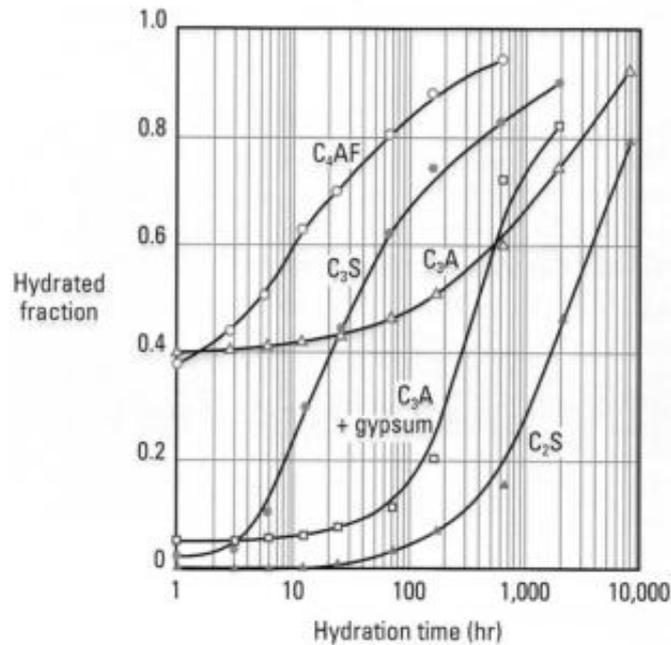
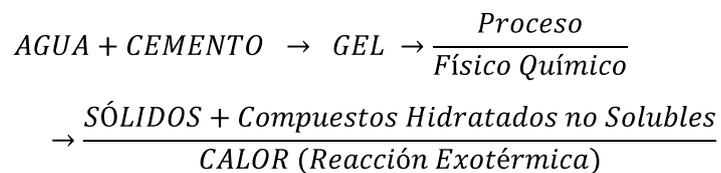


Figura 13-1 Rata de hidratación de las fases

Fuente: Well cementing, Erik B. Nelson and D. Guilloit, 2006.

1.1.6.8 Hidratación del cemento Portland – Sistema multicomponente



La hidratación del cemento Portland como se puede ver en la Tabla 3-1 y Figura 14-1 es una cadena de reacciones químicas entre los componentes del clinker, sulfato de calcio y el agua. A menudo la hidratación del C_3S es empleada como un modelo de la hidratación del cemento portland, se debe tener presente que involucra muchos otros parámetros.

Las varias reacciones dadas en la hidratación del cemento Portland, ocurren simultáneamente a diferentes velocidades y cada fase es influenciada por la otra. Por ejemplo, la hidratación del C_3A es alterada por la presencia de C_3S hidratado. Es por esto que a nivel químico, se considera como un proceso complejo de disolución/precipitación.

El sulfato de calcio $CaSO_4$, y los óxidos de magnesio MgO , sodio Na_2O , potasio K_2O y otros óxidos e impurezas componen el cemento en cantidades variables, dependiendo de la composición de los materiales crudos, los cuales alteran su reactividad.

Tabla 3-1 Secuencia de la Reacción

ETAPA	REACCIÓN QUÍMICA	CINÉTICA	PROPIEDAD DE LA LECHADA
Pre-inducción	Se humedece la superficie, se diluyen los iones y se producen productos tempranos de hidratación.	Rápida	Determina la capacidad de mezclado
Período de Inducción	Continúa la disolución de iones	Muy lenta	Determina el tiempo de fraguado
Aceleración	Luego de la disolución de iones se forman los productos de hidratación	Rápida	Determina las propiedades de fraguado y la resistencia a la compresión inicial
Desaceleración	Continúa la formación de los productos de hidratación.	Lenta	Determina el desarrollo la resistencia a la compresión inicial
Período de Difusión	Continúa la formación de los productos de hidratación.	Muy lenta	Determina la tasa del desarrollo de resistencia a largo plazo

Fuente: Well Cementing, Erik B. Nelson and D. Guillot, 2006

Los productos de la hidratación son también impuros. El gel C-S-H contiene cantidades importantes de aluminio, hierro y azufre, mientras que la etringita y las fases monosulfoaluminato contienen silicio. El hidróxido de calcio también contiene pequeñas cantidades de iones extraños, sobretodo silicato.

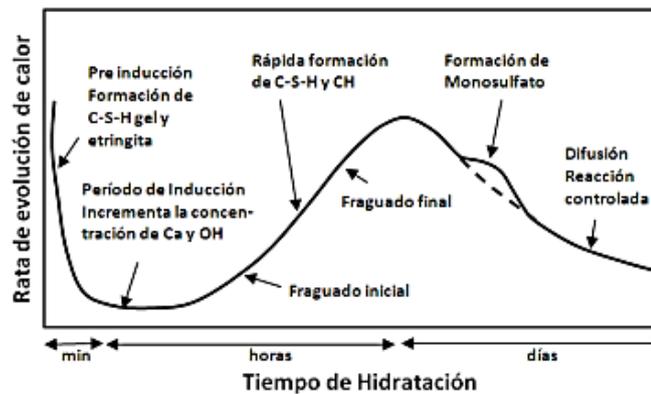


Figura 14-1 Presentación sistemática de la hidratación del cemento

Fuente: Chemistry and Characterization of Portland Cement, Michel Michaux, Erik B, 1996.

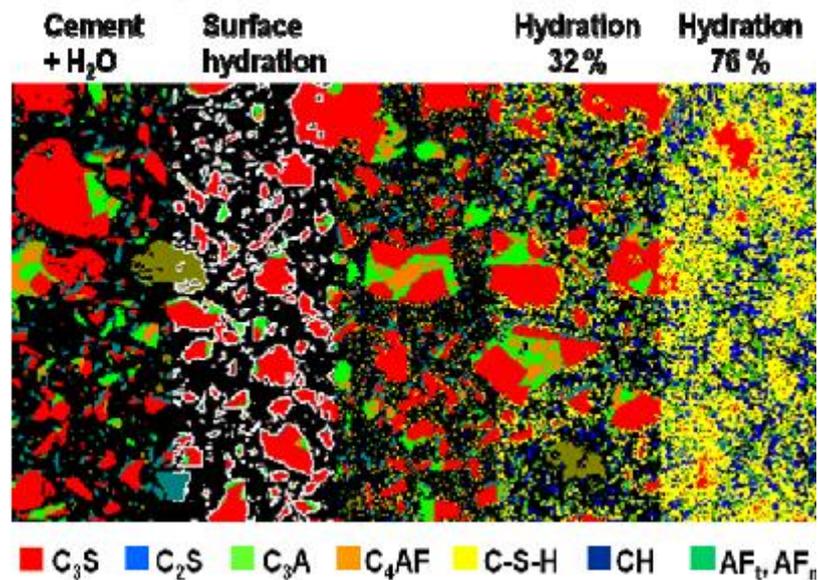


Figura 15-1 Modelo de la hidratación del cemento
Fuente: Well Cementing, Erik B. Nelson and D. Guillot, 2006

1.1.7 Clasificación de los Cementos

El American Petroleum Institute (API) ha identificado nueve tipos de cementos de acuerdo a su composición química y propiedades físicas, estos son:

- API clase A y B
- API clase C
- API clase D, E y F
- API clase G y H
- API clase J

1.1.7.1 Cemento A

Elaborado para ser utilizado hasta una profundidad de 6000 ft con temperaturas de hasta 170 F, donde no se requieran propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permiten. Una de sus características es que no brinda ninguna resistencia a los sulfatos.

1.1.7.2 Cemento B

Se emplea hasta una profundidad de 6000 ft con temperaturas de hasta 170 F, este diseño se aplica donde no se requieran propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permiten. Brinda una moderada resistencia a los sulfatos.

1.1.7.3 Cemento C

Se usa hasta una profundidad de 6000ft, con temperaturas de hasta 170 F, puede emplearse donde se requiere alta resistencia a la compresión temprana: genera una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

1.1.7.4 Clase D

Ha sido diseñado para usarse hasta una profundidad de 12000 ft con temperaturas entre 170F y 230 F, y puede soportar una presión moderada. Tiene una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

1.1.7.5 Clase E y F

Este tipo de cemento se emplea en profundidades entre 14000 ft y 16000 ft. Con temperaturas entre 170 F Y 230 F, puede resistir altas presiones. Concibe una moderada y alta resistencia a los sulfatos

1.1.7.6 Clase G y H

A menudo son conocidos como cementos petroleros, ya que pueden emplearse desde la superficie hasta profundidades de 10000 ft, tal como se fabrican; y pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura.

Por su composición química son similares al cemento API Clase B. Están fabricados con especificaciones más rigurosas tanto físicas como químicas. Por ello son productos más uniformes.

1.1.7.7 Clase J

Se quedó en fase de experimentación y fue diseñado para temperatura estática de 351 F de 16000 ft de profundidad, sin necesidad del empleo de harina sílica, que evite a la regresión de la resistencia a la compresión.

1.1.8 Aditivos del Cemento

Todas las mezclas entre el agua y el cemento usadas en la industria petrolera, contienen algún aditivo adicional para variar alguna propiedad de la mezcla original. (Nelson, Guillot, 2006).

Estos aditivos se manejan para variar la densidad de la mezcla, variar la resistencia a la compresión, variar el tiempo de fraguado, controlar la filtración, entre otras propiedades de la lechada. Generalmente, se reconocen ocho (8) categorías de aditivos:

Tabla 4-1 Clasificación de aditivos para el cemento

Categoría del aditivo	Beneficios	Composición	Mecanismo de acción
Aceleradores	Reducen el tiempo de bombeo. Mayor resistencia a la compresión temprana.	CaCl ₂ , NaCl, nitratos y nitritos Silicatos de Na	Incrementa la permeabilidad y la formación de C-S-H.
Retardadores	Prolongar el tiempo de fraguado	Lignosulfonatos Ácidos Hidroxicarboxílicos Derivados de la celulosa	Adsorción sobre la fase de C-S-H, reduciendo la permeabilidad.
Extendedores	Disminuir la densidad de las lechadas de cemento y/o reducir la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto fraguado.	Bentonita Silicatos de Sodio Puzolanas	Adsorción de agua Menor densidad que el cemento.
Agentes de Peso	Incrementar la densidad de los sistemas de cemento.	Barita Tetraóxido de Magnesio Trióxido de Hierro	Mayor densidad que el cemento
Dispersantes	Reducir la viscosidad de las lechadas de cemento	Lignosulfonatos Polisacáridos hidroxilados Ácidos hidroxicarboxílicos	Induce a la repulsión electrostática de los granos de cemento
Agentes de Control De Pérdida De Fluido	Reducen la deshidratación de la lechada de cemento	Polímeros celulósicos Poliamidas	Reducen la permeabilidad de la torta de cemento
Agentes De Control O De Pérdida De Circulación	Controlar la pérdida de cemento hacia zonas débiles de la formación.	Carbón granular Látex	Acortamiento al efecto de la formación.
Antiespumantes	Reducen la producción de aire durante la mezcla de la lechada	Siliconas Éteres poli glicoles	Insoluble en el sistema de formación de espuma

Realizado por: Daniel A. Estrella H., 2015

Fuente: Well Cementing, Erik B. Nelson and D. Guillot, 2006

1.1.9 Pruebas de Laboratorio para cemento

Las normas API RB -10B e ISO 10426-2 son las encargadas de desarrollar las pruebas certificadas que se efectúan a las lechadas de cemento para determinar sus propiedades. Estas normas básicamente contienen especificaciones de pruebas para lechadas, procedimientos de ensayos operacionales, así como procedimientos para simular condiciones de yacimiento o en el fondo del pozo. Algunas de estas pruebas realizadas en el laboratorio de cementación de Well Services son:

- Tiempo de bombeo.
- Contenido de agua.
- Reología.
- Resistencia a la compresión.

1.1.9.1 Tiempo de bombeo

Ésta es una de las pruebas más importantes de laboratorio y más usada en el campo; determina durante cuánto tiempo la lechada permanece en estado fluido, es decir, es bombeable, bajo una serie de condiciones dadas en el laboratorio (presión y temperatura). El aparato que se usa para determinar el tiempo de bombeo es el consistómetro, que puede ser atmosférico o presurizable.

El Consistómetro.- Este es un equipo que determina la consistencia que va alcanzando la lechada a medida que esta se somete a las condiciones del pozo. Para lograr esto, el equipo tiene un software que simula condiciones de presión y temperatura con el fin de que los resultados sean los más reales posibles, este equipo posee las siguientes características:

- ✚ Velocidad de giro de la paleta o del vaso 150 RPM
- ✚ Unidad de medida BC
- ✚ Medios de calentamiento: agua o aceite de más o menos 3 BC
- ✚ Frecuencia de calibración una vez al mes
- ✚ Puede calentar hasta 600F y presurizar hasta 40000 psi



Figura 16-1 Consistómetro
Realizado por: Daniel A. Estrella H. 2015

El recipiente en la que se ubica la lechada se conoce como celda y ésta gira a velocidad constante, (movido por un motor eléctrico) dentro de un baño de aceite, a través del cual, se le aplica la temperatura y la presión deseada. Dentro de la celda aislada, existe una paleta conectada a un resorte; a medida que la lechada gira, trata de arrastrar la paleta en el sentido de la corriente.

Una lechada más viscosa ejecutará una fuerza mayor en la paleta, la cual a su vez, transmitirá mayor torque al resorte y éste se mide por medio de un potenciómetro, que ha sido ubicado inicialmente en el equipo.

1.1.9.2 Determinación del contenido de agua en la lechada.

Conocida como la prueba de agua libre, el objetivo de esta prueba es determinar la estabilidad de la lechada, una vez preparada la lechada en el mezclador, se le agita en un consistómetro a presión atmosférica; se vuelve a pasar por el mezclador, y luego se le deja en un cilindro de vidrio graduado de 250 ml, perfectamente tapado para evitar la evaporación y con una inclinación de 45°. Al cabo de dos horas de reposo y de inclinación, se habrá acumulado agua en la parte del recipiente, ese volumen de agua medido en mililitros, es el contenido de agua libre de la lechada.

1.1.9.3 Determinación de la densidad.

Se utiliza para ello un equipo llamado balanza presurizada. En el laboratorio se pondrá especial atención en eliminar todo el aire contenido en la muestra de lechada de cemento para evitar que afecte en la toma de la densidad. Se determina la densidad para verificar que los cálculos y la mezcla de la lechada hayan sido correctos

1.1.9.4 Pruebas de resistencia a la compresión.

La determinación de la resistencia a la compresión puede ser tomada por varios métodos. El laboratorio de cementación utiliza un equipo llamado UCA que determina indirectamente la resistencia a la compresión del cemento fraguado (método no destructivo) mediante medidas ultrasónicas. Puede utilizarse para probar la resistencia de una lechada durante un tiempo prolongado. Utiliza correlaciones para las mediciones de la resistencia del rompimiento de las muestras basado en el principio de atenuación de la velocidad sónica. Esta prueba se la realiza con una sola muestra, permite una medición continua, con una temperatura y presión apropiadas, y permitiendo la interpretación de la velocidad sónica (tiempo de tránsito).

1.1.9.5 Determinación de la pérdida de filtrado

Para el desarrollo de esta prueba se usa un filtro prensa de alta presión, que incorpora un baño a una temperatura controlable a fin de simular las condiciones de pozo; la temperatura a la cual se hizo la prueba, se registra en el reporte. Es debido a ésta ventaja que el filtro de alta presión se utiliza más, que el de baja presión, y los resultados obtenidos son expresados como mililitros de filtrado cada 30 minutos a 1000 psi. Ésta prueba nos permite medir la cantidad de fluido que puede perder una lechada sometida a presión contra una pared permeable (formación).

