

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS REOLÓGICO
E HIDRÁULICO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA EN POZOS
VERTICALES.

AUTORES:

ANDRÉS FELIPE ORTIZ MENESES

MARIO FERNANDO MEZA REVELO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2013

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS REOLÓGICO
E HIDRÁULICO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA EN POZOS
VERTICALES.

AUTORES:

ANDRÉS FELIPE ORTIZ MENESES
MARIO FERNANDO MEZA REVELO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

DIRECTOR:

M. Sc. NELSON ENRIQUE QUINTERO VALERO

CO-DIRECTOR:

Téc. ALEXANDER BELTRÁN BARRERA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2013

AGRADECIMIENTOS

Al director del proyecto, Ingeniero Nelson Enrique Quintero Valero, por su apoyo y motivación durante el desarrollo del proyecto, siendo una guía constante y esencial para el éxito del mismo.

A nuestro codirector, Alexander Beltrán Barrera, por creer en nosotros y apoyarnos durante todo el proyecto, brindándonos siempre soporte y dirección.

A los Ingenieros Fernando Enrique Calvete y Herney Delgado cuyas observaciones como calificadores contribuyeron al mejoramiento del proyecto.

Al ingeniero Javier Andrés Martínez Mejía, por su colaboración en la vinculación con el proyecto de pozos profundos.

A nuestra familia y amigos, por su incondicional apoyo que de alguna u otra manera condujo a la finalización exitosa de este trabajo.

Gracias Totales.

A Dios, quien siempre ha sido mi guía y mi protector y me ha permitido culminar con éxito esta importante etapa de mi vida.

A mis padres, Rosa Margarita y Mario Fernando, por su amor, su confianza, su apoyo y sus consejos. Su esfuerzo por sacarme adelante es una de mis mayores motivaciones.

A mis hermanos, Claudia Marcela y José Alejandro, quienes ante todo son mis amigos incondicionales y me brindan siempre su amor y respeto.

A mi bisabuelo Ángel María (QEPD), por haber sido pilar fundamental de la familia y por ser un modelo a seguir.

A toda mi familia quienes me han apoyado siempre y cuyas enseñanzas han hecho de mí una persona con grandes valores.

A mis amigos y amigas, mi segunda familia, con quienes compartí inolvidables momentos a lo largo de la carrera. Sé que nuestra amistad superará el tiempo y la distancia.

A mi amigo y compañero de proyecto Andrés Felipe, su amistad es un tesoro invaluable que no se encuentra a la vuelta de la esquina.

A Diana Orfelina por su amor, su incondicional amistad, por su apoyo y por alegrar mis días con su presencia.

Mario Fernando Meza Revelo

*A Dios por darme la sabiduría para tomar las mejores decisiones,
A mi madre Mariela quién con todo su amor siempre me ha orientado,
Siendo el apoyo y la fuerza que me ha permitido alcanzar todos mis logros,
A mi padre Aníbal cuyos consejos atesoro con especial cariño,
Ya que han sembrado en mí el deseo de superarme constantemente,*

*A mi familia que siempre ha creído en mí lo que me motiva a seguir adelante
A mis amigos y amigas que con su compañía durante la universidad
Alegraron mis días, y de los cuales tuve la oportunidad
de aprender gran cantidad de cosas*

*A mi compañero y amigo Mario Fernando, Por su entrega a esta proyecto
y por su gran amistad que me ha dejado incontables enseñanzas
A Yuri Katherine por brindarme su amor, comprensión y compañía,
inspirándome y a ser cada vez mejor persona.*

Andrés Felipe Ortíz Meneses

TABLA DE CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	22
1.CEMENTO Y LECHADAS DE CEMENTACIÓN	23
1.1 CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS	23
1.2 ADITIVOS DE CEMENTACIÓN.	26
1.2.1 Aceleradores	26
1.2.2 Retardadores	26
1.2.3 Extendedores	26
1.2.4 Densificantes	26
1.2.5 Dispersantes	26
1.2.6 Agentes controladores de pérdidas de filtrado	26
1.2.7 Agentes controladores de pérdidas de circulación	27
1.2.8 Aditivos especiales	27
1.3 LECHADAS DE CEMENTACIÓN	27
1.3.1 Propiedades de las lechadas de cementación y del cemento fraguado	29
1.3.1.1 Viscosidad o consistencia	29
1.3.1.2 Contenido de agua	29
1.3.1.3 Tiempo de bombeabilidad o de fraguado	30
1.3.1.4 Densidad de la lechada	30
1.3.1.5 Pérdida de filtrado	31
1.3.1.6 Resistencia a la compresión	31
1.3.1.7 Permeabilidad	31
2. CEMENTACIÓN PRIMARIA	33
2.1 OBJETIVOS LOS DIFERENTES TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO	33
2.1.1 Tubo Conductor	34
2.1.2 Casing de Superficie	35
2.1.3 Casing Intermedio	36

2.1.4 Casing de Producción	38
2.1.5 Liner	38
2.1.5.1 Liner de producción	39
2.1.5.2 Liner de perforación	40
2.1.5.3 Conexión de liner a superficie	40
2.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN CEMENTACIÓN PRIMARIA	40
2.2.1 Zapata guía	41
2.2.2 Collar Flotador	41
2.2.3 Zapata de flotación	42
2.2.4 Tapones de Cementación	43
2.2.4.1 Tapón inferior	43
2.2.4.2 Tapón superior	43
2.2.5 Centralizadores	44
2.2.6 Raspadores	45
2.2.7 Cabezal de cementación	45
2.2.8 Colgador de Liner	45
2.2.9 Dardo de desplazamiento	45
2.2.10 Tapón de desplazamiento de Liner	46
2.3 FLUIDOS QUE INTERVIENEN EN UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA	46
2.3.1 Fluido de perforación	46
2.3.2 Fluido lavador	47
2.3.3 Fluido espaciador	47
2.3.4 Lechada inicial o de relleno	47
2.3.5 Lechada de cola	48
2.3.6 Fluido de desplazamiento	48
2.4 PROCEDIMIENTO DE UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA	48
2.4.1 Corrida de tubería de revestimiento	48
2.4.2 Circulación de lodo (acondicionamiento)	49
2.4.3 Prueba de presión	49
2.4.4 Bombeo del bache lavador y espaciador	49
2.4.5 Lanzamiento del tapón inferior	49
2.4.6 Mezcla de la lechada de cemento	49

2.4.7 Bombeo de la lechada inicial o de relleno	49
2.4.8 Bombeo de la lechada de cola o principal	50
2.4.9 Lanzamiento del tapón superior	50
2.4.10 Desplazamiento de lechadas y tapones con fluidos	50
2.4.11 Revisión de flujo de retorno	50
2.5 TIPOS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA	51
2.5.1 Cementación en una etapa	52
2.5.1.1 Cementación a través tubería de perforación	52
2.5.1.2 Cementación de Liner	52
2.5.2 Cementación multietapa	53
2.6 CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LOS FLUIDOS A DESPLAZAR	54
2.6.1 Volumen en el espacio anular	54
2.6.2 Volumen entre el collar flotador y la zapata	54
2.6.3 Volumen dentro de tubería	55
2.6.4 Volumen total de lechada a bombear	55
2.6.5 Volumen de fluido desplazante	56
2.6.6 Volumen de los baches lavador y espaciador	56
2.6.7 Volúmenes en Cementación de Liner	56
3. REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS PRESENTES EN LA OPERACIÓN DE CEMENTACIÓN PRIMARIA	58
3.1 VISCOSÍMETRO ROTACIONAL DE FANN	59
3.2 MODELOS REOLÓGICOS	60
3.2.1 Fluidos Newtonianos	60
3.2.1.1 Modelo Newtoniano	61
3.2.2 Fluidos No Newtonianos	62
3.2.2.1 Modelo Plástico de Bingham	63
3.2.2.2 Modelo Ley de potencia	65
3.3 ANÁLISIS REOLÓGICO DE LOS FLUIDOS.	68
3.3.1 Determinación del modelo reológico que mejor se ajusta al comportamiento de flujo.	68
3.3.1.1 Regresión Lineal	68

3.3.1.2 Regresión lineal en Modelo Plástico de Bingham	70
3.3.1.3 Regresión lineal en Modelo Ley de Potencia	70
4. HIDRÁULICA DE LA CEMENTACIÓN PRIMARIA	72
4.1 INFORMACIÓN REQUERIDA ANTES DE LOS CÁLCULOS	72
4.2 CÁLCULOS DE HIDRÁULICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO Y LAS PRESIONES DEL SISTEMA DURANTE LA CEMENTACIÓN.	73
4.2.1 Determinación del Régimen de Flujo	74
4.2.1.1 Velocidad media de propagación	74
4.2.1.2 Régimen de flujo para fluidos Newtonianos	75
4.2.1.3 Régimen de flujo para fluidos Ley de Potencia	77
4.2.1.4 Régimen de flujo para fluidos Plástico de Bingham	80
4.2.2 Pérdidas de presión debido a la fricción	84
4.2.2.1 Cálculo de pérdidas de presión unitarias	84
4.2.2.2 Factor de Fricción de Fanning para fluidos Ley de Potencia	85
4.2.2.3 Factor de Fricción de Fanning para fluidos Plástico de Bingham	86
4.2.3 Presión hidrostática	87
4.2.4 Presión debido a la inercia	88
4.2.5 Presión total del sistema	88
4.2.6 Densidad equivalente de circulación	89
4.3 EFECTO DE CAÍDA LIBRE O DE TUBO EN U	89
4.3.1 Comienzo y fin de la caída libre	90
4.3.2 Predicción de la caída libre	90
5. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA	92
5.1 ESTABLECIMIENTO DEL ESTADO MECÁNICO Y LAS CONDICIONES DEL POZO	92
5.2 PRUEBAS DE LABORATORIO	92
5.3 ANÁLISIS REOLÓGICO	93
5.4 DEFINIR CAUDALES DE BOMBEO	93