1.1.9.6 Determinación de las propiedades reológicas.

El viscosímetro Fann, es un equipo de tipo rotacional, movido por un motor sincronizado a dos velocidades diferentes que permite conseguir velocidades rotacionales de 600, 300, 200, 100, 6 y 3 RPM. Un cilindro exterior también conocido como rotor, gira a una velocidad constante para cada ajuste de RPM, que es transmitido a la lechada de cemento que lo rodea y ésta, a su vez, produce un cierto torque en un cilindro interior o bob sobre el que actúa un resorte. La torsión que adquiere el resorte puede relacionársela con la viscosidad de la lechada y medirla de esta manera.

Mediante este procedimiento también se puede predecir la compatibilidad entre los fluidos de cementación que se emplearán en la operación, característica muy importante ya que todos los fluidos deben ser compatibles unos con otros para evitar problemas al momento de ponerse en contacto, caso contrario se requiere cambiar la composición del fluido hasta incluso el mismo fluido. Es así que se determina la compatibilidad entre los fluidos cuando el R (índice de compatibilidad) que es la diferencia entre las lecturas del fluido más viscoso y las lecturas de las mezclas a 100 rpm toma los valores:

< 0 Compatible

0 - 40 Compatible, comprobar la presión de fricción

41-70 Ligeramente incompatibles, cambio de fluido

71 - 110 Incompatible

> Incompatibilidad severa, no es bombeable.

1.1.10 Remoción de Lodo

La remoción de lodo ha sido una materia de interés intenso en el proceso de una buena cementación debido al efecto que tiene sobre calidad del cemento y el aislamiento zonal. Gran parte del lodo que se maneja en una operación de perforación se recircula en un ciclo continuo:

1. El lodo se mezcla y guarda en el tanque de lodo.
2. Se extrae el lodo del tanque mediante una bomba y se envía a través de la tubería de perforación directo hacia el pozo.
3. Desde el fondo del pozo, el lodo sale a través de la tubería de perforación, donde la broca de perforación está fragmentando la formación rocosa.
4. El lodo arrastra los fragmentos de roca, denominados detritos, que se han desprendido de la formación por acción de la broca y así regresa a la superficie.
5. En la superficie, el lodo viaja por una tubería que conduce a la zaranda vibratoria.
7. Las zarandas vibratorias son una serie de rejillas vibratorias de metal que se utilizan para separar el lodo de los detritos. El lodo gotea a través de las rejillas y regresa al tanque de lodo.
8. Los detritos de las rocas se desplazan por la deslizadora de detritos que se encarga de desecharlos. Pueden lavarse antes de ser desechados, pero esto dependerá de factores ecológicos u otro tipo de consideraciones. Algunos de los detritos son examinados por los geólogos en busca de indicios acerca de qué es lo que está sucediendo en la profundidad del pozo.

El principal objetivo de un trabajo de cementación primaria es de proveer un completo y permanente aislamiento zonal entre la formación y el casing. Para cumplir este objetivo, los lodos de formación deben ser removidos del anillo, y el espacio anular debe ser llenado de una lechada de cemento. Una vez en el lugar, el cemento debe endurecer y desarrollar las propiedades mecánicas necesarias para mantener un sello hidráulico a lo largo de toda la vida del pozo. Por lo tanto, buena remoción de lodo y colocación correcta de la lechada de cemento son esenciales para obtener un aislamiento zonal.

Para un ingeniero de cementos, la parte crucial del proceso de remoción de lodos consiste en optimizar la centralización de la tubería, seleccionar la secuencia de los fluidos de cementación, determinar el volumen y las propiedades de cada uno de los fluidos, y en cierta medida determinar la tasa de bombeo.

Mediante la reología que es la ciencia que se encarga del estudio del flujo y la deformación de la materia, y en base al estudio de la erodabilidad podemos predecir si un lodo será fácilmente removido por los fluidos de cementación. Generalmente los fluidos de cementación incluyendo a los lodos, entran dentro de la categoría de fluidos no newtonianos, obedeciendo al comportamiento estudiado por Bingham: el fluido requiere de una fuerza inicial de agitación para comenzar a moverse.

Mediante el estudio de la erodabilidad realizamos un análisis del fluido de perforación para diseñar tasas de flujo, lavadores, espaciadores para un lodo y geometría en particular.

La erodabilidad, mide la fuerza necesaria para remover el lodo deshidratado y gelificado, después de permanecer un tiempo estático y este ha creado una capa o costra sobre la formación, mientras más alto sea el valor obtenido, más fácil será la remoción del lodo y el lodo cubrirá en un mayor porcentaje la tubería proporcionando el sello hidráulico y la adherencia entre la tubería - cemento – formación, para el cálculo de la erodabilidad en el laboratorio se emplea la ecuación 1-1.

$$E = \frac{600}{\tau_y} \quad \text{Ec. 1-1}$$

En donde τ_y es el esfuerzo cortante mínimo necesario para empezar un movimiento en el lodo deshidratado y gelificado, la manera de obtener este valor es dejando el lodo por una hora a la temperatura de fondo estática (BHST) y luego realizando una medición en el viscosímetro Fann a 3rpm y de acuerdo al resultado obtenido del cálculo se puede decir:

$5 \leq E$	Sistema de lodo muy duro para ser removido
$5 < E \leq 10$	Sistema de lodo moderadamente duro para ser removido
$10 < E \leq 20$	Sistema de lodo moderadamente fácil para remover
$20 < E \leq 30$	Sistema de lodo bastante fácil de remover
$E > 30$	Sistema de lodo muy fácil de remover

1.1.11 Fluidos de Cementación

Debido a que las lechadas de cemento son usualmente incompatibles con la mayoría de los fluidos de perforación, fluidos intermedios llamados fluidos de cementación son bombeados como amortiguadores para evitar contacto entre ellos. Los fluidos de cementación pueden ser lavadores químicos que no contienen sólidos o fluidos espaciadores que contienen sólidos y son mezclados diferentes densidades.

Cuando una pareja de fluidos incompatibles se mezclan, se forma una masa altamente viscosa que puede causar graves problemas. El cemento se puede canalizar a través de estas masas viscosas. Pueden desarrollarse presiones inaceptablemente altas debido fricción durante el trabajo de cementación, taponando los anillos y logrando un trabajo fallido. En todas estas situaciones, la aislación zonal está comprometida, y trabajos de cementación remedial muy costosas son requeridas. El uso de fluidos de cementación sería innecesario si el lodo fuera compatible con la lechada de cemento.

Aunque el principal objetivo de los fluidos de cementación es prevenir la mezcla de los fluidos de perforación con la lechada de cemento, pueden también ayudar a desplazamiento de lodo. El desplazamiento del lodo ocurre en varios niveles, en general, la densidad y reología de fluidos determinan la masa desplazada, mientras que, en menor escala, la química del fluido de cementación asegura la limpieza de las paredes anulares.

Los fluidos de cementación deben tener tres atributos:

1. Ser compatibles tanto con el lodo así como con la lechada de cemento.
2. Presentar reología y densidad óptimas bajo condiciones de fondo de pozo para asegurar buen desplazamiento de lodo.
3. Tener propiedades químicas para limpiar superficies sólidas (paredes de tubería y formación) y dejarlas mojadas.

Adicionalmente, los fluidos de cementación no deben causar daño a la formación por filtración excesiva y cambios de hidratación de la roca. A menudo, un fluido solo no puede cumplir con todos estos requisitos, en estos casos, múltiples fluidos pueden ser bombeados en secuencia.

1.1.11.1 Lavadores

Los lavadores son fluidos de cementación con una densidad y una viscosidad muy parecida a la del agua o aceite. Por lo tanto, estos pueden ser fácilmente bombeados en flujo turbulento. Actúan de acuerdo a un mecanismo que dispersa el lodo, erosiona tangencialmente las capas del lodo, y dejando las paredes del casing y la formación hidratadas para una óptima adherencia del cemento.

Los lavadores simples usan agua dulce, sin embargo, para aumentar la eficiencia de la remoción y dispersión del lodo, lavadores químicos que contienen dispersantes y surfactantes son las más comúnmente usados. Los dispersantes son a menudo los mismos usados en las lechadas de cemento –sulfatos polinaptenos, lignosulfonatos, o más compuestos amigables con el medio ambiente como derivados de ácidos policarboxílicos.

Los surfactantes ayudan a limpiar compuestos aceitosos absorbidos por las superficies sólidas. Son seleccionados de acuerdo a su aplicación. Cuando se utiliza una emulsión a fluidos de perforación, el lavador químico es una mezcla con agua, disolventes mutuales y surfactantes o un lavado de aceite seguido de lavado químico base de agua.

- El aceite es el mismo que en los fluidos de perforación o es un compuesto específico como un terpeno o un derivado de terpeno.
- Solventes mutuales son compuestos que se incorporarán en base agua o aceite en una sola fase. Son normalmente añadidos a concentraciones comprendidas entre 1 y 10% del volumen total. Un típico solvente mutual es etilenglicol monobutil éter.
- Los surfactantes son mezclas de varios compuestos, porque un solo producto no puede cumplir todos los requerimientos descritos anteriormente. Además estos compuestos deben ser adaptados a base aceite y a un sistema emulsificante. Surfactantes iónicos y no iónicos son usados para hidratar las superficies de la tubería y la formación, mientras aceite humectantes tensoactivos como el amonio cuaternario graso se utilizan para limpiar los fluidos perforación en base aceite de las paredes.

1.1.11.2 Espaciadores

Los espaciadores son fluidos de cementación con densidades cuidadosamente diseñadas y propiedades reológicas. Uno de los ejemplos más simples de un espaciador es la lechada scavenger, una lechada de cemento de baja densidad con una baja tasa de pérdida de fluido y gran cantidad de retardador que puede fácilmente ser bombeado en flujo turbulento. La lechada scavenger tiene dos principales inconvenientes. Son frecuentemente incompatibles con los fluidos de perforación y son propensos a varios procesos de sedimentación. Los espaciadores son más complicados químicamente que los lavadores. Abajo se encuentra una descripción de los ingredientes más comunes.

Viscosificantes.- son necesarios para suspender los agentes de peso y controlar las propiedades reológicas. Pueden estar subdivididos en dos clases, polímeros solubles en agua y arcillas.

- Poliacrilamidas
- Goma guar y derivados de goma guar.
- Derivados de la celulosa
- Varios polímeros, incluyendo algunos obtenidos naturalmente de algunas bacterias.
- Arcillas, como bentonita, caolinita y sepiolita.

Dispersantes.- mejoran la compatibilidad del espaciador con lavadores químicos y lechadas de cemento y dispersan los agentes de peso en el espaciador. El dispersante más común es el sulfonato polinaftaleno.

Agentes de control por pérdida de fluido.- son generalmente polímeros solubles en agua, goma gum, derivados de celulosa, sulfonato de poliestireno. A veces los mismos polímeros funcionan como agente de viscosidad y controlador por pérdida de filtrado.

Agentes de peso.- son usados para obtener la densidad del espaciador deseada – harina de sílice, carbonato de calcio, barita, entre otras.

Surfactantes.- aumentan la compatibilidad de espaciadores con lavadores químicos y humedecen el casing.

Adicionalmente NaCl y KCl son usados para proteger o prevenir la disolución de formaciones masivas de sal o agua dulce-sensible.

Debido a su alta viscosidad, los espaciadores más a menudo fluyen en un régimen laminar durante el desplazamiento del lodo. Sin embargo, esta composición puede ser optimizada para disminuir su viscosidad sin comprometer su estabilidad, permitiendo un desplazamiento en flujo turbulento. La reología depende de algunos factores, incluyendo la concentración del polímero viscosificante y agente de peso, temperatura y la composición del fluido base (agua dulce, agua salada, o concentración de sal).

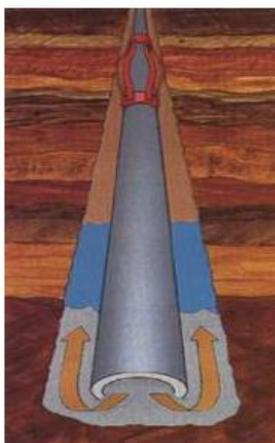


Figura 17-1 Uso de lavadores y espaciadores
Fuente: Well Cementing, Erik B. Nelson and D. Guillot, 2006.

1.1.12 *Píldora de Silicato*

La píldora de Silicato, no es más que silicato de sodio en solución acuosa, es conocido que el Silicato de Sodio se emplea como un aditivo en los fluidos de perforación base agua, ya que ayuda a dar fluidez a los lodos de perforación facilitando su manejo, además de proteger las paredes de la formación, prevenir la corrosión de la tubería y proporcionar un mejor agarre del cemento a la misma. (Cementing Materials Manual, 1998).

Se han encontrado diversas aplicaciones para este producto, que tienen cierta relación a la presente investigación, entre las cuales está la industria de los detergentes (controlando la viscosidad, humectando, emulsificando y previniendo la corrosión) en textiles (actúa como un agente blanqueador y removedor de grasas y ceras), en tratamientos de agua (operan en la protección de tuberías y como filtros para el tratamiento de agua), en pigmentos y pinturas (ayuda a dar estabilidad y dispersión de la tinta), en adhesivos (dando viscosidad, formando una película vítrea y mejorando la adherencia que permite un aumento de resistencia del producto), en minería (auxilia en la dispersión de las partículas de arcilla), entre otras.

A continuación se presentan algunos de los beneficios que aporta en silicato de sodio en la industria de construcción en la que se ve empleado el uso de cemento.

Aceleración en hormigones: Los silicatos solubles en los elementos fabricados con hormigón, actúan como aceleradores de fraguado y como sellantes penetrantes, generalmente se usa silicato de sodio líquido. El silicato de sodio reacciona con la portlandita (Ca(OH)_2) y con Ca^{2+} , fase indeseable del hormigón), formando silicatos de calcio del tipo (C-S-H, correspondiente a la fase deseable).

Los precipitados de la portlandita forman una interfase porosa, aumentando la permeabilidad del hormigón y reduciendo la resistencia a compresión. Existen varias ventajas al sellar con silicato, entre ellas; confieren mayor resistencia a la abrasión, resistencia química y resistencia a los agentes climáticos.

Activación y aceleración en cementos: Al cemento Portland se lo define como sílice finamente dividida y aluminio altamente reactivo con el feldespato a temperatura ambiente y en presencia de humedad, formando un cemento de lento endurecimiento y alta resistencia. Para lograr el fraguado de las puzolanas, necesariamente se requiere de calor o ser activado químicamente por álcalis. Los silicatos son generalmente catalogados como el mejor material para activar las puzolanas, la razón de su efectividad es que ambos el catión y el anión son útiles en la producción del cemento puzolánico. La sílice es un componente normal de las puzolanas y la sílice o la parte aniónica contribuyen a la formación del silicato de calcio hidratado C-H-S, base de cemento que actúa como matriz gigante.

Una de las aplicaciones en construcción más conocida del silicato de sodio, es que sirve como aditivo en proyección de hormigones, disminuyendo notablemente el rebote y por tanto la pérdida de material, así mismo aumenta el rendimiento de la aplicación. Aquel hormigón que contiene como aditivo base al silicato de sodio, fragua más rápido y tiene mayor poder de adherencia a las paredes, especialmente útil en la clave de las bóvedas de túneles.

Consolidación de suelos: Para construcciones en donde los terrenos suelen ser débiles, fisurados, permeables y otros defectos que pondrían en riesgo la construcción y su duración en el tiempo. Se inyecta en el suelo una solución de silicato con un reactivo acuoso que penetre las grietas del terreno y que luego reaccionen químicamente, formándose en su primera etapa un gel y luego un sólido aglomerado, impermeable y de alta resistencia mecánica. Éste es el caso de grandes proyectos civiles como la construcción de represas, túneles, puentes y otros proyectos.

CAPÍTULO II

2 PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Localización

El presente proyecto de investigación se realizó en la Provincia de Orellana, ciudad del Coca, en el laboratorio del segmento Well Services de la compañía Schlumberger Ecuador, ubicado vía los Zorros, Km 1 y ½.

2.2 Metodología

Para realizar la optimización del proceso, realizamos una simulación en el laboratorio de cementación y estimulación de Well Services – Base Coca. Los productos químicos usados en la investigación son suministrados por el segmento, incluso la asistencia técnica fue provista por el personal del laboratorio.

Se diseñó el procedimiento para la evaluación cuantitativa de la adherencia de cemento, con el objetivo de determinar las variables que afectan al proceso, para posteriormente modificarlas con el fin de alcanzar una mayor adherencia.

Tanto el procedimiento como las pruebas de laboratorio tienen su fundamento técnico y teórico en las normas API e ISO, entre ellas la API10-B. El laboratorio WS trabaja de acuerdo a la demanda que exista, dependiendo de los pozos que requieren cementar, por lo tanto, para estandarizar ciertos parámetros se decidió trabajar con la zona de producción de un pozo en específico ubicado a 10 000 pies (3048m)

2.3 Selección de muestra

Las muestras se tomarán de la siguiente manera:

- Tubería de Producción.- La tubería usada para los ensayos, se tomó del taller ubicado en la base Coca, un casing de producción de 7pulg. Se cortaron placas de 10 cm de largo por 3cm de ancho, el espesor típico de esta tubería es de 6mm.
- Aditivos.- De manera aleatoria se receptorán las muestras de los aditivos sólidos y líquidos, almacenados en sacos en bodega y tanques, respectivamente.
- Agua.- El agua procede de la locación, la cual se recepta a diario en el laboratorio en envases de 4L.

- Lodo.- Se usa lodo específicamente usado para zona de producción acondicionado, el mismo que es obtenido de campo y se receipta en el laboratorio.
- Cemento.- se emplea cemento tipo G, usado en pozo obtenido de la planta.

2.4 Simulación del Proceso

2.4.1 Preparación de las Soluciones de Trabajo

Todos los fluidos de cementación están diseñados a 600mL de volumen total.

2.4.1.1 Preparación del Espaciador

La composición es la siguiente:

Tabla 1-2 Composición del Espaciador

Aditivos	Cantidad %V/V
Agua	68,7%
Antiespumante	0,35%
Viscosificante	0,70%
Controlador de Pérdida de Filtrado	0,39%
Cloruro de Calcio	0,66%
Surfactante	0,56%
Carbonato de Calcio	28,63%

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Para mezclar, se debe pesar en la licuadora industrial en el siguiente orden: el agua, el antiespumante, el espaciador, el controlador de pérdida de filtrado y la sal. Llevar a licuar a 2000 rev/min durante 3 minutos. Posteriormente se añade la cantidad de carbonato y nuevamente se lleva a mezclar a la misma velocidad, durante la mezcla se añade el surfactante con la ayuda de una jeringa.

2.4.1.2 Preparación del Lavador

La composición es la siguiente:

Tabla 2-1 Composición del Lavador

Aditivos	Cantidad %V/V
Agua	97,4%
Antiespumante	0,23%
Lavador Químico	1,19%
Surfactante	1,19%

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Para preparar el lavador el procedimiento es más sencillo, ya que se pesa y se mezcla todos los aditivos sin importar el orden y es suficiente 1 minuto me mezcla a 2000rev/min.

2.4.1.3 Preparación de la Píldora

La composición es la siguiente:

Tabla 3-2 Composición de la Píldora

Aditivos	Cantidad %V/V
Agua	(100 - % Silicato de Na)
Antiespumante	0,23%
Silicato de Sodio	(0-100%)

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

La píldora de silicato, es una solución sencilla de silicato de sodio en agua, y una mínima cantidad de antiespumante. Se lo mezcla a 4000 rev/min durante 1 minuto.

2.4.1.4 Preparación del Scavenger

La composición es la siguiente:

Tabla 4-2 Composición del Scavenger

Aditivos	Cantidad %V/V
Cemento	28,64%
Agua	69,73%
Antiespumante	0,16%
Viscosificante	0,19%
Retardador	1,29%

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Primero pesamos el agua junto con el antiespumante, viscosificante y retardador y se lleva a 4000 rev/min durante 3 minutos. Luego se debe añadir el todo el cemento en 15 segundos mientras se mezcla a 4000 rev/min y luego aumentar a 120000 rev/min por 35 segundos más.

2.4.1.5 Preparación de la lechada Lead

La composición es la siguiente:

Tabla 5-2 Composición de la Lead

Aditivos	Cantidad %V/V
Cemento	41,20%
Agua	56,28%
Antiespumante	0,21%
Controlador de Pérdida de Filtrado	0,42%
Dispersante	0,43 %
Retardador	1,42%

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Se pesa el agua junto con el antiespumante y controlador de filtrado y se mezcla por 3 min a 4000 rev/min, luego se añade el dispersante y retardador y se lleva a 4000 rev/min durante 1 minuto.

Luego se debe añadir el todo el cemento en 15 segundos mientras se mezcla a 4000 rev/min y luego se incrementa a 120000 rev/min por 35 segundos más.

2.4.1.6 Preparación de la lechada Tail

La composición es la siguiente:

Tabla 6-2 Composición de la Tail

Aditivos	Cantidad %V/V
Cemento	47,75%
Agua	38,95%
Antiespumante	0,32%
Controlador de Pérdida de Filtrado	0,02%
Gas Blok	10,17 %
Dispersante	1,27%
Retardador	1,52%

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Se pesa el agua junto con el antiespumante y controlador de filtrado y se mezcla por 3 min a 4000 rev/min, luego se añade el gas blok, dispersante y retardador y se lleva a 4000 rev/min durante 1 minuto. Luego se debe añadir el todo el cemento en 15 segundos mientras se mezcla a 4000 rev/min y luego aumentar a 120000 rev/min por 35 segundos más.

2.4.2 Descripción del Procedimiento

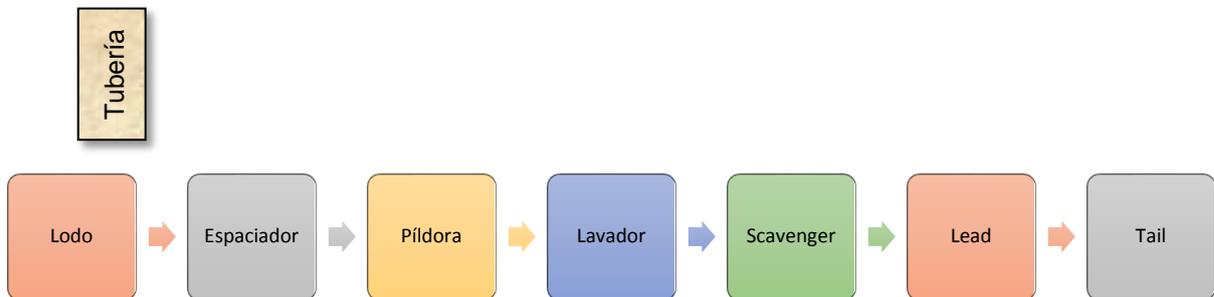
2.4.2.1 Materiales y equipos

- Placas de Tubería
- Vasos de precipitación
- Batch (Baño Térmico)
- Estufa
- Balanza
- Bandeja de Aluminio

2.4.2.2 Procedimiento

- 1) Todas las soluciones previamente mezcladas según las normas API, se ubican en vasos de precipitación y se acondicionan a la temperatura circulante de fondo de pozo BHS dentro del batch. (150°F, 65,5°C).

- 2) Rotular y señalar cada segmento de la tubería, luego pesarlas y acondicionarlas a la temperatura de pozo.
- 3) Cada segmento de tubería se introducirá en cada uno de las soluciones de acuerdo al orden usado en pozo (Lodo, Espaciador, Lavador, Scavenger, Lead, Tail), el tiempo de residencia varía de acuerdo al ensayo.
- 4) Dejar secar en la estufa por una hora a 120 °C, para acelerar el tiempo de fraguado.
- 5) Tomar el respectivo peso final para cada segmento de tubería y su diámetro correspondiente.
- 6) Este procedimiento se realiza por 3 ocasiones por motivos de estadística, y con el propósito de comprobar los datos.



2.4.3 Pruebas de Laboratorio

En la simulación del proceso de cementación, es necesario realizar las pruebas de laboratorio correspondiente de fluido de cementación y lechada para verificar que cumplan las condiciones. Las pruebas son las siguientes:

- Densidad
- Agua Libre
- Propiedades reológicas
- Pérdida de Filtrado
- Tiempo de bombeo
- Resistencia a la compresión
- Compatibilidades

2.4.4 Métodos y Técnicas

Tabla 7-2 Descripción de los Métodos y Técnicas

Determinación	Método/Equipo	Descripción
Densidad	Práctico/Balanza Presurizada	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013
Agua Libre	Práctico/ Manual	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013
Reología	Práctico/ Viscosímetro Fann	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013
Pérdida de Filtrado	Práctico/ Filtro Prensa	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013
Tiempo de Bombeo	Práctico/ Consistómetro	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013
Resistencia a la Compresión	Práctico/ UCA	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013
Compatibilidades	Práctico/ Viscosímetro Fann	API Recommended Practice 10B-2 Second Edition, April 2013

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5 Datos Experimentales

2.5.1 Datos de las placas

Tabla 8-2 Datos iniciales de las placas

No de Placa	Peso (g)	Espesor (mm)
1	137,16	6
2	134,55	6
3	136,01	6
4	133,14	6
5	139,86	6
6	135,10	6
7	137,49	6
8	137,71	6
9	155,16	6
10	136,16	6

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2 Datos de las soluciones de trabajo

2.5.2.1 Datos de las pruebas de laboratorio para Lodo

Tabla 9-2 Densidad del Lodo

Densidad	(ppg)
Lodo	9,10

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 10-2 Reología para el Lodo

(rpm)	(deg)	(deg)
300	63.0	52.0
200	48.0	46.0
100	32.5	31.5
60	24.0	23.5
30	16.5	16.0
6	7.5	7.0
3	5.0	5.0
10 sec Gel	5.08 lbf/100ft2	5.01 lbf/100ft2
10 min Gel	7.75 lbf/100ft2	7.48 lbf/100ft2
1 min Stirring	7.28 lbf/100ft2	7.28 lbf/100ft2
Temperatura	80 degF	150 degF
Presión	15 psi	15 psi
	Viscosity : 46.415 cP Yield Point : 14.28 lbf/100ft2	Viscosity : 25.304 cP Yield Point : 15.84 lbf/100ft2

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2.2 Datos de las pruebas de laboratorio para Espaciador

Tabla 11-2 Densidad del Espaciador

Densidad	(ppg)
Espaciador	12,5

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 12-2 Reología para el Espaciador

(rpm)	(deg)	(deg)
300	115.0	76.0
200	95.0	62.0
100	68.5	45.5
60	53.0	37.5
30	37.5	28.0
6	23.5	18.0
3	17.0	14.0
10 sec Gel	17.08 lbf/100ft ²	16.01 lbf/100ft ²
10 min Gel	27.75 lbf/100ft ²	23.48 lbf/100ft ²
1 min Stirring	20.28 lbf/100ft ²	20.28 lbf/100ft ²
Temperatura	80 degF	150 degF
Presión	15 psi	15 psi
	Viscosity : 86.415 cP Yield Point : 34.28 lbf/100ft ²	Viscosity : 52.304 cP Yield Point : 25.84 lbf/100ft ²

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2.3 Datos de las pruebas de laboratorio para Lavador**Tabla 13-2** Densidad del Lavador

Densidad	(ppg)
Lavador	8,34

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 14-2 Reología para Lavador

(rpm)	(deg)	(deg)
300	2.0	2.0
200	2.0	2.0
100	1.0	1.0
60	1.0	1.0
30	1.0	1.0
6	1.0	1.0
3	1.0	1.0
10 sec Gel	1.07 lbf/100ft ²	1.07 lbf/100ft ²
10 min Gel	1.07 lbf/100ft ²	1.07 lbf/100ft ²
1 min Stirring	1.07 lbf/100ft ²	1.07 lbf/100ft ²
Temperatura	80 degF	150 degF
Presión	15 psi	15 psi
	Viscosity : 1.432 cP Yield Point : 0.80 lbf/100ft ²	Viscosity : 1.432 cP Yield Point : 0.80 lbf/100ft ²

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2.4 Datos de las pruebas de laboratorio para Scavenger**Tabla 15-2** Densidad del Scavenger

Densidad	(ppg)
Lavador	13,5

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 16-2 Reología para el Scavenger

Temperatura	80 degF			150 degF		
(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	75.0	73.0	74.0	60.0	58.0	59.0
200	65.0	63.0	64.0	51.0	50.0	50.5
100	52.0	45.0	48.5	42.0	40.0	41.0
60	41.0	38.0	39.5	36.0	32.0	34.0
30	32.0	28.0	30.0	29.0	27.0	28.0
6	21.0	20.0	20.5	20.0	19.0	19.5
3	18.0	17.0	17.5	18.0	15.0	16.5
10 sec Gel	19.21 lbf/100ft2			18.14 lbf/100ft2		
10 min Gel	28.82 lbf/100ft2			32.02 lbf/100ft2		
1 min Stirring	23.48 lbf/100ft2			25.62 lbf/100ft2		
Rheo. Computed	Viscosity : 47.932 cP Yield Point : 29.98 lbf/100ft2			Viscosity : 32.047 cP Yield Point : 28.42 lbf/100ft2		

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 17-2 Agua Libre Scavenger

Agua libre
0.0 mL/250mL in 2 hrs
Sedimentación : No

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 18-2 Tiempo de Bombeo Scavenger

Consistencia	Tiempo
30 Bc	08:20 hr:mn
70 Bc	08:35 hr:mn

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

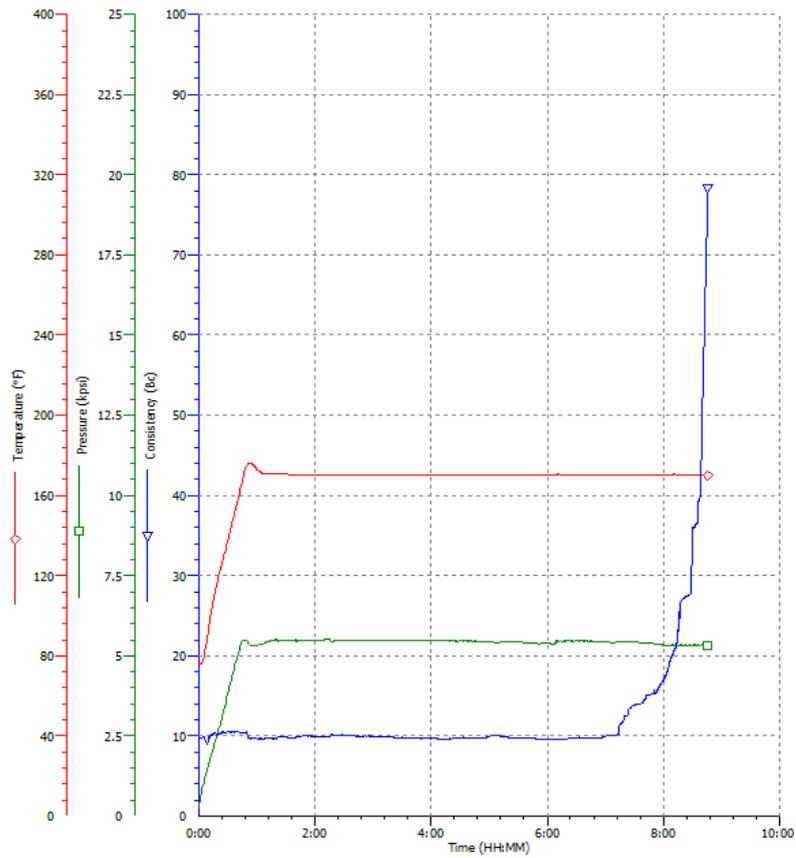


Figura 1-2 Tiempo de Bombeo Scavenger
Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2.5 Datos de las pruebas de laboratorio para Lead