5.5 SIMULACIÓN MINUTO A MINUTO DE LA OPERACIÓN	94
5.5.1 Cálculos de Hidráulica	94
5.6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	94
5.6.1 Evaluación de caída libre	94
5.6.2 Evaluación de las densidades equivalentes de circulación	95
5.6.3 Evaluación del tiempo de bombeabilidad	95
5.7 MODIFICACIONES DE PARÁMETRO INICIALES DE LA OPERACIÓN Y REDISEÑO DE LABORATORIO	96
6. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE CEMSEI	100
6.1 Generalidades del Programa	100
6.1.1 Modo de operación	101
6.2 PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	102
6.2.1 Base de trabajo	102
6.2.2 Definición del estado mecánico	103
6.2.3 Definición de las propiedades de los Fluidos en la Operación	105
6.2.4 Definición de los parámetros operacionales	106
6.2.5 Formulario de Diseño de Laboratorio	108
6.2.5.1 Ajuste de la densidad a un valor determinado	109
6.2.6 Establecer Ubicación Offshore	111
6.2.7 Formulario de Análisis Reológico	113
6.2.8 Definir Parámetros de la Simulación	114
6.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	115
6.3.1 Simulación del desplazamiento de los fluidos	116
6.3.1.1 Determinación de la posición de los fluidos	117
6.3.2 Cálculo de las presiones en el sistema	120
6.3.2.1 Determinación de la presión debido a la fricción	121
6.3.2.2 Determinación de la presión hidrostática	122
6.3.2.2 Determinación de la presión debido a la inercia	122
6.3.3 Determinación del inicio de la caída libre y el caudal futuro	122
6.4 POST-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	124
6.4.1 Informe Gráfico en Excel	125

6.4.2 Visualizador	127
6.5 CONSIDERACIONES DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE	130
7. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE	131
7.1 COMPARACIÓN CON DATOS DE UN TRABAJO DOCUMENTADO	131
7.1.1 Comparación de los resultados obtenidos por SIMENTAR con los obtenidos por CEMSEI	133
7.2 VALIDACIÓN HERRAMIENTA SOFTWARE CEMSEI CON DATOS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA DEL POZO ANH PATÍA 1 STP	136
7.2.1 Información general del proyecto	136
7.2.2 Comparación de resultados de la operación de cementación	138
7.2.2.1 Caudales de salida	138
7.2.2.2 Presión en cabeza de pozo	139
7.2.2.3 Densidades Equivalentes de Circulación	140
7.2.2.4 Presión en fondo de pozo	142
7.2.3 Comparación Resultados de Análisis Reológico	142
7.3 EJERCICIOS PROPUESTOS PARA HACER USO DE LA HERRAMIENTA CEMSEI EN MATERIAS AFINES	144
7.3.1 Práctica de laboratorio	145
7.3.2 Taller de completamiento	145
CONCLUSIONES	146
RECOMENDACIONES	148
BIBLIOGRAFIA	149
ANEXOS	151

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Clasificación API de los cementos	24
Tabla 2. Requerimiento de agua de los tipos de cemento	25
Tabla 3. Ejemplos de aditivos de cementación	28
Tabla 4. Régimen de flujo Fluidos Newtonianos	76
Tabla 5. Régimen de flujo Fluidos Ley de Potencia	79
Tabla 6. Régimen de flujo Fluidos Plástico de Bingham	82
Tabla 7. Constantes A y B para Factor de fricción en flujo turbulento, Fluido Plástico de Bingham	86
Tabla 8. Datos de entrada para los casos de comparación	131
Tabla 9. Caudales de bombeo- Casos 1 y 2	133
Tabla 10. Información post-operacional ANH PATIA 1 ST P	137
Tabla 11. Caudales de bombeo	138
Tabla 12. Comparación de los parámetros reológicos calculados por CEMSEI con los proporcionados por el laboratorio	144

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Tubo Conductor	34
Figura 2. Casing de Superficie	36
Figura 3. Casing Intermedio	37
Figura 4. Casing de Producción	39
Figura 5. Liner	40
Figura 6. Zapata guía	41
Figura 7. Collar Flotador	42
Figura 8. Zapata de flotación	42
Figura 9. Tapón Inferior	43
Figura 10. Tapón Superior	44
Figura 11. Centralizadores	44
Figura 12. Raspadores	45
Figura 13. Cabezal de Cementación	46
Figura 14. Esquema final de una cementación primaria en un pozo vertical	51
Figura 15. Velocidad de corte y esfuerzo de corte	58
Figura 16. Viscosímetro rotacional de Fann	59
Figura 17. Gráfica Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, Fluidos Newtonianos	61
Figura 18. Representación Gráfica de la Viscosidad Efectiva	63
Figura 19. Comparación Modelo Plástico de Bingham	65
Figura 20. Comparación Modelo Ley de Potencia	67
Figura 21. Caudales vs Tiempo	91
Figura 22. Diagrama de flujo metodología	97
Figura 23. Formulario Base	103
Figura 24. Formulario Definir Estado Mecánico	104
Figura 25. Esquema del sistema 1D almacenado	105
Figura 26. Formulario Definir propiedades de los Fluidos	106
Figura 27. Formulario de entrada de los parámetros operacionales	107
Figura 28. Formulario de Diseño de laboratorio	108

Figura 29. Formulario para establecer una ubicación offshore	111
Figura 30. Confirmación de la que la ubicación offshore fue establecida	112
Figura 31. Formulario de Análisis Reológico	113
Figura 32. Formulario para definir los parámetros de Simulación	115
Figura 33. Esquema del balance de volumen	118
Figura 34. Diagrama de flujo para obtener el porcentaje de llenado de un fluido	119
Figura 35. Informe en Excel- Hoja de Resumen	125
Figura 36. Gráfica de densidad equivalente de circulación en el informe	126
Figura 37. Visualizador mostrando la posición de los fluidos	128
Figura 38. Visualizador mostrando el régimen de flujo	129
Figura 39. Comparación de resultados caso 1	134
Figura 40. Comparación de resultados caso 2	134
Figura 41. Resultados CEMSEI usando diferentes modelos reológicos	135
Figura 44. Caudal de entrada y salida ANH PATIA 1 ST P	139
Figura 45. Presión en cabeza ANH PATIA 1 ST P	140
Figura 46. Densidad equivalente de circulación ANH PATIA 1 ST P	141
Figura 47. Presión en fondo ANH PATIA 1 ST P	142
Figura 48. Análisis reológico de la lechada utilizada en el pozo ANH PATIA 1 ST P	143

LISTA DE ANEXOS

	Página
ANEXO A: Práctica Propuesta – Reología e Hidráulica de Lechadas de Cemento	153
ANEXO B: Taller de Completamiento – Cementación Primaria - Tema A	155
ANEXO C: Taller de Completamiento – Cementación Primaria - Tema B	157
ANEXO D: Reporte Post Operacional Cementación Rev. 20” Pozo ANH PATIA 1 ST P	159

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE PARA EL ANÁLISIS REOLÓGICO E HIDRÁULICO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA EN POZOS VERTICALES.*

AUTORES: ANDRÉS FELIPE ORTIZ MENESES
MARIO FERNANDO MEZA REVELO**

PALABRAS CLAVES: Cementación Primaria, Software, Reología, Hidráulica, Lechada de cemento, Caída Libre.

DESCRIPCIÓN

En la planificación de las actividades de cementación primaria, debido a la complejidad de los cálculos que se realizan durante esta etapa, es necesario implementar un software que permita, mediante un análisis reológico e hidráulico, predecir entre otras cosas, el tiempo que tardará la operación, las presiones en diferentes partes del sistema, el caudal para alcanzar el flujo turbulento, el efecto de la caída libre y la cantidad de materiales requeridos.

Debido a esto se crea la herramienta software CEMSEI, la cual es una herramienta con énfasis académico que permitirá al usuario planear operaciones de cementación primaria de una manera sencilla, guiándolo durante la entrada de datos y dándole una breve explicación de por qué son necesarios. Por medio de un análisis hidráulico de los fluidos en el sistema, el programa simulará la operación y permitirá predecir las condiciones que prevalecerán en el pozo a lo largo de esta, de manera que el usuario será capaz de determinar si con el diseño de la operación propuesto se podrá realizar el trabajo sin que se generen problemas.

Por otro lado, se plantea una metodología para diseñar lechadas de cementación primaria, la cual va desde las pruebas de laboratorio hasta la simulación de la operación de desplazamiento de los fluidos hacia el pozo, con el fin de cementar el espacio anular; la metodología incluye un análisis de los resultados obtenidos para determinar si la de cementación será exitosa bajo los esquemas de operación planteados por el usuario.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: M.Sc. Nelson Enrique Quintero Valero, Codirector: Téc. Alexander Beltrán Barrera.

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A SOFTWARE TOOL FOR RHEOLOGICAL AND HYDRAULIC ANALYSIS OF PRIMARY CEMENTING SLURRIES IN VERTICAL WELLS *

AUTHORS: ANDRÉS FELIPE ORTIZ MENESES
MARIO FERNANDO MEZA REVELO**

KEY WORDS: Primary Cementing, Software, Rheology, Hydraulic, Cement Slurry, Free Fall.

DESCRIPTION

In the planning of primary cementing activities, due to the complexity of the calculations made during this stage, it is necessary to implement a software which allows, through a rheological and hydraulic analysis, to predict, among other things, the time of the whole operation, the pressures on different parts of the system, the rate to achieve turbulent flow, the free-fall effect and the quantity of required materials.

Because of this, it is developed the software tool CEMSEI, which is a tool with academic emphasis that allows the user planning primary cementing operations in an easy way, orienting him during the data input, and giving him a brief explanation of why they are important. Through a hydraulic analysis of the system fluids, the program will simulate the operation and will allow predicting the conditions which will prevail in the well along it, so that the user will be able to determine if with the proposed design of the operation it will be possible to made the work without problems.

On the other hand, it is established a methodology to design primary cementing slurries, which extends from the laboratory tests to the simulation of the displacement operation of the fluids to the well, in order to cement the annular space; the methodology includes an analysis of the obtained results to determine if the cementing will be successful under the operation schemes established by the user.

* Grade Project.

** Faculty of Physical -Chemical Engineering. Petroleum Engineering. Director: M.Sc. Nelson Enrique Quintero Valero, Co-director: Tec. Alexander Beltrán Barrera.

INTRODUCCIÓN

En la planificación de las actividades de cementación primaria, debido a la complejidad de los cálculos que se realizan durante esta etapa, es necesario implementar un software que permita, mediante un análisis reológico e hidráulico de los fluidos presentes, predecir entre otras cosas, el tiempo que tardará la operación, las presiones en diferentes partes del sistema y la cantidad de materiales requeridos. Debido a esto se crea la herramienta software CEMSEI, la cual es una herramienta con énfasis académico que permitirá al usuario planear operaciones de cementación primaria de una manera sencilla, guiándolo durante la entrada de datos y dándole una breve explicación de por qué son necesarios.

El presente libro consta de siete capítulos, en los cuales se muestra primero las bases teóricas acerca de cementación, reología e hidráulica y posteriormente se presenta todo lo referente al desarrollo de la herramienta software, sus características y la validación de su funcionamiento. Los primeros capítulos proporcionan ciertas bases acerca de lo que son las lechadas de cemento y sus propiedades, y se presenta de una manera sencilla lo que es la cementación primaria, sus diferentes objetivos, y los fluidos que intervienen durante su ejecución.

El tercer capítulo contiene la descripción de lo que es un análisis reológico y se describen las expresiones utilizadas para realizar dicho análisis a un fluido de interés. Por su parte, el cuarto capítulo muestra lo relacionado a la hidráulica de la cementación primaria.

Posteriormente se propone la metodología de diseño de la operación de cementación primaria y se muestra la descripción de la herramienta desarrollada y su modo de funcionamiento; finalmente en el séptimo y último capítulo se valida el funcionamiento de la herramienta.

1. CEMENTO Y LECHADAS DE CEMENTACIÓN

El cemento se puede definir como “todo material que tiene propiedades adhesivas o cohesivas que en contacto con el agua se solidifica y endurece”¹. En la industria petrolera, el cemento usado comúnmente es el cemento Portland, el cual consiste principalmente de diferentes porcentajes de: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico, ferroaluminato tetracálcico, yeso y magnesio; a su vez, una lechada de cementación es la mezcla de agua, cemento y aditivos de cementación.

El cemento portland es considerado un cemento hidráulico, ya que está diseñado para fraguar y desarrollar una fuerza compresiva como resultado de la hidratación², es decir, se endurece cuando al hidratarse se presentan reacciones químicas entre el agua y los componentes del cemento, pero este fraguado y endurecimiento no solamente ocurre si la mezcla de cemento y agua se deja estática en el aire, sino también cuando se pone la lechada en contacto con agua. El cemento ya fraguado tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, lo que quiere decir que su exposición a esta no afectará sus propiedades.

1.1 CLASIFICACIÓN API DE LOS CEMENTOS

Los cementos Portland usualmente son fabricados para cumplir ciertas especificaciones físicas y químicas que dependen de su aplicación. Existen varias agencias que estudian y hacen las especificaciones para la fabricación de los cementos Portland; las más conocidas en la industria del petróleo son la ASTM (American Society for Testing Materials), que trata con cementos para uso en construcción, y el API (American Petroleum Institute), que escribe especificaciones para cementos utilizados solamente en pozos.

¹ RODRÍGUEZ, Eliserio. Reestructuración Teórico - Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas.101p.

² NELSON, Erik B. Well Cementing. Texas: Schlumberger Educational Service 1990, cap 2-1p

Las normas ASTM se refieren al TIPO de cemento, mientras que las normas API se refieren a la CLASE del cemento.

La ASTM clasifica los cementos en cinco tipos: Tipo I, II, III, IV y V, los cuales son fabricados para uso a condiciones atmosféricas, sin estar sujetos a amplios rangos de presión y temperatura; por otra parte el API proporciona especificaciones con ocho clases de cementos para uso en pozos, desde la clase A hasta la H. Los cementos tipo I, II y III de la ASTM corresponden a los cementos clase A, B y C del API; los cementos tipo IV y V de la ASTM no tienen una correspondiente clase API.³

A continuación se muestra una tabla con la clasificación de cementos del sistema API; cada clase de cemento está organizada de acuerdo a la profundidad máxima a la que los cementos pueden ser colocados y las temperaturas a las que son expuestos:

Tabla 1. Clasificación API de los cementos

CLASE DEL CEMENTO	PROFUNDIDAD MÁXIMA	TEMPERATURA ESTÁTICA MÁXIMA	PROPIEDADES ESPECIALES
A ó Tipo I	6000 Ft	80-170 °F	No se requieren propiedades especiales
B ó Tipo II	6000 Ft	80-170 °F	Moderada resistencia a los sulfatos
C ó Tipo III	6000 Ft	80-170 °F	Alta resistencia a la compresión temprana, moderada-alta resistencia a los sulfatos
D	6000-12000 Ft	170-260 °F	Presión moderada, moderada-alta resistencia a los sulfatos
E	10000-14000 Ft	170-290 °F	Alta presión, moderada-alta resistencia a los sulfatos
F	10000-16000 Ft	230-320 °F	Alta presión, moderada-alta resistencia a los sulfatos
G y H	8000 Ft	80-200 °F	Disponibles en moderada-alta resistencia a los sulfatos

Fuente: SMITH, Dwight. Cementing, Ed. 2. p 10. Modificada

Los cementos clase G y H son los más usados comúnmente en cementación de pozos; pueden ser empleados desde superficie hasta una profundidad de 8000 ft tal y como se fabrican, o se pueden modificar con aceleradores y retardadores, de tal manera que

³ SMITH, Dwight. Cementing, Ed. 2. New York City: Society of Petroleum Engineers Inc. 1990. p 8-9

puedan trabajar en un amplio rango de presión y temperatura. Están disponibles con moderada y alta resistencia a los sulfatos.

Cada tipo de cemento requiere diferentes cantidades de agua para producir lechadas de densidades determinadas, la siguiente tabla muestra los requerimientos de agua de los diferentes cementos sin aditivos y la densidad de la lechada que se produce:

Tabla 2. Requerimiento de agua de los tipos de cemento

Clase API del cemento	Requerimiento de agua [gal/Saco]	Densidad de la lechada [Lb/gal]
A	5,2	15,6
B	5,2	15,6
C	6,3	14,8
D	4,3	16,4
E	4,3	16,4
F	4,3	16,4
G	5	15,8
H	4,3	16,4

Fuente: CAMPOS, Israel, GUEVARA, Dani, ARMAS, Diego. “Metodología en Operaciones de Cementación Primaria y Forzada utilizando nuevas tecnologías”, 29p. Modificada.

De acuerdo con la literatura, “las composiciones químicas de los cementos clase G y H son esencialmente idénticas, la principal diferencia es el área superficial. El cemento clase H es significativamente más grueso que el clase G, lo cual se evidencia en sus diferentes requerimientos de agua.”⁴

⁴ NELSON, Erik B. Well Cementing. Texas: Schlumberger Educational Service 1990, cap. 2-13p

1.2 ADITIVOS DE CEMENTACIÓN.

En la cementación de pozos, las lechadas de cemento necesitan trabajar en amplios rangos de presión, temperatura y profundidad y cumplir con ciertas condiciones para lograr adecuadamente los objetivos de la cementación de cada pozo en específico. El cemento por sí solo no puede cumplir todos los requerimientos ante las condiciones de exposición de la lechada, pero es posible cumplir con tales condiciones mediante la adición de aditivos. Los aditivos de cementación son aquellos que se adicionan al cemento para modificar sus propiedades y su comportamiento.

Existen diferentes tipos de aditivos de cementación que pueden afectar las propiedades de las lechadas y del cemento fraguado en muchas formas; generalmente se reconocen 8 categorías de aditivos⁵:

1.2.1 Aceleradores: Son productos químicos que reducen el tiempo de fraguado de las lechadas de cemento e incrementan la velocidad de desarrollo de resistencia compresiva.

1.2.2 Retardadores: son productos químicos que extienden el tiempo de fraguado de las lechadas de cemento.

1.2.3 Extendedores: son materiales que disminuyen la densidad de las lechadas de cemento y/o reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen de producto fraguado.

1.2.4 Densificantes: son materiales que aumentan la densidad de las lechadas de cemento.

1.2.5 Dispersantes: son materiales químicos que reducen la viscosidad de las lechadas de cemento.

1.2.6 Agentes controladores de pérdidas de filtrado: controlan la pérdida de la fase acuosa de las lechadas de cemento cuando estas se exponen a zonas permeables.

⁵ NELSON, Op. cit., Cap. 3-1p.

1.2.7 Agentes controladores de pérdidas de circulación: son materiales que controlan la pérdida de lechada de cemento hacia zonas débiles de la formación o fracturas.

1.2.8 Aditivos especiales: son aditivos complementarios para la cementación, tales como antiespumantes, descontaminantes de lodo, entre otros.

En la Tabla 3 se muestran ejemplos de cada categoría de aditivos y propiedades de cada uno como la gravedad específica, la densidad aparente y el requerimiento de agua.

1.3 LECHADAS DE CEMENTACIÓN

La mezcla de agua, cemento y aditivos de cementación da como resultado una lechada de cementación. Las lechadas poseen diferentes características que dependen de las condiciones del pozo y del tipo de proyecto de cementación, pero en general una adecuada mezcla de agua cemento y aditivos debe:

- Generar una lechada con una densidad determinada y exhibir las propiedades deseadas.
- Ser fácilmente mezclada y bombeada.
- Reunir propiedades óptimas para una adecuada remoción de lodo.
- Mantener sus características fisicoquímicas durante la colocación.
- Desarrollar una rápida resistencia a las fuerzas de compresión una vez haya sido colocada en la zona de interés.
- Una vez fraguada, tener una permeabilidad lo más baja posible.
- Desarrollar resistencia a largo plazo y soportar elevadas condiciones de presión y temperatura sin perder sus propiedades.