Tabla 19-2 Densidad de Lead

Densidad	(ppg)
Lead	15,8

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 20-2 Reología para Lead

Temperatura (rpm)	80 degF			150 degF		
	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	163.0	163.0	163.0	165.0	165.0	165.0
200	125.0	120.0	122.5	134.0	121.0	127.5
100	78.0	76.0	77.0	86.0	84.0	85.0
60	61.0	57.0	59.0	66.0	62.0	64.0
30	35.0	34.0	34.5	43.0	40.0	41.5
6	17.0	14.0	15.5	19.0	16.0	17.5
3	15.0	13.0	14.0	14.0	10.0	12.0
10 sec Gel	13.88 lbf/100ft2			11.74 lbf/100ft2		
10 min Gel	20.28 lbf/100ft2			30.95 lbf/100ft2		
1 min Stirring	16.01 lbf/100ft2			20.28 lbf/100ft2		
Rheo. Computed	Viscosity : 139.857 cP Yield Point : 27.12 lbf/100ft2			Viscosity : 135.113 cP Yield Point : 34.01 lbf/100ft2		

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 21-2 Agua Libre Lead

Agua libre
0.0 mL/250mL in 2 hrs
Sedimentación : No

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 22-2 Tiempo de Bombeo Lead

Consistencia	Tiempo
30 Bc	04:58 hr:mn
70 Bc	05:20 hr:mn
Tiempo de pre mezcla : 01:45 hr:mn at 80 degF	

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 23-2 Pérdida de Filtrado Lead

Perdida de Filtrado
36 mL
In 30 min at 150 degF and 1000 psi

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Instrument: 7222-216 216
 Comments:

Test Start: 3/20/2015 11:28:44 AM

Test Stop: 3/20/2015 6:34:15 PM

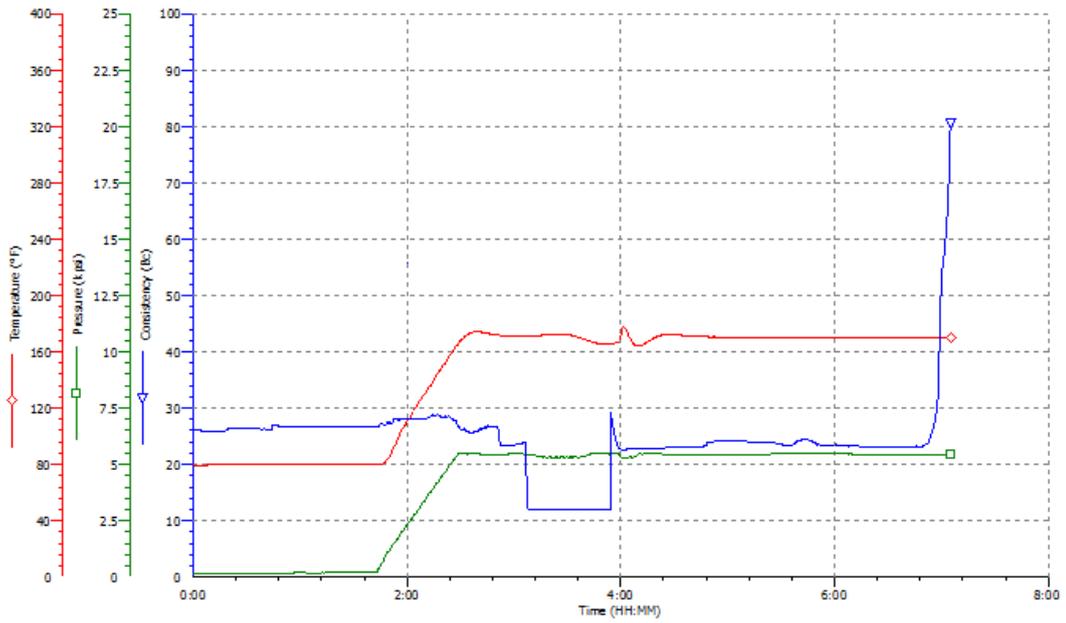


Figura 2-2 Tiempo de Bombeo Lead
 Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Instrument: SGSA-169 169
 Algorithm: Compressive strength type B (more than 14lb/gal)
 Comments:

Test Start: 2/6/2015 11:50:29 AM
 Algorithm: Static gel strength

Test Stop:

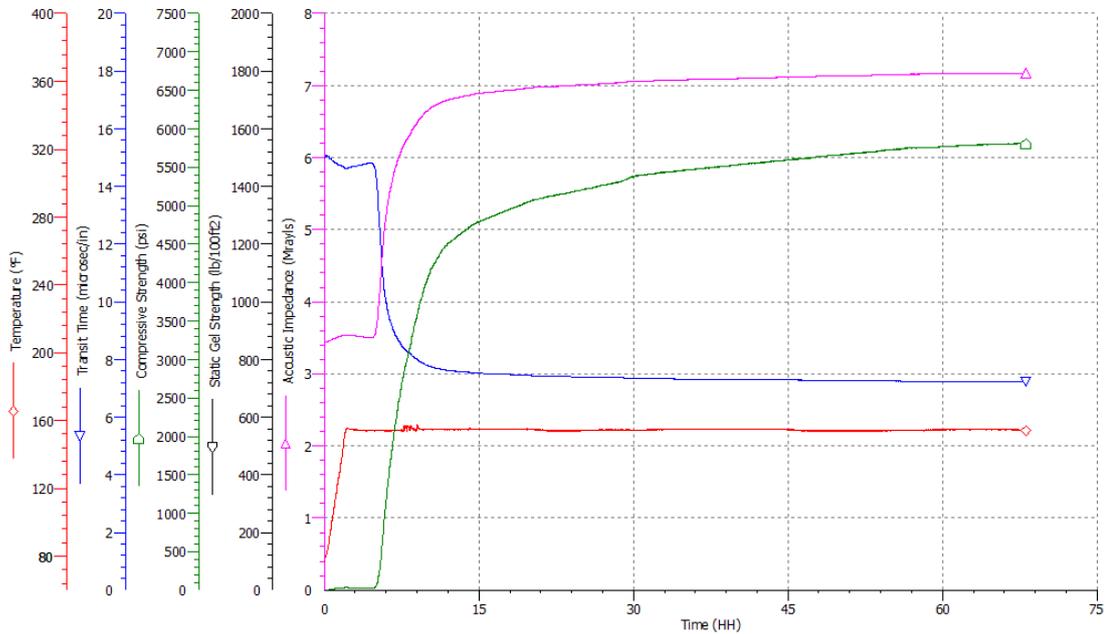


Figura 3-2 Resistencia a la compresión Lead
 Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2.6 Datos de las pruebas de laboratorio para Tail

Tabla 24-2 Densidad de la Tail

Densidad	(ppg)
Tail	17

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 25-2 Reología para la Tail

Temperatura	80 degF			150 degF		
(rpm)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)	Up (deg)	Down (deg)	Average (deg)
300	131.0	131.0	131.0	230.0	230.0	230.0
200	95.0	90.0	92.5	177.0	170.0	173.5
100	56.0	54.0	55.0	117.0	103.0	110.0
60	34.0	36.0	35.0	85.0	80.0	82.5
30	23.0	21.0	22.0	62.0	45.0	53.5
6	11.0	9.0	10.0	26.0	24.0	25.0
3	9.0	6.0	7.5	18.0	18.0	18.0
0 sec Gel	6.40 lbf/100ft2			20.28 lbf/100ft2		
10 min Gel	23.48 lbf/100ft2			33.09 lbf/100ft2		
1 min Stirring	10.67 lbf/100ft2			27.75 lbf/100ft2		
Rheo. Computed	Viscosity : 120.884 cP Yield Point : 11.60 lbf/100ft2			Viscosity : 193.123 cP Yield Point : 40.96 lbf/100ft2		

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 26-2 Agua Libre Tail

Agua libre
0.0 mL/250mL in 2 hrs
Sedimentación : No

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 27-2 Tiempo de Bombeo Tail

Consistencia	Tiempo
30 Bc	03:02 hr:mn
70 Bc	03:15 hr:mn
Tiempo de pre mezcla : 01:30 hr:mn at 80 degF	

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 28-2 Pérdida de Filtrado Tail

Pérdida de Filtrado
30 mL
In 30 min at 150 degF and 1000 psi

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Instrument: 7222-217
Comments:

Test Start: 3/21/2015 1:25:27 PM

Test Stop:

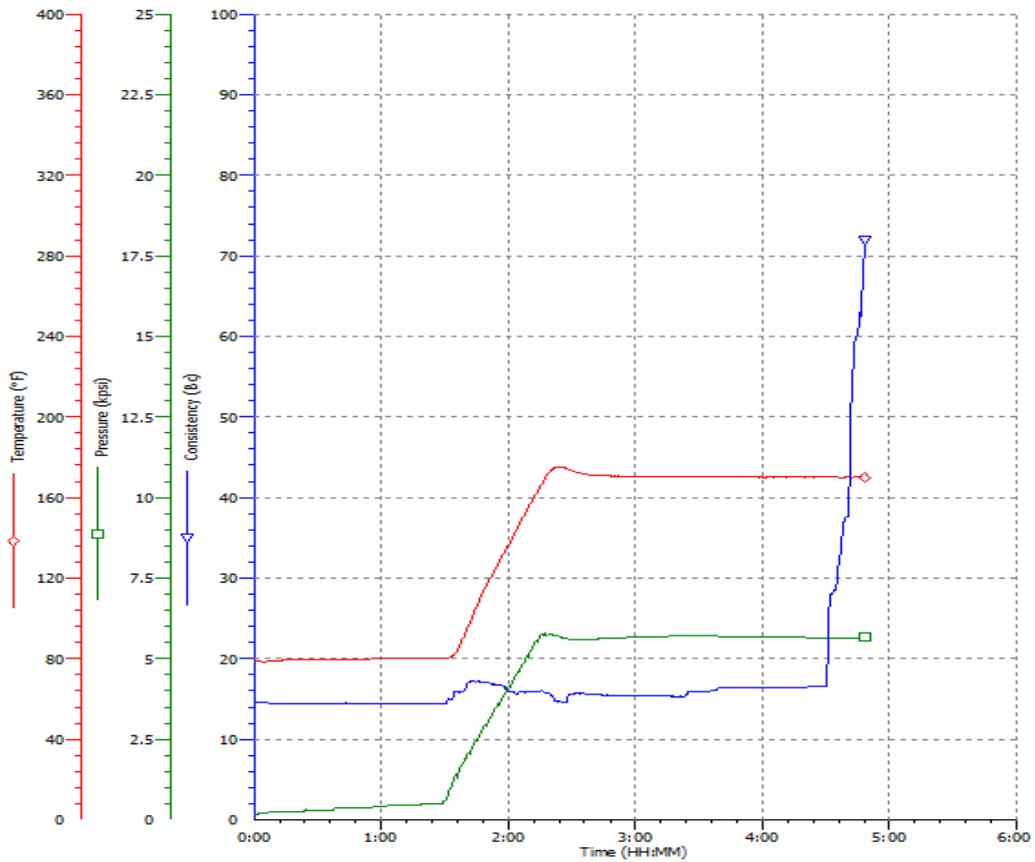


Figura 4-2 Tiempo de Bombeo Tail
Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Instrument: SGSA-844 844
Comments:

Algorithm: Compressive strength type B (more than 14 lb/gal)

Test Start: 3/21/2015 4:01:21 PM
Algorithm: Static gel strength

Test Stop: 3/24/2015 8:41:39 AM

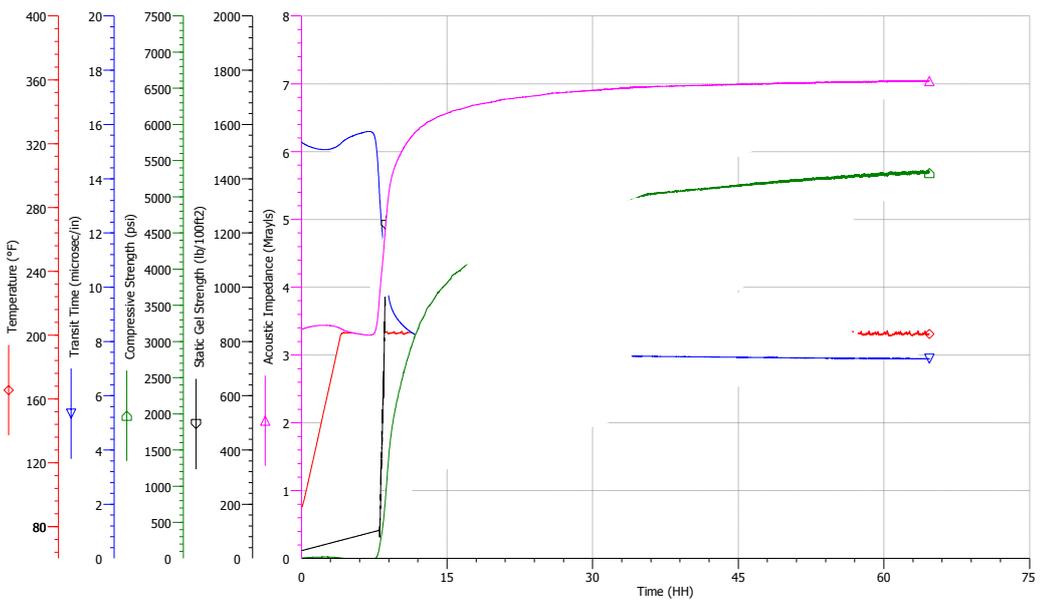


Figura 5-2 Resistencia a la Compresión Tail
Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.2.7 Datos de las pruebas de laboratorio para Compatibilidades

Tabla 29-2 Compatibilidad Espaciador – Lodo

E % Vol	M % Vol	RPM							Gel 10"	Gel 10'	Den. ppg	R Index	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	108	84,5	58,5	45	33,5	18,5	14,5	14	23	13,00		
95	5	83	67	48	38	29	17	13	17	22	12,85	-11	Compatible
75	25	75	60	42	34	23	10	8	10	12	12,23	-17	Compatible
50	50	78	62	43	33	24	11	8	12	13	11,45	-16	Compatible
25	75	77	60	43	34	25	12	9	13	17	10,68	-16	Compatible
5	95	66	56	38	30	20	7	5	8	11	10,06	-21	Compatible
0	100	63	48	32	24	16	7	5	5	7	9,90	-27	Compatible

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 30-2 Compatibilidad Scavenger – Lodo

S % Vol	M % Vol	RPM							Gel 10"	Gel 10'	Den. Ppg	R Index	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	108	84,5	58,5	45	33,5	18,5	14,5	14	23	13,00		
95	5	95	72	52	42	31	17	14	15	20	12,85	-6,5	Compatible
75	25	98	79	57	46	36	21	17	18	22	12,23	-1,5	Compatible
50	50	82	66	48	38	28	16	13	15	20	11,45	-10,5	Compatible
25	75	75	62	43	36	26	13	10	12	14	10,68	-15,5	Compatible
5	95	70	60	32	24	20	10	7	7	11	10,06	-26,5	Compatible
0	100	63	48	32	24	16	7	5	5	7	9,90	-26,5	Compatible

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 31-2 Compatibilidad Lead – Lodo

L % Vol	M % Vol	RPM							Gel 10"	Gel 10'	Den. ppg	R Index	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	131	103,5	72	54	39	22	16,5	17	25	15,80		
95	5	116	108	102	80	52	24	19	24	38	15,51	30	Compatible:Check friction pressure
75	25	171	130	88	66	45	20	16	23	36	14,33	16	Compatible:Check friction pressure
50	50	140	109	74	56	39	18	13	19	29	12,85	2	Compatible:Check friction pressure
25	75	128	103	69	53	36	17	12	17	26	11,38	-3	Compatible
5	95	105	77	54	42	30	15	11	13	22	10,20	-18	Compatible
0	100	63	48	32	24	16	7	5	5	7	9,90	-40	Compatible

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 32-2 Compatibilidad Lead – Espaciador