Tabla 3. Ejemplos de aditivos de cementación

ADITIVO	GRAVEDAD ESPECÍFICA	DENSIDAD APARENTE [Lb/ft ³]	REQUERIMIENTO DE AGUA
			[Gal/Saco]
ACELERADOR			
Cloruro de Calcio (CaCl ₂)	1.75-1.96	50	0
Mezcla de NaCl, CaCl ₂	2.0	50	0
Mezcla de CH ₄ Cl, CaCl ₂	2.0	50	0
Silicato de Sodio	2.62	60	0
RETARDADOR			
Lignosulfonato de Calcio	1.5-1.56	35	0
CMHEC (Carboximetil Hidroxietil Celulosa)	1.36	29	0-0.7%
Borax	1.73	65	0
EXTENDEDOR			
Bentonita	2.65	60	1.3
Tierra Diatomacea	2.10	16.7	61.3
Puzzolana	2.46	74	3.6
Puzzolana y Bentonita	2.89	87	10.9
Metasilicato de Sodio Anhidro	2.40	150	6-6.8
MATERIAL DENSIFICANTE			
Barita	4.25	135	2.4
Hematita (óxido de hierro)	4.93-5.02	165-193	0-0.36
ADITIVO PARA PÉRDIDA DE FILTRADO			
CMHEC (Carboximetil Hidroxietil Celulosa)	1.36	29	0-7%
Polímeros Orgánicos	1.22	37-40	0
Mezcla de Polímeros Orgánicos	1.31	40	0
ADITIVOS PARA PÉRDIDAS DE CIRCULACIÓN			
Gilsonita	1.07	50	2.0
Cáscara de Nuez	1.28	50	2.0
Perlita Expandida	2.40	8	29.9
Perlita Semi Expandida	2.40	43	44.8

Fuente: Modificada de: SUMAN, George "World's Oil Cementing Oil and Gas Wells", 1977.

1.3.1 Propiedades de las lechadas de cementación y del cemento fraguado. Antes de que la lechada de cemento sea bombeada hacia el pozo se deben realizar varias pruebas de laboratorio con el fin de asegurar que la lechada cumpla con las condiciones requeridas, además las propiedades que se determinan pueden servir para predecir el comportamiento de la lechada durante el bombeo y del cemento fraguado después de la colocación.⁶

Las siguientes son algunas de las propiedades de las lechadas de cementación y del cemento fraguado determinadas en laboratorio y algunos factores que influyen en el diseño de las mismas:⁷

1.3.1.1 Viscosidad o consistencia. En cementación primaria, una lechada de cemento debe tener una viscosidad o consistencia que permita el más eficiente desplazamiento de lodo y también que permita una buena adherencia entre la formación y la tubería de revestimiento. La consistencia del cemento se mide con un aparato llamado consistómetro y sus unidades son la unidades Beardon de consistencia.

1.3.1.2 Contenido de agua. Para lograr la viscosidad adecuada, el cemento se debe mezclar con una cantidad de agua que proporcione un volumen de fraguado igual al volumen de la lechada sin que se separe agua libre. El agua libre es aquella que se desprende de la lechada debido a la interacción entre las partículas del cemento a través de fuerzas electrostáticas; tal interacción forma una estructura floculada que soporta el peso de una partícula dada, entonces, el peso de las partículas se transmite al fondo y el agua es forzada a salir de la parte más baja de la lechada y se acomoda en las capas superiores que sufren menor esfuerzo, pero la capacidad de las capas superiores para mantener en mezcla el agua adicional es limitada, por lo cual se formará una capa de agua en la parte superior de la lechada.⁸

La cantidad de agua a mezclar está influenciada por el tamaño de las partículas del cemento, el área superficial y los aditivos a utilizar. En términos generales, se conocen los siguientes tipos de contenido de agua:

⁶ SMITH, Op. cit., 42p.

⁷ SMITH, Ibid., 44p.

⁸ NELSON, Op. cit., Cap. 3-23p

- Agua máxima: es la cantidad de agua que al ser mezclada con cemento producirá un volumen de fraguado igual al volumen de la lechada, con una separación de agua libre mayor a 1.5%.
- Agua normal: es la cantidad de agua de mezcla que proporcionará una lechada de 11 unidades Beardon de consistencia después de 20 minutos de agitación. El agua normal es algunas veces llamada “agua óptima”, porque proporciona una buena lechada para ser bombeada.
- Agua mínima: es la cantidad de agua de mezcla que producirá una lechada de 30 unidades Beardon de consistencia después de 20 minutos de agitación. Esta lechada puede ser usada para control de pérdidas de circulación.

1.3.1.3 Tiempo de bombeabilidad o de fraguado. es el tiempo transcurrido desde que se aplica presión y temperatura inicial a una lechada de cemento y el momento en el que esta alcanza una consistencia de 100 unidades Beardon de consistencia; en otras palabras, es el tiempo en el que la lechada podrá fluir bajo condiciones determinadas de presión y temperatura. Se mide con un consistómetro HPHT.

1.3.1.4 Densidad de la lechada. Es uno de los parámetros más importantes en el diseño de lechadas de cemento; en pozos con presiones bajas o que presenten problemas de pérdida de circulación, la densidad de la lechada debe ser suficientemente liviana para que la presión hidrostática no ocasione daños a la formación; por otro lado, en pozos con presiones altas, la densidad de la lechada debe ser suficientemente alta para evitar que se presenten reventones durante la cementación. Para asegurar un adecuado desplazamiento del lodo de perforación, la densidad de la lechada debe ser mayor. La densidad de la lechada se controla añadiendo diferentes aditivos: para disminuir la densidad se adicionan materiales que requieren grandes cantidades de agua de mezcla (extendedores) y para aumentar la densidad de la lechada se adicionan materiales densificantes. En laboratorio o en campo, la densidad se mide mediante balanzas de densidad de fluidos ó mediante densímetros.

1.3.1.5 Pérdida de filtrado. Cuando las lechadas están expuestas ante un medio permeable, a determinada presión, generalmente parte del fluido se pierde hacia el medio; controlar las pérdidas de filtrado en las lechadas de cemento es muy importante, ya que las variaciones en el contenido de agua de las lechadas afectan ciertas características como el tiempo de espesamiento y la viscosidad, lo que genera una rápida depositación del cemento, restringiendo el flujo. Para medir las características de filtración de las lechadas se utiliza una Filtro prensa API, durante 30 minutos y con un diferencial de presión de 100 o 1000 psi a través de un filtro 325 Mesh sobre un filtro 60 Mesh que hace las veces de medio de filtración^{9,10}. Los agentes controladores de pérdidas de filtrado se utilizan cuando hay muy poca o ninguna torta de lodo en las paredes de la zona del pozo a cementar, ya que la torta ayuda a controlar las pérdidas de filtrado hacia la formación.

1.3.1.6 Resistencia a la compresión. Es el esfuerzo que ofrece el cemento fraguado a ser comprimido. En condiciones normales, el cemento fraguado está sometido a fuerzas compresivas horizontales, generadas por la presión de poro de la formación, y a fuerzas de tensión verticales generadas por el peso de la tubería de revestimiento. Debido a que las pruebas de resistencia del cemento están enfocadas en las fuerzas de compresión, los valores de fuerzas de tensión se deben convertir a compresión; una regla general en cementación de pozos dice que la resistencia a la compresión es de 8 a diez veces mayor que la resistencia a la tensión; por ejemplo, 8 psi de tensión serán equivalentes a 80 o 100 psi de compresión¹¹. La resistencia a la compresión del cemento fraguado se mide mediante una cámara de curado o mediante un Analizador Ultrasónico de Cemento.

1.3.1.7 Permeabilidad. Cuando el cemento ya está fraguado, se requiere que tenga la menor permeabilidad posible, de tal manera que los fluidos de la formación queden completamente aislados del pozo. La medición de la permeabilidad se hace tanto al agua como al gas; la prueba se realiza a un núcleo de cemento fraguado mediante un permeámetro, el cual mide la tasa de flujo a través de la longitud del núcleo a un diferencial de presión dado.¹²

⁹ SMITH, Op. cit., 53p.

¹⁰ SUMAN, George. ELLIS, Richard. World Oil's Cementing Handbook: Including Casing Handling Procedures. Houston, Texas: Gulf Publishing Compan, 1977. 26p.

¹¹ SMITH, Op. cit., 47p

¹² Ibid., 53p.

Una mayor información acerca de las propiedades de las lechadas de cementación y del cemento fraguado, y de las pruebas de laboratorio para su determinación se encuentra en el Documento “Diseño de Laboratorio” disponible en el menú “Ayuda” del software CEMSEI.

2. CEMENTACIÓN PRIMARIA

La cementación primaria es el proceso que consiste en ubicar cemento en el espacio anular entre la tubería de revestimiento y la formación¹³. La lechada de cemento es bombeada a través de la sarta de revestimiento a ser cementada, sale por el fondo y al mismo tiempo desplaza el lodo de perforación ubicado delante de ella mientras se mueve por el espacio anular.

En términos generales, los principales objetivos de esta operación son:

- Aislar la cara del pozo de las formaciones que pueden poseer agua, gas o aceite.
- Proporcionar estabilidad a la formación
- Ayudar a soportar el peso de la tubería de revestimiento
- Ayudar a controlar la corrosión en el área cementada.

Estos objetivos se alcanzan exitosamente cuando el trabajo de cementación logra cumplir con los siguientes requerimientos: que haya una remoción efectiva del lodo de perforación, que resulta en una completa envoltura de cemento en el anular; que se alcance un sello hidráulico que proporcione un adecuado aislamiento de zonas, para lo cual, como se mencionó antes, se requiere una muy baja permeabilidad del cemento fraguado; que el tope del cemento (TOC) cumpla con el diseño.

2.1 OBJETIVOS LOS DIFERENTES TIPOS DE TUBERÍAS DE REVESTIMIENTO (CASING)

La utilización de una tubería de revestimiento determinada depende de las condiciones del pozo y de los requerimientos operacionales, ambientales y de seguridad. El número total de tuberías de revestimiento y su configuración se determina a partir de la ventana de presión de fractura y de poro de las formaciones perforadas y las limitaciones físicas de las tuberías de revestimiento ante las condiciones del pozo.

¹³ NELSON, Op. cit., 1p.

A continuación se presentan las funciones de los diferentes tipos de casing, las profundidades normales de asentamiento y algunas consideraciones especiales para cada uno:¹⁴

2.1.1 Tubo Conductor. El tubo conductor es la primera tubería de revestimiento y normalmente es la más corta (Figura 1). Esta tubería sirve para evitar que los fluidos de perforación contaminen las arenas poco profundas y para ayudar a prevenir derrumbes que pueden ocurrir fácilmente cerca a la superficie debido a la presencia de estratos no consolidados de roca. El tubo conductor ayuda a proteger las tuberías de revestimiento siguientes de la corrosión y puede ser usado para soportar parte del peso de la cabeza del pozo cuando el soporte del suelo es inadecuado.

Figura 1. Tubo Conductor



Fuente: Schlumberger, "Introduction to Cementing", JET 14

El diámetro de este tipo de tubería está entre 16 y 30 pulgadas y generalmente se asienta a una profundidad entre 30 y 300 pies.

La cementación del tubo conductor se realiza generalmente a través de una tubería de perforación (Drillpipe), lo cual ayuda a evitar la contaminación de la lechada dentro de la

¹⁴ NELSON, Op. cit., p 1-5

tubería de revestimiento y se reduce significativamente el volumen de fluido desplazante. Debido a los grandes derrumbes que pueden producirse en las formaciones poco consolidadas, es normal utilizar volúmenes de lechada en exceso mayores a 100%.

Las tuberías de revestimiento de grandes diámetros están sometidas a una fuerza de flotación demasiado grande debido a la presión que actúa en el área de la cabeza de cementación. Si la presión es suficientemente grande, se puede exceder el peso de boyanza de la tubería de revestimiento y esta puede ser expulsada del pozo. Este problema también se evita mediante la cementación a través de tubería de perforación.

2.1.2 Casing de Superficie. Esta tubería de revestimiento es la segunda en asentarse y al igual que el tubo conductor sirve para aislar las formaciones no consolidadas y evitar la contaminación de posibles acuíferos presentes a poca profundidad. Generalmente, el casing de superficie (Figura 2) es la primera tubería de revestimiento a la que se le conectan las válvulas preventoras BOP, por lo tanto, esta tubería debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las presiones de gas y fluidos que pueden ser encontrados durante la perforación. Este casing también soportará parte del peso de las siguientes tuberías de revestimiento que se corran dentro del pozo y el equipo de completamiento.

El diámetro externo de esta tubería generalmente está entre $9^{5/8}$ y 20 pulgadas y la profundidad de asentamiento está entre 100 y 5000 pies.

Para la cementación de esta tubería generalmente se utiliza el mismo método que para el tubo conductor, es decir, se cementa a través de la tubería de perforación (Drillpipe), ya que de esta manera se ahorra tiempo y volumen de desplazamiento y hay un menor riesgo de canalización y contaminación de la lechada de cementación.

Debido a los derrumbes que se presentan en las formaciones no consolidadas, es difícil determinar el diámetro exacto del hueco abierto, por lo cual generalmente se utilizan excesos de lechada entre 50% y 100%.

Figura 2. Casing de Superficie

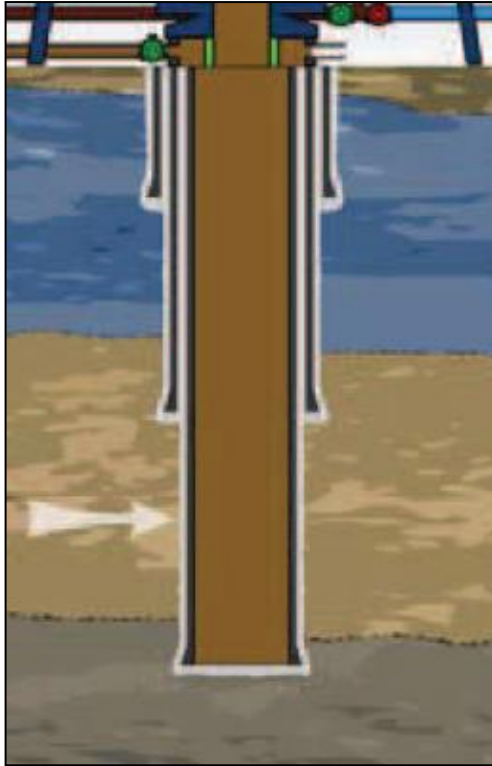


Fuente: Schlumberger, “Introduction to Cementing”, JET 14

Las lechadas utilizadas para la cementación del casing de superficie se deben desplazar completamente por el espacio anular y deben desarrollar resistencia a la compresión rápidamente, para de esta manera minimizar el tiempo de perforación.

2.1.3 Casing Intermedio. Este tipo de tubería de revestimiento se utiliza para mantener la integridad del pozo a medida que va aumentando la profundidad de perforación. El casing intermedio (Figura 3), algunas veces es la sección de tubería de revestimiento más larga que se corre dentro del pozo. Este casing se emplea para sellar zonas débiles que se pueden fracturar con la alta densidad del lodo, que usualmente se necesita al aumentar la profundidad el pozo, para aislar de zonas de pérdida de circulación, secciones salinas, secciones con lutitas y para evitar condiciones en fondo o superficie que puedan dificultar la continuidad de la operación de perforación.

Figura 3. Casing Intermedio



Fuente: Schlumberger, "Introduction to Cementing", JET 14

Los diámetros y la profundidad de asentamiento de este tipo de casing varían de un operador a otro. Generalmente los diámetros externos más utilizados son los siguientes: $13^{3/8}$, $10^{3/4}$ y $9^{5/8}$ pulgadas y la profundidad de asentamiento varía entre 1000 y 15000 pies.

La tubería de revestimiento intermedia se puede cementar hasta superficie o hasta la profundidad de asentamiento de la zapata del casing anterior, todo depende de los requerimientos del proyecto, de la presión de fractura de la formación, entre otros aspectos.

Cuando la sección a cementar es muy larga y hay formaciones con gradientes de fractura bajos, la operación de cementación se puede hacer en dos etapas. Las características de las lechadas de cementación a usar dependen de las condiciones del pozo, pero generalmente se usan lechadas dispersas con aditivos para el control del filtrado.

2.1.4 Casing de Producción. El asentamiento y la cementación de este casing es una de los principales objetivos en la perforación de un pozo. Normalmente es el último casing que se asienta en el pozo y está sujeto a altas condiciones de presión y temperatura, por lo cual debe ser diseñado para soportar tales condiciones.

A parte de servir como elemento de soporte del hueco, el casing de producción (Figura 4) cumple con otras funciones:

- Aislar la formación productora de otras formaciones y de los fluidos que estas contienen.
- Actuar como casa protectora de los equipos de completamiento, tales como el tubing y elementos de los sistemas de levantamiento artificial.
- Proteger tuberías de revestimiento intermedias en mal estado.

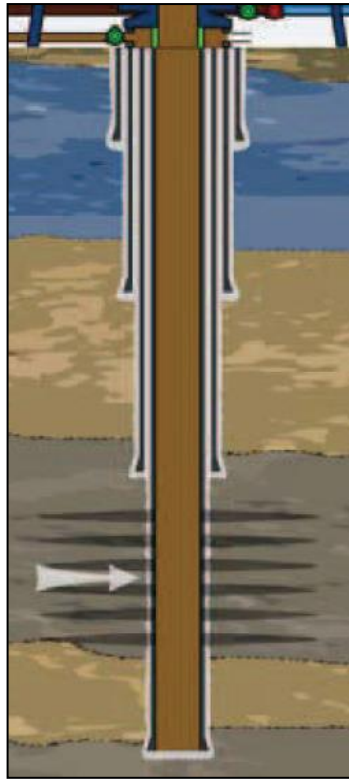
Esta tubería se corre y se cementa a través de la zona productora de interés, y luego se cañonea para permitir la comunicación con la formación; algunas veces se asienta encima de la zona productora, se continúa la perforación y se emplea un completamiento a hueco abierto.

Los diámetros más usuales de casing de producción son 4^{1/2}, 5, 7 y 9^{5/8} pulgadas y la profundidad de asentamiento varía desde 1500 hasta más de 25000 pies. Las características de las lechadas de cementación usadas varían dependiendo de las condiciones del pozo, pero generalmente contienen aditivos retardantes y material para pérdida de filtrado.

La tubería de revestimiento de producción se puede introducir al pozo como una sarta completa desde el fondo hasta la superficie ó desde el fondo del pozo hasta unos pies dentro de la tubería de revestimiento anterior. En este caso, la tubería se conoce como Liner de producción.

2.1.5 Liner. Los liner son tuberías de revestimiento que no llegan hasta la superficie, sino que son colgados en el interior de la tubería de revestimiento anterior. La longitud dentro de la tubería anterior a la que se cuelga el liner depende del objetivo del mismo y varía entre 50 y 500 pies.

Figura 4. Casing de Producción



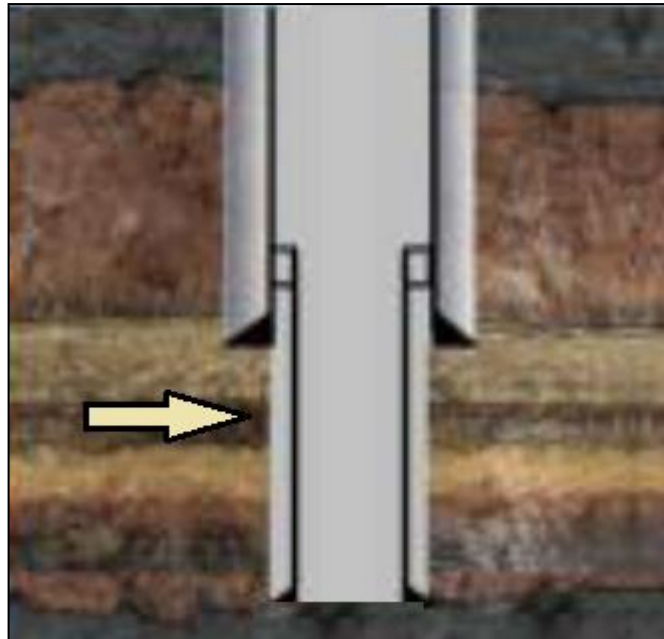
Fuente: Schlumberger, “Introduction to Cementing”, JET 14

Los liner (Figura 5) se corren dentro del pozo usando tubería de perforación y herramientas especiales de asentamiento que son removibles. A través de la tubería de perforación se bombean las lechadas para cementar el liner; estas lechadas generalmente se diseñan con propiedades de fluidez y fraguado que aseguren un buen aislamiento zonal y una buena adherencia.