L % Vol	E % Vol	RPM							Gel 10"	Gel 10'	Den. ppg	R Inde x	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	131	104	72	54	39	22	16,5	17	25	15,80		
95	5	127	100	69	52	37	23	19	19	26	15,66	-3	Compatible
75	25	120	97	62	49	32	22	17	17	23	15,10	-10	Compatible
50	50	115	93	59	45	30	19	15	16	24	14,40	-13	Compatible
25	75	129	99	65	50	37	23	20	20	27	13,70	-7	Compatible
5	95	121	94	60	47	34	21	18	18	25	13,14	-12	Compatible
0	100	108	84,5	58,5	45	33,5	18,5	14,5	14	23	13,00	-14	Compatible

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 33-2 Compatibilidad Píldora – Lodo

P % Vol	M % Vol	RPM							Gel 10"	Gel 10'	Den. ppg	R Index	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	2	2	1	1	1	1	1	1	1	9,52		
95	5	3	3	2	1	1	1	1	1	1	9,54	-31	Compatible
75	25	10	7	4	2	1	1	1	1	1	9,62	-29	Compatible
50	50	22	18	13	9	6	2	1	1	1	9,71	-20	Compatible
25	75	30	22	17	13	11	5	3	3	3	9,81	-16	Compatible
5	95	57	42	28	21	13	9	7	7	9	9,88	-5	Compatible
0	100	64	49	33	25	16	7	5	5	7	9,90	0	Compatible

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 34-2 Compatibilidad Espaciador – Píldora

E % Vol	P % Vol	RPM							Gel 10"	Gel 10'	Den. ppg	R Index	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	108	84,5	58,5	45	33,5	18,5	14,5	14	23	13,00		
95	5	82	72	55	42	30	26	13	13	15	12,83	-3,5	Compatible
75	25	43	36	27	23	19	11	9	10	11	12,13	-32	Compatible
50	50	23	19	15	12	10	6	5	5	6	11,26	-44	Compatible
25	75	7	5	3	3	2	2	1	1	1	10,39	-56	Compatible
5	95	4	3	2	1	1	1	1	1	1	9,69	-57	Compatible
0	100	2	2	1	1	1	1	1	1	1	9,52	-58	Compatible

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 35-2 Compatibilidad Lavador – Píldora

W % Vol	P % Vol	RPM							Gel 10''	Gel 10'	Den. ppg	R Index	Comments
		300	200	100	60	30	6	3					
100	0	2	2	1	1	1	1	1	1	1	8,34		
95	5	2	2	1	1	1	1	1	1	1	8,40	0	Compatible:Check friction pressure
75	25	2	2	1	1	1	1	1	1	1	8,64	0	Compatible:Check friction pressure
50	50	2	2	1	1	1	1	1	1	1	8,93	0	Compatible:Check friction pressure
25	75	2	2	1	1	1	1	1	1	1	9,23	0	Compatible:Check friction pressure
5	95	2	2	1	1	1	1	1	1	1	9,46	0	Compatible:Check friction pressure
0	100	2	2	1	1	1	1	1	1	1	9,52	0	Compatible:Check friction pressure

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

2.5.3 Datos Adicionales**Tabla 36-2** Condiciones de Pozo

Parámetro	Valor
Temperatura	150 °F – 65,5 °C
Profundidad	10000ft – 3048m
Presión BHP	5200 psi
Diámetro de Tubería	7 in – 0,17m

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

Tabla 37-2 Orden de Bombeo en Pozo

Fluido	Volumen (bbl)	Densidad (ppg)	Caudal (bpm)
Espaciador	50	12,5	4-5
Lavador	20	8,34	4-5
Píldora	20	9,52	4-5
Lavador	20	8,34	4-5
Scavenger	10	13,5	4-5
Lead	15	15,8	4-5
Tail	20	17,0	4-5

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

CAPÍTULO III

3 Cálculos y Resultados

3.1 Cálculos

3.1.1 Cálculos del Peso de Cemento

P_{final} = Peso en gramos de la tubería con cemento

P_{placa} = Peso en gramos de la tubería sin cemento

3.1.1.1 Cálculos de peso de cemento con y sin píldora

Tabla 1-3 Peso de cemento con y sin píldora

Solución	Pinicial (g)	Pfinal (g)
Blanco (sin silicato)	137,16	139,88
Píldora 90%	155,15	159,87

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.1.2 Cálculos de peso de cemento a varias concentraciones de píldora

Tabla 2-3 Peso de cemento a varias concentraciones

Concentración %(V/V)	Pinicial (g)	Pfinal (g)
0%	137,16	139,99
30%	134,57	138,05
35%	136,02	139,46
40%	133,12	136,59
50%	139,85	143,31
60%	135,08	138,57
70%	137,49	141,7
80%	137,71	142,02
90%	155,15	159,85
100%	136,16	140,89

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.1.3 Cálculos de peso de cemento a varios tiempos de residencia

Tabla 3-1 Peso de cemento a varios tiempos de residencia

Tiempo (min)	Pinicial (g)	Pfinal (g)
0,16	136,02	139,1
5	135,08	138,52
10	136,02	138,95
15	155,15	158,83
20	137,16	140,93

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.1.4 Cálculos de peso de cemento con la modificación del tren de cementación

Tabla 4-3 Peso de cemento con modificación del tren

Eliminación	Pinicial (g)	Pfinal (g)
W1	155,16	159,31
P	137,74	140,66
S	137,71	145,96
L	136,16	139,22

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.1.5 Cálculo de peso de cemento a varias densidades

Tabla 5-3 Peso de cemento a varias densidades

Densidad	Pinicial (g)	Pfinal (g)
13,5	137,17	139,22
14,5	137,49	140,79
15	135,1	140,31
16	134,56	143,9

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.1.6 Peso de cemento con la influencia del controlador de pérdida de filtrado

Tabla 6-3 Peso de cemento con la influencia de CF

Controlador de Filtrado	Pinicial (g)	Pfinal (g)
Normal	137,17	139,93
Lavador	139,85	143,54
Píldora	137,49	141,25
Lead + CF	134,56	137,96
Lead sin CF	133,14	134,33
P CF – sin S	139,86	144,65

3.1.2 Cálculo del Espesor de Cemento

$$E_{\text{cemento}} = E_{\text{final}} - E_{\text{placa}}$$

E_{final} = Espesor en milímetros de la tubería con cemento

E_{placa} = Espesor en milímetros de la tubería sin cemento

3.1.2.1 Cálculo del espesor de cemento con y sin píldora

Tabla 7-3 Espesor de cemento con y sin píldora

Solución	Eplaca (mm)	Efinal (mm)
Blanco (sin píldora)	6	7,47
Píldora 90%	6	9,59

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.2.2 Cálculo del espesor de cemento a varias concentraciones de píldora

Tabla 8-3 Espesor de cemento a varias concentraciones de píldora

Concentración %(V/V)	Eplaca (mm)	Efinal (mm)
0%	6	7,57
30%	6	8,46
35%	6	8,28
40%	6	8,33
50%	6	8,28
60%	6	8,25
70%	6	9,42
80%	6	9,35
90%	6	9,59
100%	6	10,02

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.2.3 Cálculo del espesor de cemento a varios tiempos de residencia

Tabla 9-3 Espesor de cemento a varios tiempos de residencia

Tiempo (min)	Eplaca (mm)	Efinal (mm)
0,16	6	8,95
5	6	9,28
10	6	8,29
15	6	9,4
20	6	9,35

3.1.2.4 Cálculo del espesor de cemento con la modificación del tren de cementación

Tabla 10-3 Espesor de cemento con la modificación del tren

Eliminación	Eplaca (mm)	Efinal (mm)
W1	6	9,22
P	6	8,1
S	6	12,14
L	6	8,65

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.2.5 Cálculo del espesor de cemento a varias densidades

Tabla 11-3 Espesor de cemento a varias densidades

Densidad	Eplaca (mm)	Efinal (mm)
13,5	6	8,05
14,5	6	8,34
15	6	10,97
16	6	12,16

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.1.2.6 Cálculo del espesor de cemento con la influencia del controlador de pérdida de filtrado

Tabla 12-3 Espesor de cemento con la influencia de CF

Controlador de Filtrado	Eplaca (mm)	Efinal (mm)
Normal	6	8,09
Lavador	6	9,12
Píldora	6	9,26
Lead + CF	6	9,17
Lead sin CF	6	7,03
P CF sin S	6	10,02

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2 Resultados

3.2.1 Resultados de Peso

3.2.1.1 Resultados de peso de cemento con y sin píldora

Tabla 13-3 Resultados de peso de cemento con y sin píldora

Solución	Pcemento (g)
Blanco (sin píldora)	2,72
Píldora 90%	4,72

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.1.2 Resultados de peso cemento a varias concentraciones

Tabla 14-3 Resultados de peso de cemento a varias concentraciones

Concentración %(V/V)	Pcemento (g)
0%	2,83
30%	3,38
35%	3,44
40%	3,47
50%	3,46
60%	3,49
70%	4,21
80%	4,31
90%	4,7
100%	4,73

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

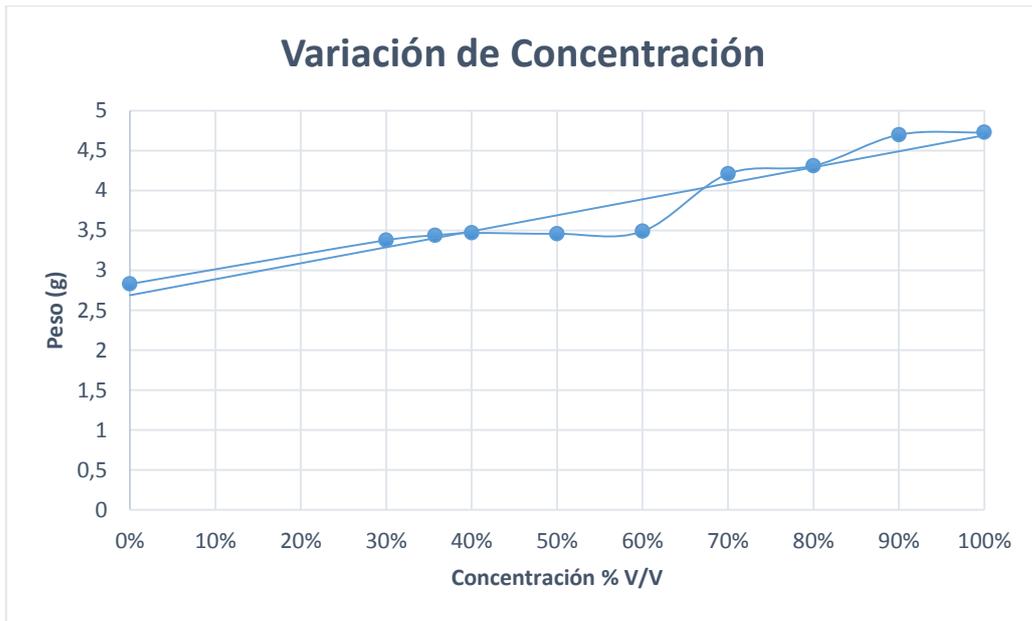


Figura 1-3 Gráfica de pesos de la variación de la concentración
 Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.1.3 Resultados de peso de cemento a varios tiempos de residencia

Tabla 15-3 Resultados de peso de cemento a varios tiempos de residencia

Tiempo (min)	Pcemento (g)
0,16	3,08
5	3,44
10	2,93
15	3,68
20	3,77

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

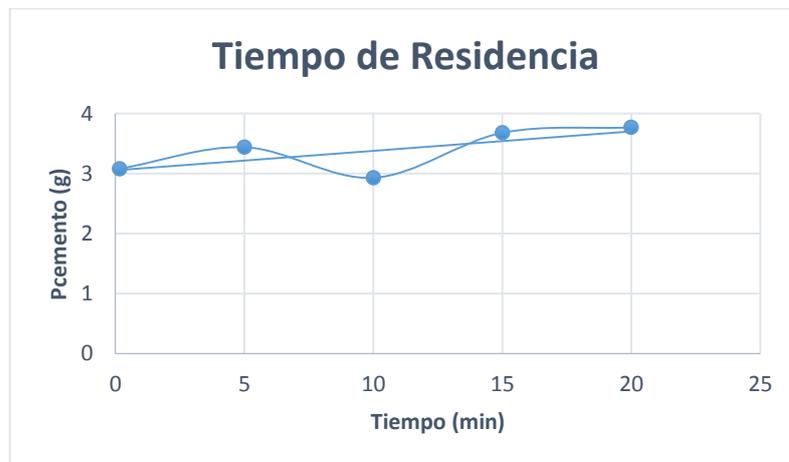


Figura 2-3 Gráfica de pesos con variación en tiempos de residencia
 Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.1.4 Resultados de peso de cemento con la modificación del tren de cementación

Tabla 16-3 Resultados de peso de cemento con la modificación del tren

Eliminación	Pcemento (g)
W1	4,15
P	2,92
S	8,25
L	3,06

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015



Figura 3-3 Gráfica del peso de cemento con modificación del tren

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.1.5 Resultados de peso de cemento a varias densidades

Tabla 17-3 Resultados de peso de cemento a varias densidades

Densidad	Pcemento (g)
13,5	2,05
14,5	3,3
15	5,21
16	9,34

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

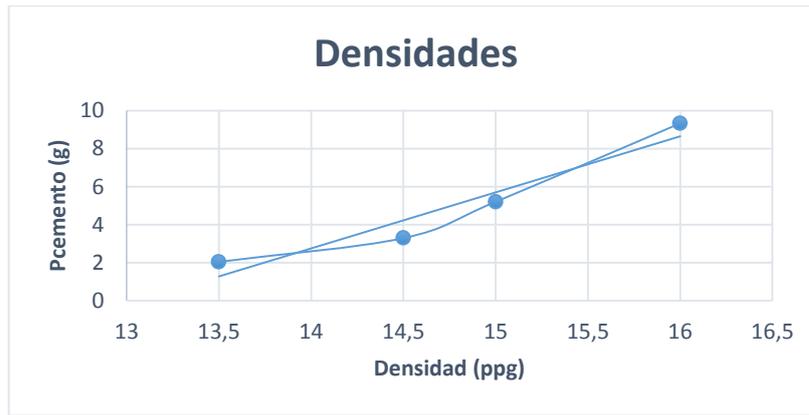


Figura 4-3 Grafica de peso de cemento con varias densidades
Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.1.6 Resultados de peso de cemento con la influencia del controlador de perdida de filtrado

Tabla 18-3 Resultados de peso de cemento con la influencia de CF

Controlador de Filtrado	Pcemento (g)
Normal	2,76
Lavador	3,69
Píldora	3,76
Lead + CF	3,4
Lead sin CF	1,19
P CF sin S	4,79

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

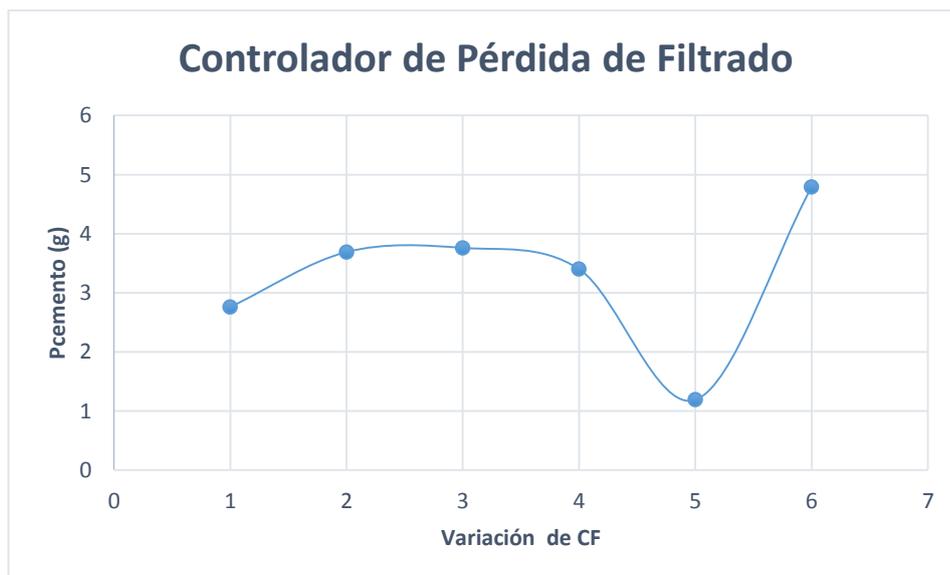


Figura 5-3 Grafica de peso de cemento con la influencia de CF
Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.2 Resultados de Espesor