El uso de liner permite utilizar menos tubería de revestimiento y por lo tanto se reducen los costos del pozo. De acuerdo a sus aplicaciones, los liner se clasifican de la siguiente manera:

2.1.5.1 Liner de producción. Este tipo de liner se corre desde la última tubería de revestimiento hasta el fondo del pozo, sustituyendo al casing de producción. La cementación de este liner es crítica debido a que se encuentra en contacto directo con la formación productora.

Figura 5. Liner



Fuente: PRADA, Katherine. ARGÜELLO, Fabio. "Estudio técnico y elaboración de una herramienta de cálculo para el diseño de un sistema integrado de circulación para la perforación de pozos".

2.1.5.2 Liner de perforación. Se utiliza en operaciones de perforación con el fin de aumentar la profundidad del pozo, pero principalmente se utiliza para aislar zonas de pérdida de circulación, zonas de alta presión y otras zonas problemáticas, de tal manera que la perforación pueda continuar.

2.1.5.3 Conexión de liner a superficie. Esta tubería se extiende desde la parte superior de un liner existente hasta un punto superior en el interior de otra tubería de revestimiento. Se usa para aislar tuberías de revestimiento en mal estado que se encuentran sobre el otro liner existente, y para proporcionar protección adicional al pozo contra la corrosión o la presión.

2.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN CEMENTACIÓN PRIMARIA

Para realizar una operación de cementación primaria, se necesitan diferentes equipos y herramientas que cumplen diversas funciones las cuales son importantes para que la

operación sea exitosa. A continuación se presenta la descripción de algunos de los equipos más importantes utilizados en la cementación primaria:

2.2.1 Zapata guía. Esta herramienta se coloca en la parte inferior de la tubería de revestimiento para proteger el extremo de la tubería y para guiar la sarta en su viaje hasta el fondo. Las zapatas guía (Figura 6) no contienen válvulas cheque o aparatos de control de flujo y no tienen efecto directo en la ejecución de la cementación primaria.¹⁵ De acuerdo a su forma se clasifican en Zapatas guía de patrón regular o Zapatas guía de nariz redondeada.

2.2.2 Collar Flotador. Es una herramienta que se coloca unos tramos por encima de la zapata guía. Posee una válvula de retención que permite que los fluidos circulen desde la tubería hacia el espacio anular, pero no del anular a la tubería. Al final de la operación de cementación, se debe medir la presión diferencial en esta herramienta y verificar que la válvula funciona correctamente. El collar flotador (Figura 7) también sirve para minimizar el esfuerzo sobre la torre al inducir flotación o incrementar la boyanza del casing.

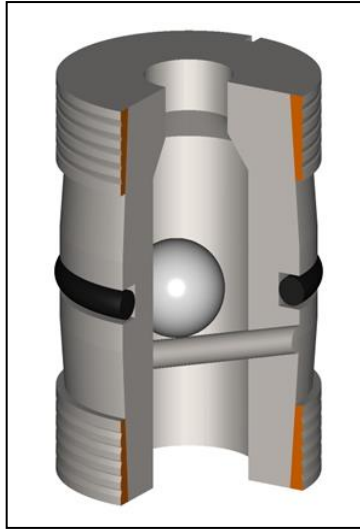
Figura 6. Zapata guía



Fuente: DOWELL, "Cementing Engineering Manual". Schlumberger Educational Service, Enero de 1995. Sección 2.C.3

¹⁵ DOWELL. Cementing Engineering Manual. Schlumberger Educational Service, Enero de 1995. Sección 2.C.3, 2p

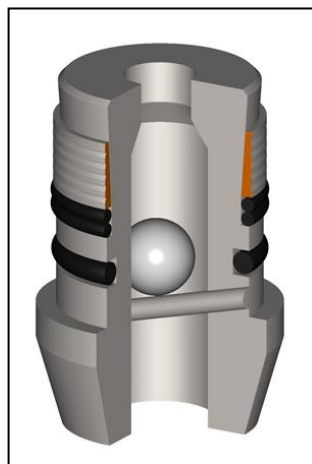
Figura 7. Collar Flotador



Fuente: Van Ruth Products [en línea], disponible en: www.vanruth.com/products/float_shoe_collar

2.2.3 Zapata de flotación. Es una herramienta que sirve de zapata guía y de flotador. Se coloca en el extremo de la tubería de revestimiento y además tiene una válvula de retención. La zapata de flotación (Figura 8) se usa conjuntamente con el collar flotador ubicado unos tramos por encima de la zapata. También ayuda a inducir flotación en el casing.

Figura 8. Zapata de flotación



Fuente: Van Ruth Products [en línea], disponible en: www.vanruth.com/products/float_shoe_collar

2.2.4 Tapones de Cementación. Los tapones de cementación son barreras semirrígidas usadas para separar los fluidos, limpiar el casing y para indicar cuando ha terminado la operación de cementación¹⁶. De acuerdo a su posición, se clasifican dos tipos de tapones: tapón inferior y tapón superior.

2.2.4.1 Tapón inferior. Se usa para ayudar a separar la lechada del fluido de perforación; El tapón inferior (Figura 9) es hueco con una membrana de caucho en la parte superior, la cual se rompe debido al peso del cemento cuando el tapón llega al collar de flotación, y la lechada continúa su camino hacia la zapata y luego por el espacio anular.

2.2.4.2 Tapón superior. Este tapón sirve para separar la lechada de cemento del fluido desplazante con el fin de evitar contaminación. A diferencia del tapón inferior, el tapón superior (Figura 10) es sólido, y cuando llega hasta el tapón superior se detiene el paso de fluidos, generando un aumento en la presión, lo que indica que el desplazamiento ha terminado y la lechada ha sido colocada en el anular.

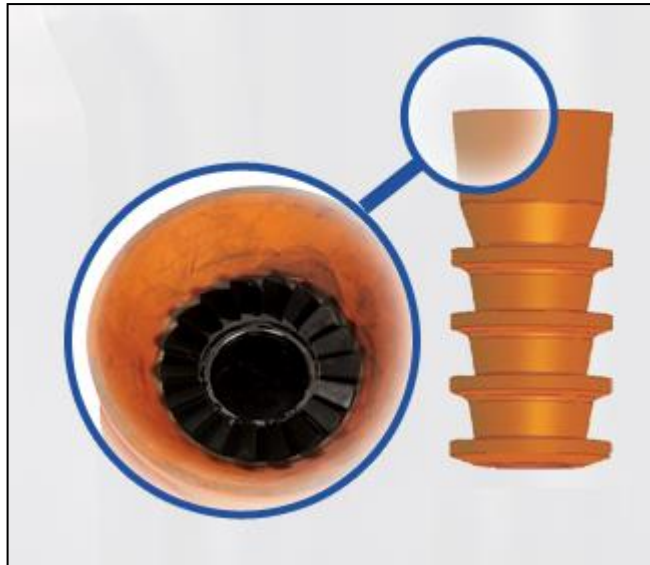
Figura 9. Tapón Inferior



Fuente: Cementing Plugs [en línea], disponible en: cteltd.com

¹⁶ DOWELL, Op. cit., Sección 2.C.3, 11p

Figura 10. Tapón Superior



Fuente: Cementing Plugs [en línea], disponible en: cteltd.com

2.2.5 Centralizadores. Los centralizadores (Figura 11) son equipos que se colocan en la parte externa de las tuberías de revestimiento, cada ciertos tramos, con el fin de mantenerlas centradas en el hueco de tal manera que el espesor del cemento sea uniforme a lo largo de la tubería, además ayudan a mejorar la eficiencia de desplazamiento.

Figura 11. Centralizadores



Fuente: Centralizador de Tubería de Revestimiento [en línea], disponible en: www.oildrilling.es

2.2.6 Raspadores. Los raspadores (Figura 12) son herramientas que se instalan en la parte exterior de la tubería de revestimiento y su función es raspar las paredes del hueco sacando la costra de lodo y de esta manera obtener mejor adherencia del cemento.

2.2.7 Cabezal de cementación. El cabezal de cementación (Figura 13) es un equipo que va conectado al casing y se usa para facilitar el bombeo de fluidos desde superficie. El cabezal contiene los tapones de cementación, los cuales se liberan en el tiempo apropiado mediante válvulas hidráulicas.

2.2.8 Colgador de Liner. Es una herramienta que se coloca en la parte superior del liner y tiene como objetivo fijarlo a la tubería de revestimiento previa colgándolo ya sea hidráulica o mecánicamente¹⁷.

Figura 12. Raspadores

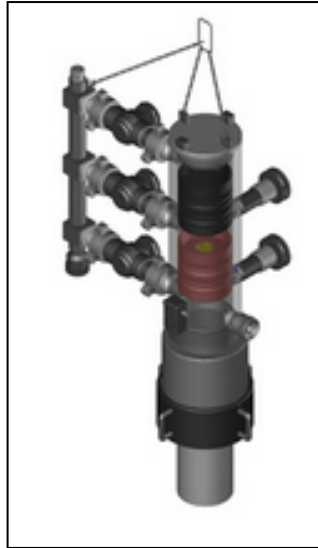


Fuente: CAMPOS, Israel, GUEVARA, Dani, ARMAS, Diego. Metodología en Operaciones de Cementación Primaria y Forzada utilizando nuevas tecnologías. Guayaquil, Ecuador, 2010. Informe de materia de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero de Petróleos. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

2.2.9 Dardo de desplazamiento. Es un tapón que sirve para separar la lechada de cementación del fluido de desplazamiento cuando se cementa un liner. Se libera desde el cabezal de cementación después de bombear la lechada, hasta que llega y se asienta en el tapón de desplazamiento de Liner, ubicado a la profundidad del colgador del liner.

¹⁷ CAMPOS, Israel, GUEVARA, Dani, ARMAS, Diego. Metodología en Operaciones de Cementación Primaria y Forzada utilizando nuevas tecnologías. Guayaquil, Ecuador, 2010. Informe de materia de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero de Petróleos. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 15p

Figura 13. Cabezal de Cementación



Fuente: *Cementing Heads* [en línea], disponible en: www.top-co.ca

2.2.10 Tapón de desplazamiento de Liner. Es un tapón que se encuentra fijo en el colgador de liner y permite el paso de los fluidos a través de él. Cuando el dardo de desplazamiento llega, este se conecta en un receptáculo que posee el tapón fijo. A partir de este momento ambos tapones viajan juntos desplazando de esta manera la lechada dentro del liner hasta llegar al collar flotador restringiendo el paso de fluidos.

2.3 FLUIDOS QUE INTERVIENEN EN UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA

Durante la operación de cementación primaria se deben bombear diferentes fluidos que cumplen determinadas funciones; cada función de los fluidos conlleva a que la operación se lleve a cabo con éxito. Los siguientes son los fluidos presentes durante una operación de cementación primaria:

2.3.1 Fluido de perforación. Antes de iniciar la operación el sistema se encuentra completamente lleno de fluido de perforación. Este fluido debe ser desplazado completamente por las lechadas de cementación, ya que si no se desplaza correctamente

probablemente no se logre una adecuada adherencia del cemento con la formación y la tubería y se pueden presentar problemas posteriores. Generalmente presenta un comportamiento No Newtoniano.

2.3.2 Fluido lavador. Con el fin de obtener una buena remoción del lodo de perforación de las paredes del agujero, y permitir una buena adherencia del cemento, un pre-flujo de un fluido lavador debe ser bombeado antes de la lechada; sus características pueden variar dependiendo del fluido de perforación presente, en todo caso siempre debe ser compatible con todos los demás fluidos del sistema; exhibe generalmente un comportamiento newtoniano y puede ser en algunos casos agua, ya que es económica y puede entrar fácilmente en turbulencia, lo que en teoría se cree ayuda con la remoción de lodo de las paredes del pozo.¹⁸ El volumen que debe ser usado de este fluido dependerá de los tiempos de contacto que se deseen obtener con la formación, en general 10 minutos son suficientes para esperar una buena limpieza.

2.3.3 Fluido espaciador. Este fluido es enviado después del frente lavador, y tiene como objetivo evitar la digitación de la lechada hacia los demás fluidos, en otras palabras, separar la lechada del frente lavador y el fluido de perforación; su comportamiento reológico generalmente es el de un fluido no-newtoniano, y su densidad mayor a la del lodo pero menor que la de la lechada.

2.3.4 Lechada inicial o de relleno. Con el fin de disminuir costos, en algunas ocasiones se prepara una lechada de cemento llamada comúnmente de relleno, que consiste en una lechada con un contenido de agua superior al requerimiento del cemento, esto hace que sea más económica que la de una lechada normal, que sea más fácil de bombear y que tenga una menor densidad y así mismo menor presión hidrostática, esto resulta útil cuando se espera tener columnas de cemento muy grandes. Por otra parte esta lechada al fraguar presentara propiedades menos favorables que la de una lechada normal, por ejemplo, una menor resistencia a la compresión. El objetivo de esta lechada es cubrir la parte superior del espacio anular.

¹⁸ SMITH, Op. cit., 89p.

2.3.5 Lechada de cola. Es bombeada después de la lechada inicial o de relleno, y su calidad en cuanto a resistencia debe ser mejor que esta, ya que se posicionará en la parte inferior, y deberá soportar mayor compresión. Generalmente es menos fluida que la lechada anteriormente mencionada y presenta un comportamiento menos newtoniano.

2.3.6 Fluido de desplazamiento. Una vez se termina de bombear el cemento dentro de la tubería, se debe llevar esta hasta el fondo del pozo, esto se hace bombeando un fluido después de soltar el segundo tapón el cual separa este de la lechada de cola. En esta etapa puede ser usado lodo o agua más aditivos.

Antes de bombear los fluidos hacia el pozo, se debe asegurar que estos son compatibles entre sí y que las propiedades de cada uno no se verán afectadas al ponerse en contacto. Para esto se hacen ciertas pruebas en laboratorio las cuales determinan la compatibilidad y el correcto funcionamiento de los mismos durante la operación (Ver Documento, “Diseño de Laboratorio” en el menú “Ayuda” de la herramienta CEMSEI).

2.4 PROCEDIMIENTO DE UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA¹⁹

A continuación se mostrará un paso a paso de una operación de cementación primaria convencional y aunque en las secciones anteriores ya se presentaron algunos de los equipos que se utilizan y los fluidos que intervienen en la operación, algunas de estas características se mencionarán nuevamente. Una cementación primaria incluye generalmente las siguientes actividades:

2.4.1 Corrida de tubería de revestimiento. Consiste en bajar la tubería de revestimiento hasta el fondo de la sección perforada del pozo y asentarla. El primer tramo de la tubería de revestimiento (en el fondo) consta de una zapata de cementación, la cual protege el extremo de la tubería y guía la sarta en su viaje hasta el fondo. Unos tramos arriba de la zapata se instala un collar de flotación, el cual está compuesto de una válvula de retención que evita que los fluidos regresen por la tubería de revestimiento, pero sí

¹⁹ NELSON, Op. cit., cap 12-p 6-13

permite que los fluidos puedan bombearse hacia el anular. El espacio entre el collar de flotación y la zapata se deja lleno de cemento al final de la cementación.

2.4.2 Circulación de lodo (acondicionamiento). Antes de bombear la lechada hacia el pozo se circula lodo de perforación, con el fin de limpiar el pozo y acondicionar el lodo, es decir, que este circule sin problema alguno.

2.4.3 Prueba de presión. Se realiza antes de iniciar la cementación a todas las líneas de circulación superficiales, que van desde la unidad de cementación hasta el pozo, con el fin de detectar posibles fugas las cuales tienen que ser reparadas.

2.4.4 Bombeo del bache lavador y espaciador. Como ya se mencionó, antes de bombear la lechada de cemento, se bombea un lavador químico y un espaciador densificado con el fin de separar la lechada del lodo de perforación. Los lavadores son fluidos base agua cuyo objetivo es remover la torta de lodo en el anular mediante un flujo turbulento. Los espaciadores levantan y limpian el lodo removido por el lavador antes del bombeo de la lechada.

2.4.5 Lanzamiento del tapón inferior. En cementación primaria, antes y después del bombeo de la lechada de cemento se desplazan tapones por la tubería de revestimiento, los cuales sirven para separar la lechada de los lodos de perforación, limpiar el interior de la tubería de revestimiento y para saber, por medio de un aumento de presión, que el cemento ya está ubicado en la posición final, es decir, por fuera de la tubería. El tapón inferior es hueco con una membrana de caucho en la parte superior, la cual se rompe debido al peso del cemento cuando el tapón llega al collar de flotación, y la lechada continúa su camino hacia la zapata y luego por el espacio anular.

2.4.6 Mezcla de la lechada de cemento. En un mezclador se combina cemento seco con agua y los aditivos necesarios. Algunas veces los aditivos se mezclan con el cemento en seco.

2.4.7 Bombeo de la lechada inicial o de relleno. Es una lechada de baja densidad y rendimiento alto, cuyo objetivo es cubrir la sección superior del anular. Tiene una

densidad mayor que la del lodo de perforación. Esta lechada empuja el lavador, el espaciador y el tapón inferior hacia el interior de la tubería de revestimiento.

2.4.8 Bombeo de la lechada de cola o principal. Es una lechada de mayor densidad cuyo objetivo es cubrir la sección inferior del espacio anular y el espacio entre el collar de flotación y la zapata. Sus propiedades son más complejas que las de la lechada inicial.

2.4.9 Lanzamiento del tapón superior. A diferencia del tapón inferior, este tapón es sólido y se bombea al final del bombeo de la lechada de cola con el fin de separarla del lodo de desplazamiento, que se bombea en la siguiente etapa del proceso, y evitar que este fluido contamine la lechada.

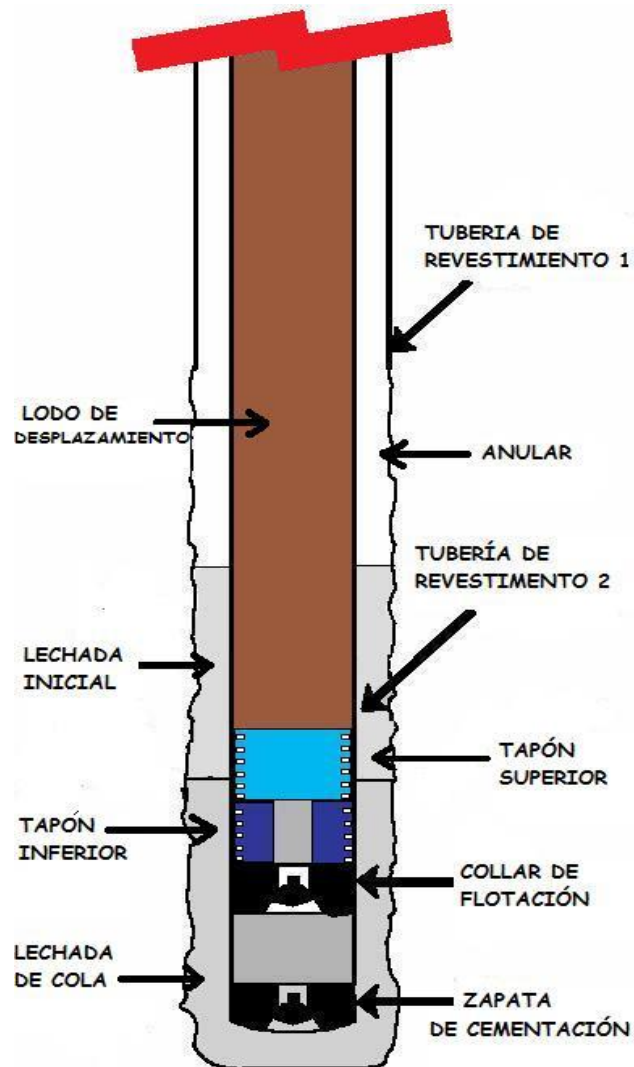
2.4.10 Desplazamiento de lechadas y tapones con fluidos. Las lechadas y los tapones se bombean hacia el fondo del pozo mediante un lodo de perforación u otro fluido. El lodo empuja el tapón superior y las lechadas por la tubería de revestimiento y como se mencionó antes, cuando el tapón inferior llega hasta el collar de flotación, la membrana de la parte superior se rompe y la lechada sale por la parte inferior de la tubería y sube por el espacio anular. Cuando el tapón superior llega hasta el tapón inferior, se observa un incremento en la presión de bombeo, lo cual indica que el cemento desplazado se encuentra en el espacio anular y en el espacio entre la zapata y el collar de flotación.