3.2.2.1 Resultados de espesor de cemento con y sin píldora

Tabla 19-3 Resultados de espesor de cemento con y sin píldora

Solución	Ecimiento (mm)
Blanco (sin píldora)	1,47
Píldora 90%	3,59

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.2.2 Resultados de espesor de cemento a varias concentraciones

Tabla 20-3 Resultados de espesor de cemento a varias concentraciones

Concentración %(V/V)	Ecimiento (mm)
0%	1,57
30%	2,36
35%	2,38
40%	2,33
50%	2,28
60%	2,38
70%	3,42
80%	3,35
90%	3,59
100%	4,02

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

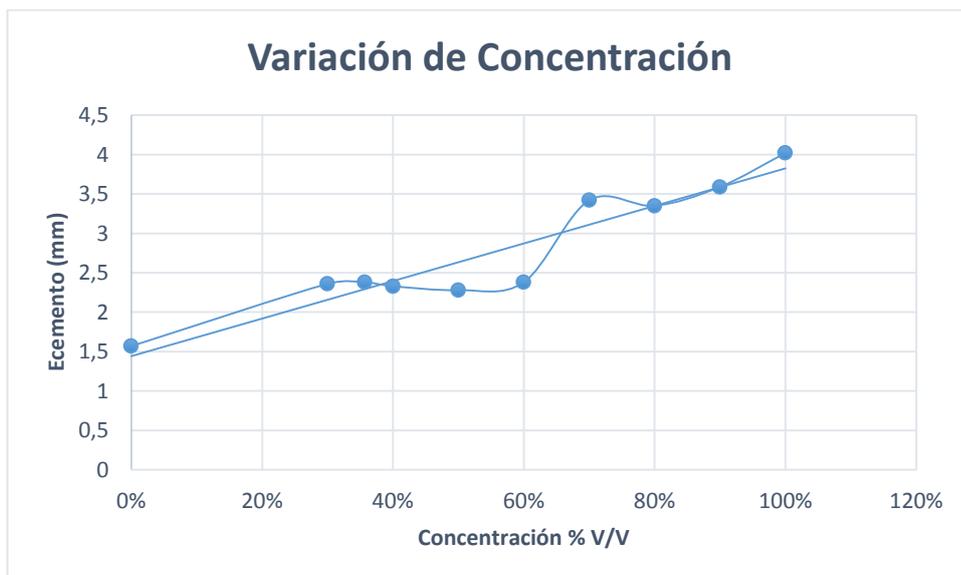


Figura 6-3 Gráfica de espesor de cemento con variación de concentración

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.2.3 Resultados de espesor de cemento a varios tiempos de residencia

Tabla 21-3 Resultados de espesor de cemento a varios tiempos de residencia

Tiempo (min)	Espesor(mm)
0,16	2,95
5	3,28
10	2,29
15	3,4
20	3,35

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015



Figura 7-3 Gráfica de espesor de cemento a varios tiempos de residencia

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.2.4 Resultados de espesor de cemento con la modificación del tren de cementación

Tabla 22-3 Resultados de espesor de cemento con la modificación del tren

Eliminación	Espesor(mm)
W1	3,22
P	2,1
S	6,14
L	2,65

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

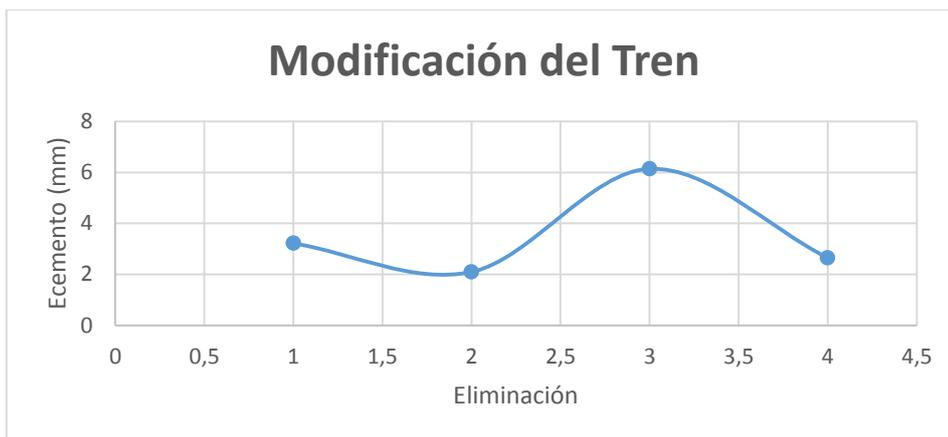


Figura 8-3 Gráfica de espesor de cemento con la modificación del tren
 Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.2.5 Resultados de espesor de cemento a varias densidades

Tabla 23-3 Resultados de espesor de cemento a varias densidades

Densidad	Espesor(mm)
13,5	2,05
14,5	2,34
15	4,97
16	6,16

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015



Figura 9-3 Gráfica de espesor de cemento a varias densidades
 Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.2.2.6 Resultados de espesor de cemento con la influencia del controlador de pérdida de filtrado

Tabla 24-3 Resultados de espesor de cemento con la influencia del CF

Controlador de Filtrado	Espesor(mm)
Normal	2,09
Lavador	3,12
Píldora	3,26
Lead + CF	3,17
Lead sin CF	1,03
P CF sin S	4,02

Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

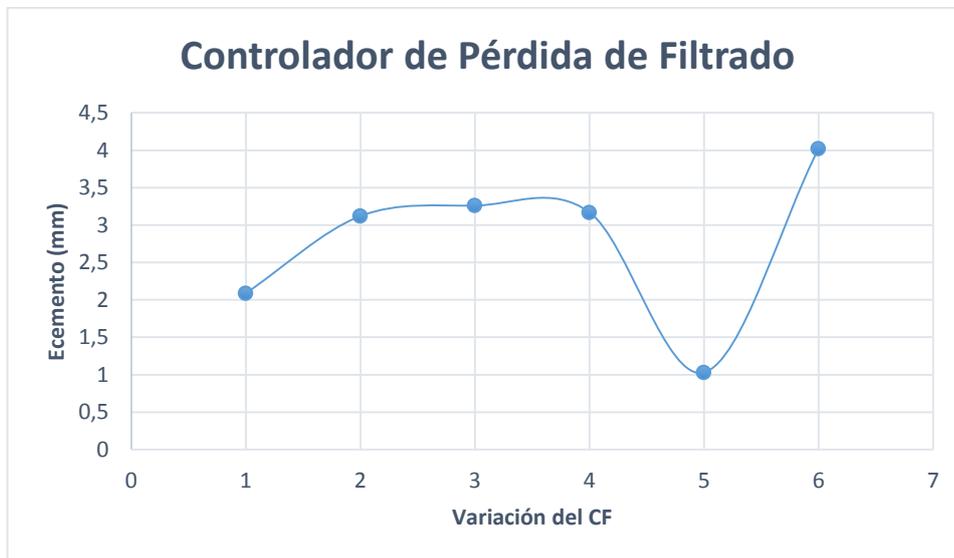


Figura 10-3 Gráfica de espesor de cemento con la influencia de CF
Realizado por: Daniel Estrella, Mayo 2015

3.3 Análisis y Discusión

Para la simulación del proceso de cementación, se requiere preparar las soluciones de trabajo, con las composiciones de cada reactivo correspondientes al tipo de fluido que se elabora.

En la Tabla 1-2 se especifica la composición de un espaciador con densidad baja de 12,5ppg, cuya composición en su mayoría es agua y carbonato. Según Nelson y Guillot el carbonato que compone el 28,63% funciona como un viscosificante, del tipo de arcillas solubles en agua, controlando el peso y las propiedades reológicas. En menor proporción se compone de KCl (0.66%) y surfactante (0.56%). De esta manera se alcanza la formulación apropiada para proteger la formación y aumentar la compatibilidad con los demás fluidos.

La Tabla 2-2 permite evidenciar que un lavador está básicamente compuesto por agua (97,4%), con una densidad cercana a la del agua con la finalidad de lograr hidratar el casing y la formación; de acuerdo con la información bibliográfica, como lo mencionan Nelson y Guillot en lo referente a lavadores, para esparcir el lodo se debe adicionar lavadores químicos, surfactantes y antiespumantes en concentraciones específicas determinadas en base a pruebas de compatibilidad entre lodos y lavadores.

La composición de la Píldora, objeto de estudio, está aún por definirse como se muestra en la Tabla 3-2, fundamentalmente es silicato de sodio en solución agua, incluyendo un antiespumante con el propósito de evitar la formación de burbujas en el proceso de bombeo, el silicato de sodio actúa dando fluidez a los lodos, para proteger las paredes de la formación y prevenir la corrosión de la tubería proporcionando un mejor agarre del cemento, como refiere Cementing Materials Manual. Considerando estas propiedades, se podría usar una concentración alta de silicato de sodio, superior al 80%, pero por limitaciones relacionadas con riesgos operacionales, se ha modificado la concentración de silicato de sodio a un 35%, como se muestra en los resultados de la Tabla 14-3.

Se usa un scavenger de 13,5ppg de densidad, preparado con cemento tipo G, la composición se detalla en la Tabla 4-2, se emplea 1,29% de retardador con el fin de evitar que el cemento fragüe en el proceso de bombeo y retorno; de acuerdo a la información bibliográfica relacionada, en Well Cementing, es conocido que el scavenger cumple la función de espaciador, removiendo el lodo y logrando compatibilidad con los fluidos posteriormente bombeados.

Tanto la **lead** como la **tail**, tienen un mecanismo similar de preparación, su densidad varía dependiendo de la cantidad de cemento empleado, es así que la lead posee 41,20% como se muestra en la Tabla 5-2 para alcanzar una densidad del 15,8ppg, mientras que la tail 47,75% para 17ppg de densidad (Tabla 6-2). Es importante mencionar que la tail a diferencia de la lead es preparada con gas blok como aglomerante y agente de peso, que permite que la tail se deposite en el fondo en la zona de producción.

Las placas fueron enumeradas, rotuladas y señaladas a 6cm de la base (hasta donde se sumerge la tubería en el fluido), para simplificar el proceso y mantener un mejor manejo en los datos y posteriormente los resultados; en la Tabla 8-2 se observan los datos de pesos iniciales de las placas de tubería, que no varían significativamente durante el proceso de realización de los ensayos (no existe corrosión). El espesor se mantiene en un valor de 6mm para todas las placas porque son obtenidas de la misma tubería de producción.

Se estandariza el lodo usado en los ensayos, consumiendo un lodo de 9,10ppg de densidad (Tabla 9-2), y 15,84 lbf/100ft² de Ty obtenido por reología (Tabla 10-2), lo que demuestra que será un lodo muy fácil de remover ya que está dentro de la última categoría (E > 30) establecida por Nelson y Guillot en Well Cementing.

Mediante las pruebas de reología tomadas a temperatura ambiente 80°F y posteriormente a temperatura de fondo de pozo 150°F, se obtiene un Ty de 25,84lbf/100ft² y 52,304cP de viscosidad para el espaciador (Tabla 12-2), Ty de 0.80 lbf/100ft² y 1,43cP de viscosidad para el lavador (Tabla 14-2), Ty de 28.42 lbf/100ft² y 32,047cP de viscosidad para el scavenger (Tabla 16-2), Ty de 34,01 lbf/100ft² de Ty y 135,113cP de viscosidad para la lead (Tabla 20-2), y Ty de 40,96 lbf/100ft² y 193.123cP de viscosidad para la tail (Tabla 25-2). Los valores son los correspondientes a temperatura de pozo 150 ° F. En general se cumple con la condición establecida por Nelson y Guillot en el estudio de la reología, en donde el Ty debe ser mayor para así desplazar al fluido anteriormente bombeado. Además como se evidencia en cada una de las tablas mencionadas, ningún fluido tiene problemas de gelificación en los periodos estáticos, es decir presentan resistencia al gel en 0sec Gel y 10min Gel.

Las lechadas de cemento cumplen con los requisitos de la norma API 10B en cuanto a no presentar agua libre ni sedimentación, como se puede ver en la Tabla 17-2 para el scavenger, Tabla 21-2 para la lead y Tabla 26-2 para la tail.

En la Figura 1-2 obtenida del software LabDB y el consistómetro 7222-216 de Chandler, se distingue 8:35 horas como el tiempo máximo de bombeo para el scavenger, la curva de color azul muestra la consistencia, la verde la presión y la roja la temperatura. Esta información está respaldada en la Tabla 2-18, cuando la lechada inicia su proceso de fragüe con consistencia de 30Bc a 8:20h y cuando se considera fraguado (imbombeable) a 70Bc de consistencia a 8:35h, tiempo suficientemente amplio para evitar el fraguado del scavenger en el transcurso de su bombeo y retorno. Cabe mencionar que el tiempo total de trabajo es de 4-5 horas.

La Figura 2-2 y la Tabla 22-2 obtenidas del software muestran un tiempo de bombeo para la lead de 7:05h, incluyendo el tiempo de pre mezcla de 1:45h a 80°F que representa el tiempo que debe mantenerse la lechada en el recirculador antes de ser bombeada, además como requisito que suele ser muy común, se realizan paradas en el bombeo de una hora aproximadamente, es por eso que ve un descenso en la viscosidad, cuando realmente sólo es el apague del motor en el caso del equipo, y de la bomba en pozo. De igual manera la Figura 4-2 y Tabla 27-2 muestran el tiempo de bombeo para la tail, el cual es menor debido a ser el último fluido bombeable.

Las Tablas 23-2 y 28-2, muestran el volumen en mL de pérdida de fluido por filtrado de la lead y la tail correspondientemente, estos valores están dentro del rango que debe tener una lechada según la norma API RP 10B e ISO 10426-2.

Las Figuras 3-2 y 5-2 muestran la resistencia a la compresión de lead y tail respectivamente, éstas provienen del software antes descrito y del equipo UCA (Ultrasonic compressive analyzer). La línea verde muestra la resistencia alcanzada por la lechada una vez fraguada, y éste valor cumple con la norma API RP 10B.

Las tablas resultantes de las pruebas de laboratorio para conocer la compatibilidad entre los fluidos de cementación a emplearse, evidencian que no existe ningún problema al combinarse, ya que como manifiesta el manual de laboratorio de Well Services, para que un fluido sea compatible, el valor de R (índice de compatibilidad) debe ser < 0 o tener un valor entre 0 a 40. En la Tabla 29-2 los valores de R son menores a 0, lo que significa que el espaciador es compatible con el lodo. La Tabla 30-

2 muestra la compatibilidad entre el scavenger y el lodo, por los valores de R menores a 0. La Tabla 31-2 para la compatibilidad entre la lead y el lodo, muestra valores de R menores a 0 y como máximo un valor de 30, que sigue siendo un valor de compatibilidad, cabe acotar que es poco probable el contacto de la lead con el lodo. La lead con el espaciador son compatibles como lo muestra la Tabla 32-2.

La píldora es compatible con el lodo, espaciador y lavador, como lo muestran las tablas 33-2, 34-2 y 35-2, respectivamente. Es innecesario realizar pruebas de compatibilidad entre la píldora y las lechadas (scavenger, lead y tail), ya que el resultado será una incompatibilidad por las reacciones que ésta produce al ponerse en contacto con el cemento, explicado en el capítulo de cemento de *Well Cementing* y posteriormente en el *Design and Control of Concrete Mixtures*.

El procedimiento pretende simular las condiciones de pozo, para esto se acondiciona los fluidos a la temperatura de 150 °F, la presión usada es la atmosférica, limitación para este procedimiento. Las demás parámetros a considerar se detallan en la Tabla 36-2 y el orden de bombeo usado en pozo en la Tabla 37-2. El volumen bombeado de cada fluido proviene de un diseño previo, el caudal es un parámetro que no se puede manipular y toma valores entre 4 a 5 barriles por minuto. Hay que tener en cuenta, que la píldora se bombea en 3er lugar, entre los lavadores por motivos de seguridad.

Una de las pruebas más contundentes para comprobar la validez de la píldora, es el ensayo realizado con un sistema sin píldora y otro con píldora al 90% en concentración de silicato de sodio, los datos obtenidos tanto en peso como en espesor se muestran en las Tablas 1-3 y 7-3 respectivamente, y los resultados en la Tabla 13-3 para el peso y Tabla 19-3 para el espesor de cemento adherido. Sin píldora se tiene un peso de 2,72g y espesor de 1,47mm de cemento, mientras que con la píldora obtenemos 4,72g y espesor 3,59 mm de cemento, existe un incremento de 2g y 2,12mm de cemento adherido a la tubería, sin dejar ningún espacio libre de cemento en la tubería.

Posterior a la verificación de validez de la píldora, se realiza un ensayo variando las concentraciones de silicato presente en la píldora, con el objeto de encontrar la concentración más idónea para el sistema, los datos obtenidos de peso y espesor de cemento adherido se muestran en las Tablas 2-3 y 8-3 respectivamente, mientras que los resultados para el peso se encuentra en la Tabla 14-3 y para el espesor en la Tabla 20-3, obteniendo los valores más altos de peso y espesor en concentraciones más altas de silicato de sodio. Esta tendencia se puede identificar en la Figura 1-3

para peso y Figura 6-3 para el espesor, estas gráficas muestran que la concentración de silicato de sodio en la píldora es directamente proporcional a la cantidad de cemento adherido a la tubería, afirmación que se respalda con la explicación de la composición química del cemento detallada por Nelson y Guillot en *Well Cementig*, además se expresa por Kosmatka, Kerkhoff & Panarese, en *Design and Control of Concrete Mixtures*, al afirmar que el silicato de sodio soluble, reacciona con la portlandita del cemento ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ y con Ca_2^+), formando silicatos de calcio del tipo (C-S-H) que presentan resistencia temprana, por lo tanto mayor cantidad de silicato de sodio, mayor formación de C-S-H gel depositado en la tubería.

Lo más idóneo sería usar una concentración por sobre el 80% en silicato de sodio, para conseguir mayor cantidad de cemento adherido, incluso bombear silicato de sodio al 100%, pero por motivos de seguridad operacional esta opción se vuelve inadecuada, además de que el silicato de sodio al ser viscoso presenta una densidad mayor y propiedades reológicas distintas a la de un fluido de cementación usado para remover los lodos. Se decide fijar como concentración de silicato de sodio para la píldora un 35% V/V, con 3,44 g y 2,38mm de cemento adherido, 0,72g y 0,91mm más de cemento adherido que el sistema sin usar píldora, la diferencia no es significativa pero se estima esta concentración debido a que entre los valores de 30% al 60% no sufre cambios relevantes, en cambio, al aumentar la concentración por sobre el 70% y de la misma manera se incrementa el riesgo, se evidencia gran cantidad de cemento adherido a la tubería. Se considera el 35% como valor idóneo por motivos de seguridad antes descritos, la píldora por su alta reactividad frente al cemento, podría ocasionar problemas catastróficos al llegarse a poner en contacto con las lechadas de cemento antes de ser bombeadas al interior del pozo o en incluso en la operación de bombeo, situación que podrían incluso parar por completo la operación de cementación implicando importantes gastos. A este nivel se toma en consideración el criterio de los ingenieros y técnicos de laboratorio, quienes manifiestan estar de acuerdo con la solución propuesta, pues, resulta manejable operacionalmente, siempre y cuando no se prescinda del lavador luego de usar la píldora.

En adelante, se establece, para todos los ensayos la concentración de 35% de silicato de sodio en la píldora. Una vez determinada esta concentración de la píldora, se busca optimizar el proceso mediante la variación de ciertas condiciones y aditivos presentes en las lechadas de cemento.

Al variar el tiempo de residencia de la píldora, con ligero aumento incrementamos en cierto grado la cantidad de cemento adherido como se muestra en las Tablas 15-3 y

21-3, es así que al mantener la tubería sumergida en la píldora por 0,16min obtenemos un peso de 3,08g y mientras que con 20min se obtiene 3,77g, es decir una diferencia de 0,69g, que no constituye una diferencia substancial, pero se mantiene la tendencia a mayor tiempo de residencia en la píldora mayor adherencia, esta tendencia se identifica en la Figura 2-3 para el peso y Figura 7-3 para el espesor . Cabe indicar que operacionalmente no es tan viable la variación de los tiempos de residencia de los fluidos de cementación, todos son bombeados continuamente y su tiempo de residencia en fondo depende del volumen del fluido, es por eso que se propuso eliminar el primer lavador y aumentar el volumen de la píldora, logrando así un mayor tiempo de contacto píldora-tubería de revestimiento.

Uno de los ensayos más contundentes y de los que se obtienen mejores resultados, es la variación del tren de los fluidos de cementación, los datos para el peso y espesor de cemento adherido se muestran en las Tablas 4-3 y 10-3 respectivamente, se demuestra la invalidez de la lechada scavenger dentro del sistema de la píldora, con el uso de scavenger se obtiene un peso de 3,08g y 2,95mm de espesor de cemento y sin este fluido se obtiene 8,25g y 6,14mm de espesor de cemento, existe una diferencia de 5,17g y 3,19mm, es decir 2,7 veces más cantidad de cemento si se prescinde de scavenger. La importancia de la lechada no es relevante, como su nombre lo dice es una lechada de sacrificio, y por su baja densidad se usa como un espaciador que remueve los fluidos que le anteceden y evita problemas de incompatibilidad con los fluidos que le preceden, esto se basa en *Well Cementing* capítulo de Lavadores. Por lo tanto al eliminar el scavenger del tren de fluidos de cementación, se disminuyen costos de producción y se mejora notablemente todo el sistema.

La densidad es un factor importante que es directamente proporcional a la adherencia de cemento en la tubería, esto se muestra en las Figuras 4-3 y 9-3 para el peso y espesor de cemento adherido respectivamente. Por ejemplo tomando los resultados de peso de la Tabla 17-3, un scavenger de 13,5ppg presenta un peso de 2,05g, mientras que una lead de 16ppg proporciona un peso de 9,34g, existe una gran diferencia de 7,29g de cemento, en estos resultados también influye las conclusiones anteriormente mencionadas acerca de la eliminación del scavenger en la aplicación directa a la lead de 16ppg, este ensayo tiene sus limitaciones, como se menciona en el Manual de Laboratorio Well Services, por lo tanto, podemos aumentar la densidad de los fluidos respetando sus propiedades reológicas y siempre y cuando sean bombeables y no representen un riesgo para la operación.

En cuanto a los aditivos presentes en las lechadas de cemento, se realizaron varios ensayos para determinar su influencia en el sistema de la píldora propuesto, en ciertas cuestiones los ensayos fueron positivos, como es el caso del controlador de pérdida de filtrado evidenciado en la Tabla 24-3 para espesor y Tabla 18-3 para peso de cemento adherido, al adicionar CF al lavador se tiene un peso de 3,12g y en la píldora se tiene 3,26g, en comparación a un sistema normal de 2.09g de cemento adherido, se aprecia un ligero aumento en el peso de cemento adherido de 0,25g en el lavador y 0,32g en la píldora. Según la categorización de los aditivos para el cemento realizada por Nelson y Guillot (en *Well Cementig*), el CF actúa como un controlador de pérdida de agua de la lechada hacia la formación, ya sea por efectos de presión o tiempos de estáticos, es por eso que al prescindir de un CF en la Lead se obtiene un peso de 1,19g de cemento adherido, es decir, menos 2,25 g de cemento, lo que evidencia no poder eliminar el CF de la Lead, volviéndose indispensable en este sistema. También se realizó pruebas para los dispersantes, pero como éstos actúan directamente sobre la viscosidad de las lechadas, obtuvimos en todos los casos sedimentación y poca adherencia de cemento.

3.4 Propuesta

Después de realizar los ensayos y respectivas pruebas de laboratorio, se propone usar una píldora de silicato al 35% en silicato de sodio, la cual aumenta en gran manera la adherencia del cemento a la tubería y a la formación, asegurando así registros de cementación que demuestran un trabajo de calidad.

Adicionalmente se propone la eliminación del primer lavador, ya que la píldora además de cumplir la función de mejorar la adherencia, funciona como un excelente lavador, por lo tanto, se sugiere aumentar el volumen de píldora para obtener un mayor tiempo de residencia en el fondo.

Y, fundamentalmente, en la optimización luego de realizar este estudio, se demuestra la invalidez del scavenger en el sistema de la píldora, al prescindir del scavenger se logra un peso de 8,25g cemento adherido a la tubería con un espesor 6,14mm de cemento, la eliminación de esta lechada, también conocida como lechada de sacrificio, asegura un mejor agarre del cemento a la tubería y con eso se alcanza buenos registros de cementación que certifiquen un trabajo de calidad.

CONCLUSIONES

- Usando una píldora al 35% en silicato de sodio, se logró optimizar el proceso de cementación, mejorando la adherencia del cemento a la tubería de producción.
- Considerando el peso de 8,25g cemento adherido a la tubería con un espesor 6,14mm de cemento al usar la píldora en comparación a un peso de 2,72g y 1,47mm de cemento adherido sin píldora, se concluye que el uso de la píldora de silicato incrementa la eficiencia de adherencia de cemento a la tubería
- Es necesaria la eliminación de la lechada scavenger para el buen desempeño de la píldora, incluso de un lavador inicial, debido a las excelentes propiedades de remoción del lodo existentes en la píldora.
- El sistema de optimización propuesto fue validado y aplicado en pozo, los registros del ANEXO C y D demuestran el buen desempeño de la píldora y lo compara con los registros antiguos en los que se obtuvieron inconvenientes (ANEXO A y B), demostrado así la validez de la optimización reflejada en un trabajo de cementación de buena calidad.
- Tanto la densidad como el controlador de pérdida de filtrado son indispensables en este sistema, sobre todo dentro de la composición de la lechada Lead ya que potencian en gran manera el rendimiento de la píldora.

RECOMENDACIONES

- Utilizar la concentración propuesta para la píldora, para minimizar los riesgos en la operación de cementación llevada a cabo en campo.
- Realizar todos los ensayos correspondientes a nivel de laboratorio, cuando se implemente nuevas tecnologías con mezclas de cementos diferentes, con el propósito de verificar el buen desempeño de la píldora.
- No prescindir de un lavador posterior al bombeo de la píldora, para precautelar la seguridad de la cementación.
- Mediante las pruebas de reología, verificar la compatibilidad de la píldora con los fluidos de perforación y cementación, especialmente con los lodos de perforación, antes de proceder a cada operación.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API RP 10B-2. *Recommended Practice for Testing Well Cements*, pp. 9-80.

ARÉVALO F., BARZALLO D., & GUERRERO R. *Metodología en Operaciones de Cementación Primaria y Forzada Utilizando Nuevas Tecnologías.*(tesis de pregrado) Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela de Ingeniería en Petróleo, Guayaquil, Ecuador.2010. pp. 10-12

DOWELL S. *Cementing Materials Manual.* México. Schlumberger 1998, pp 4-10, 25-80,104-250, 384-369.

ESTRADA P. F., & OLIVO J. C., *Análisis y Aplicación del sistema Well-Life 3 para incrementar la vida útil del cemento en pozos del Oriente Ecuatoriano.* (tesis de pregrado)Escuela Politécnica Nacional, Facultad Ingeniería en Geología y Petróleos, Escuela Ingeniería en Petróleos, Quito, Ecuador. 2009.pp. 1-38

HERNÁNDEZ J. & ORTÍZ E. *Adición de compuestos químicos para la Cementación de pozos petroleros en la etapa de Producción, región poza rica-altamira*”. (tesis de pregrado) Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Escuela de Ingeniería Química, Veracruz, México. 2011.

INTERNATIONAL STANDAR ISO 10426-1, 2.*Specification for Cements and Materials for Well Cementing Recommended Practice for Testing Well Cements*, pp. 10-96

KOSMATKA S. H., KERKHOFF B. & PANARESE W. C.[en línea]. *Design and Control of Concrete Mixtures.* Illinois-USA. Portland Cement Association 2003 [Consulta: 13 de mayo 2015]. Disponible en: <http://cement.org/bookstore/supporting/cd100/eb001frt.pdf>

MERCY L. C. *Estudio de la aplicación de un cemento autocurable y elástico para cementaciones en pozos de alto ángulo en campos de Petroamazonas.* (tesis de pregrado)Universidad Tecnológica Equinoccial, Faculta de Petróleos, Escuela de Ingeniería en Petróleos, Quito, Ecuador. pp 20-32

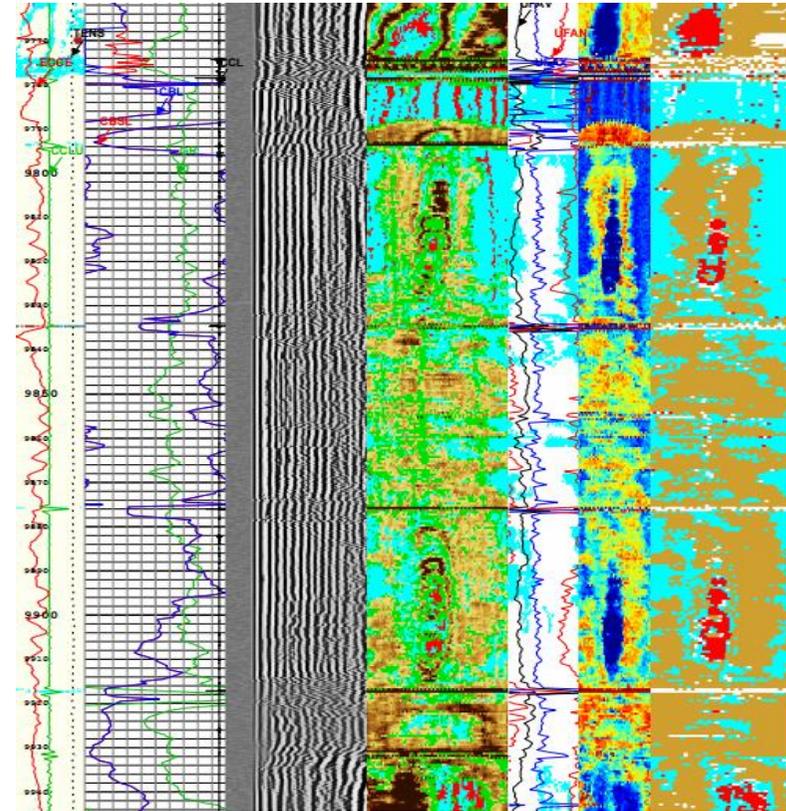
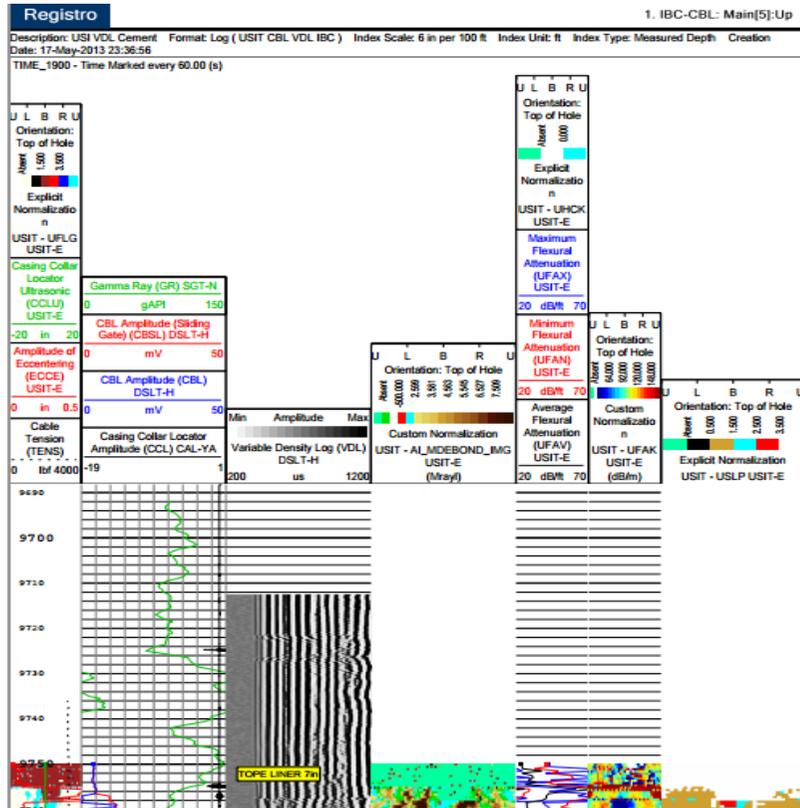
NELSON E. B. & GUILLOT D. *Well Cementing*. 2^{da} Edición. Sugar Land, Texas, USA. Schlumberger 2006, pp1-2, 23-45, 91, 143, 163-187, 549-585

SANTAMARIA S. C. [en línea]. *La normalización Nacional e Internacional de cementos*. 1982 [Consulta: 20 mayo2015]. Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/991/1048>

STEWART L. *Fracturamiento con canales de flujo abiertos*. *Oilfield Review* [en línea]. 2012 (Huston, Texas, USA) Volumen 23.No 3, pp 1-63 [Consulta: 20 mayo2015]. 11-OR-0004-S. Disponible en: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish11/aut11/01_fracturamiento.pdf

VIDELA C. *Componentes del Cemento*. Santiago de Chile, Chile. 1982, pp 15-30.

Anexo A: Registro de Cementación



NOTAS

CUADRO CATEGORIAL

ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA

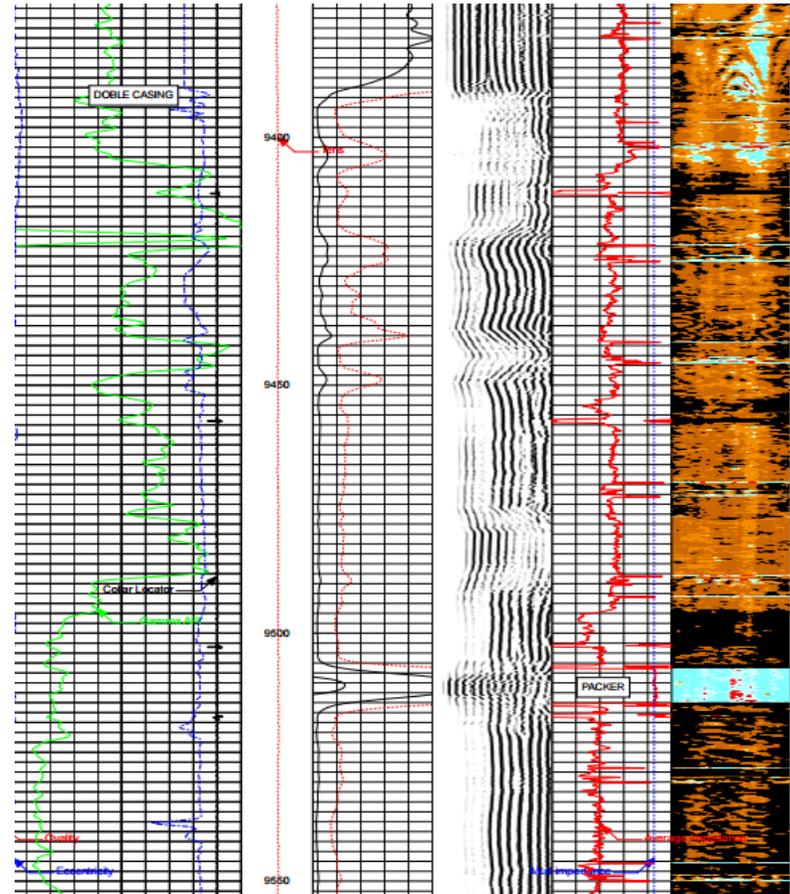
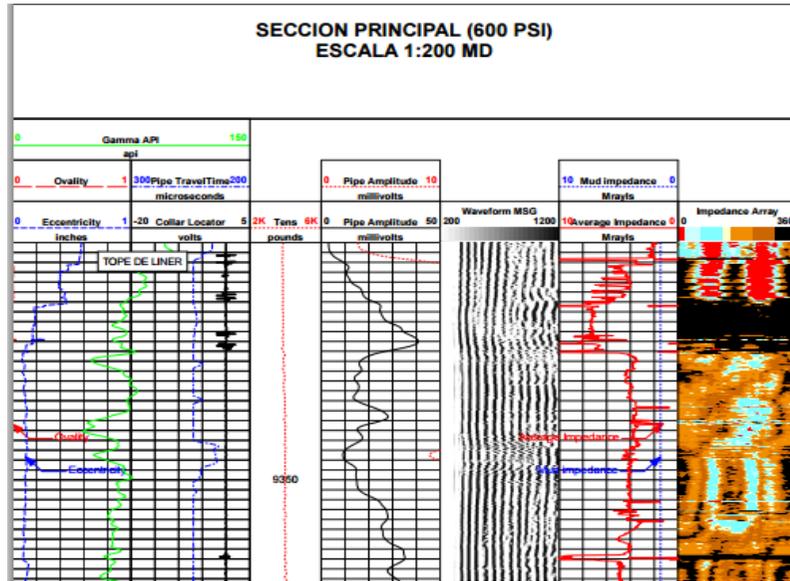
REGISTRO DE CEMENTACIÓN SIN PÍLDORA

- Por calificar Para información
- Por aprobar Para archivar
- Por eliminar Certificado

Daniel Alexander Estrella H.

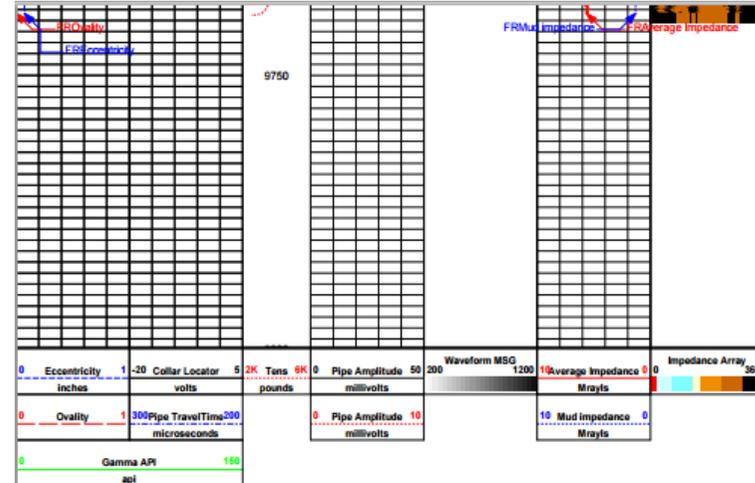
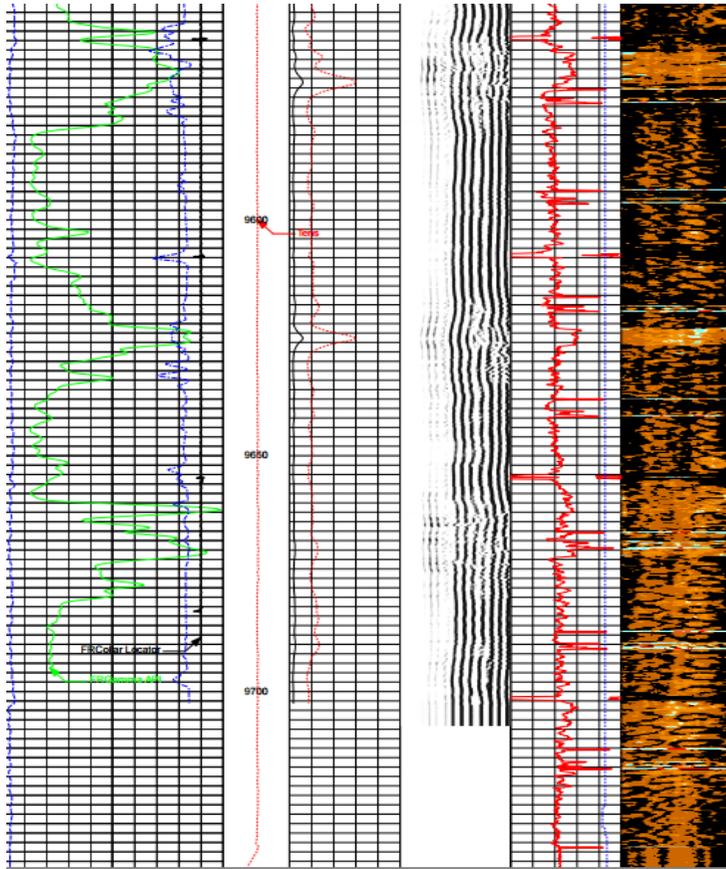
Lámina	Escala	Fecha
1		19/07/15

Anexo C: Registro de Cementación



NOTAS	CUADRO CATEGORIAL	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA	REGISTRO DE CEMENTACIÓN CON PÍLDORA		
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input checked="" type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	Daniel Alexander Estrella H.	Lámina	Escala	Fecha
			3		19/07/15

Anexo D: Registro de Cementación



NOTAS	CUADRO CATEGORIAL	ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA	REGISTRO DE CEMENTACIÓN CON PÍLDORA		
			Lámina	Escala	Fecha
	Por calificar <input type="checkbox"/> Para información <input checked="" type="checkbox"/> Por aprobar <input type="checkbox"/> Para archivar <input type="checkbox"/> Por eliminar <input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/>	Daniel Alexander Estrella H.	4		19/07/15

Anexo E: Equipos de Laboratorio

a)



b)



c)



d)



e)



NOTAS		CUADRO CATEGORIAL		ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA		EQUIPOS DE LABORATORIO		
a) Balanza	e) Estufa	Por calificar <input type="checkbox"/>	Para información <input checked="" type="checkbox"/>	Daniel Alexander Estrella H.		Lámina	Escala	Fecha
b) Mixer		Por aprobar <input type="checkbox"/>	Para archivar <input type="checkbox"/>			5		19/07/15
c) Bacth		Por eliminar <input type="checkbox"/>	Certificado <input type="checkbox"/>					
d) Calibre								

Anexo F: Fluidos de Cementación

a)



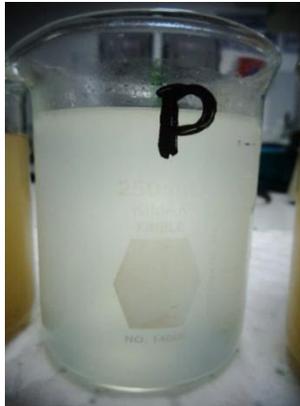
b)



c)



d)



e)



f)



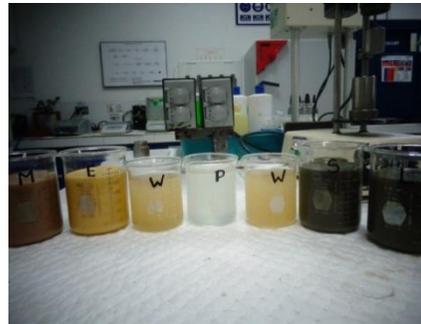
NOTAS		CUADRO CATEGORIAL		ESPOCH	FLUIDOS DE CEMENTACION		
a) Lodo	d) Píldora	Por calificar <input type="checkbox"/>	Para información <input checked="" type="checkbox"/>	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA Daniel Alexander Estrella H.	Lámina	Escala	Fecha
b) Espaciador	e) Scavenger	Por aprobar <input type="checkbox"/>	Para archivar <input type="checkbox"/>		6		19/07/15
c) Lavador	f) Lead	Por eliminar <input type="checkbox"/>	Certificado <input type="checkbox"/>				

Anexo G: Ensayos

a)



b)



c)



d)



e)



f)



NOTAS

- a) Tubería
- b) Tren
- c) Tren acondicionado
- d) Píldoras a varias
- f) Cemento seco
- e) Cemento fresco

CUADRO CATEGORIAL

- Por calificar
- Por aprobar
- Por eliminar
- Para información
- Para archivar
- Certificado

ESPOCH

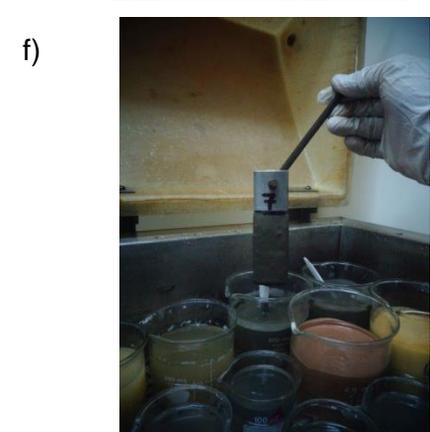
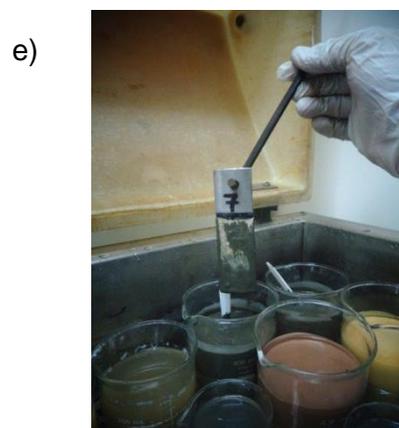
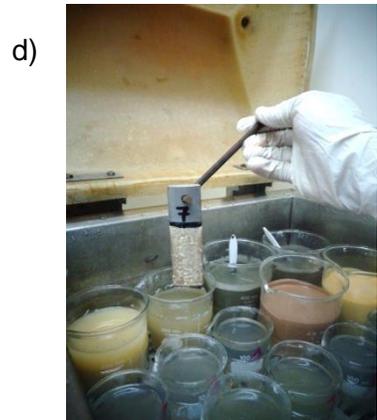
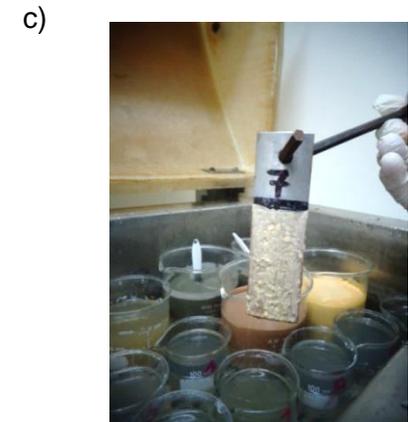
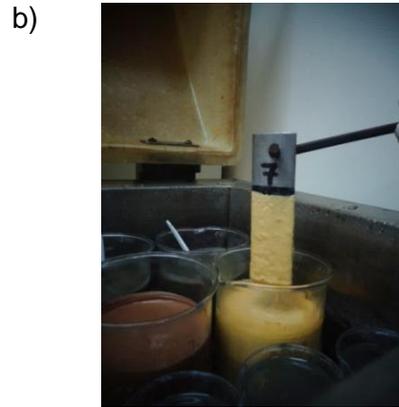
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE ING. QUÍMICA

Daniel Alexander Estrella H.

ENSAYOS

Lámina	Escala	Fecha
7		19/07/15

Anexo H: Ensayos



NOTAS		CUADRO CATEGORIAL		ESPOCH FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE ING. QUÍMICA	ENSAYOS		
a) Lodo	f) Lead	Por calificar <input type="checkbox"/>	Para información <input checked="" type="checkbox"/>	Daniel Alexander Estrella H.	Lámina	Escala	Fecha
b) Espaciador		Por aprobar <input type="checkbox"/>	Para archivar <input type="checkbox"/>		8		19/07/15
c) Píldora		Por eliminar <input type="checkbox"/>	Certificado <input type="checkbox"/>				