2.4.11 Revisión de flujo de retorno. El proceso de desplazamiento habrá terminado cuando retornen de dos a cinco barriles de fluido de desplazamiento cuando se libere presión, entonces se detendrá el flujo. Cuando el retorno continúa quiere decir que hay fugas en el collar de flotación.

Después de todos los pasos anteriores, se espera un tiempo para que el cemento fragüe y se seque; posteriormente se continúa ya sea con la perforación del pozo, o con el completamiento (si ya se ha alcanzado la zona productora).

La Figura 14 muestra el esquema final de una cementación primaria en un pozo vertical.

Figura 14. Esquema final de una cementación primaria en un pozo vertical.



Fuente: Los Autores

2.5 TIPOS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA

Existen diferentes métodos para colocar lechadas de cemento en el espacio anular y que estas cumplan con los objetivos de una cementación primaria; la selección del tipo de cementación depende de diversos factores, como las condiciones del pozo y los costos.

Las técnicas de cementación primaria más usuales son las siguientes:

- Cementación en una etapa
- Cementación multi-etapa

2.5.1 Cementación en una etapa. Es la cementación más sencilla de todas, la lechada se bombea hacia el espacio anular en un solo paso hasta la profundidad deseada mediante bombas en superficie. Este tipo de cementación requiere presiones de bombeo altas, implicando que las formaciones profundas deben tener presiones de poro y de fractura altas para que no se produzcan pérdidas de circulación ni fracturamiento de la formación²⁰.

Usualmente se usa en pozos poco profundos, pero con el desarrollo de lechadas de cementación ultra-livianas, se puede cementar largas tuberías de revestimiento con extensas columnas de cemento sin el riesgo de fracturar formaciones débiles.

2.5.1.1 Cementación a través tubería de perforación. La cementación de tuberías de revestimiento grandes se puede realizar a través de una tubería de perforación. En la parte superior de la zapata se instala una conexión (stab-in) que actúa como receptáculo de un dispositivo (stinger) que se conecta a la parte inferior del drillpipe. El drillpipe se baja y se realiza la conexión, la cual genera un sello en el collar flotador. La lechada se bombea a través del drillpipe y pasa al anular hasta llegar al tope deseado.²¹ Este método tiene varias ventajas: se disminuye el volumen de fluido de desplazamiento y el tiempo de la operación, además se disminuye el riesgo de canalización del cemento y la contaminación del mismo con el fluido de perforación. Al final de la operación se desconecta la tubería de perforación y se lleva a superficie.

2.5.1.2 Cementación de Liner. La cementación de este tipo de tuberías se puede realizar en una etapa ó multi-etapa. Esta cementación también se realiza mediante una tubería de perforación. Un dispositivo llamado “colgador de Liner” se instala en la parte superior del liner, posteriormente, se conecta el liner con la tubería de perforación y se corre dentro del pozo. Solamente se suelta un tapón desde la cabeza de cementación en superficie, pero dos tapones están envueltos en el desplazamiento de la lechada. El primer tapón (que se

²⁰ CAMPOS (Israel), Op. cit., 5p.

²¹ NELSON, Op. cit., cap 12- p 7

suelta desde superficie), se desplaza hasta el colgador del liner donde se enlaza dentro del segundo tapón, el cual tiene un agujero a través del cual ha sido bombeada la lechada y los demás fluidos; el agujero se sella con el tapón que se suelta desde superficie. Cuando sucede esto, la presión en superficie se incrementa, al igual que en una cementación primaria convencional. El colgador del liner se asienta mecánicamente ó hidráulicamente, y la conexión entre el drillpipe y el liner se libera. La lechada que queda por encima de la profundidad del colgador en el anular debe ser circulada en reversa fuera del pozo.

2.5.2 Cementación multietapa. El método multietapa logra el desplazamiento completo de la lechada e dos o tres pasos. En la primera etapa, la lechada es colocada como si fuera una operación de cementación de una sola etapa hasta una profundidad determinada en el espacio anular. A continuación, por medio de los puertos de un “collar de etapa” que se coloca en el casing, se cementan sucesivamente las etapas superiores a la sección cementada en la primera etapa. Un collar de etapa es una junta con puertos que se abren y cierran o se sellan mediante camisas de accionamiento a presión.

Los principales objetivos de este tipo de cementación primaria son los siguientes:

- Reducir la presión hidrostática en formaciones débiles que no pueden soportar una columna larga de cemento.
- Aislar dos zonas problemáticas que se encuentran separadas entre sí y necesitan ser cementadas.
- Ahorrar cemento en pozos en los cuales sólo es necesario cementar la parte inferior del anular y una porción superior del mismo.

NOTA: La herramienta software CEMSEI trabaja con cementación primaria en una etapa convencional y para Liner. Aunque la herramienta no cuenta con una opción específica para realizar trabajos con cementación a través de tubería de perforación, esta se puede simular, ajustando el diámetro interno de la tubería a cementar (ver manual de usuario).

2.6 CÁLCULO DE VOLÚMENES DE LOS FLUIDOS A DESPLAZAR

Antes de iniciar la operación de cementación, se debe conocer el estado mecánico del pozo, lo cual implica conocer la siguiente información: profundidades perforadas, el diámetro promedio del hueco, los diámetros internos y externos de las tuberías de revestimiento utilizadas, profundidad de asentamiento de las tuberías de revestimiento y el tope de cemento deseado (TOC). Con esta información y mediante expresiones matemáticas se puede calcular el volumen de cada fluido que va entrando en cada sección del sistema y los volúmenes totales a bombear.

2.6.1 Volumen en el espacio anular. Para el cálculo del volumen de los fluidos que se encuentran en el espacio anular se utilizan dos expresiones, dependiendo si el fluido se encuentra entre el hueco abierto y el casing a cementar ó si se encuentra en el espacio anular entre el casing anterior y el casing a cementar.

- Volumen de fluido en el espacio anular entre el hueco descubierto y el casing a cementar:

$$V_a[Bbl] = \frac{D_h^2 - OD_{Csg}^2}{1029,4} * L \quad (2.1)$$

- Volumen de fluido en el espacio anular entre el casing anterior y el casing a cementar:

$$V_{a-Csg}[Bbl] = \frac{ID_{Csg_a}^2 - OD_{Csg}^2}{1029,4} * L \quad (2.2)$$

Donde:

D_h = Diámetro del hueco (o de la broca) (in)

OD_{Csg} = Diámetro externo del casing a cementar (in)

ID_{Csg_a} = Diámetro interno del casing anterior (in)

L = longitud de la sección ocupada por fluido (Ft)

2.6.2 Volumen entre el collar flotador y la zapata. Debido a que este espacio queda lleno de cemento al final de la operación, es necesario conocer su volumen, de tal manera

que los cálculos de volumen total de lechada sean precisos y se alcance el tope deseado. Para el cálculo de este volumen se utiliza la siguiente expresión:

$$V_{C/Z}[Bbl] = \frac{ID_{Csg}^2}{1029,4} * h \quad (2.3)$$

Donde:

ID_{Csg} =Diámetro interno del casing a cementar (in)

h = distancia entre el collar flotador y la zapata (Ft)

$V_{C/Z}$ = Volumen entre el collar flotador y la zapata (Bbl)

2.6.3 Volumen dentro de tubería. Como se vio anteriormente, en una cementación primaria los fluidos se bombean ya sea a través de la tubería de revestimiento que se desea cementar ó a través de una tubería de perforación. El volumen de fluido dentro de una tubería se calcula con la siguiente expresión:

$$V_P[Bbl] = \frac{ID_{Csg}^2}{1029,4} * L \quad (2.4)$$

Donde:

L = longitud de la sección ocupada por fluido (Ft)

2.6.4 Volumen total de lechada a bombear. El volumen total de lechada es la suma del volumen de lechada en el anular y la lechada en el espacio entre la zapata y el collar flotador:

$$V_{Lech} = V_a + V_{a-Csg} + V_{C/Z} \quad (2.5)$$

Donde:

V_a = Volumen de lechada en el espacio anular, entre el hueco descubierto y el casing a cementar (Bbl)

V_{a-Csg} = Volumen de lechada en el espacio anular, entre el casing anterior y el casing a cementar (Bbl)

$V_{C/Z}$ = Volumen entre el collar flotador y la zapata (Bbl)

Debido a las posibles cavernas (washouts), o posibles pérdidas de fluido en zonas permeables, el volumen de lechada en el espacio anular, entre el hueco descubierto y el casing a cementar, se calcula con un exceso de volumen. Considerando esto, la ecuación 2.1 queda de la siguiente manera:

$$V_a = \frac{D_h^2 - OD_{Csg}^2}{1029,4} * L * Exc \quad (2.6)$$

Donde:

Exc= porcentaje de exceso

2.6.5 Volumen de fluido desplazante. El volumen de fluido desplazante se determina con la ecuación 2.4. Debido a que este fluido se bombea hasta la profundidad del collar flotador, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$V_d = \frac{ID_{Csg}^2}{1029,4} * (Z - h) \quad (2.7)$$

Donde:

Z= profundidad de asentamiento de la zapata (Ft)

h= distancia entre el collar flotador y la zapata (Ft)

2.6.6 Volumen de los baches lavador y espaciador. El volumen de estos fluidos se determina con la ecuación 2.1 ó con la 2.2, de acuerdo a la longitud deseada de los mismos en el espacio anular. En este caso L=Longitud del bache.

La decisión final del volumen del bache seleccionado deberá cumplir con los límites de presión de poro y de fractura de la formación.

2.6.7 Volúmenes en Cementación de Liner. Las ecuaciones anteriores se utilizan también para el cálculo de volúmenes de fluidos en cementación de Liner, considerando que el volumen de fluido desplazante se calcula con el diámetro interno de la tubería de perforación con la que se baja el liner.

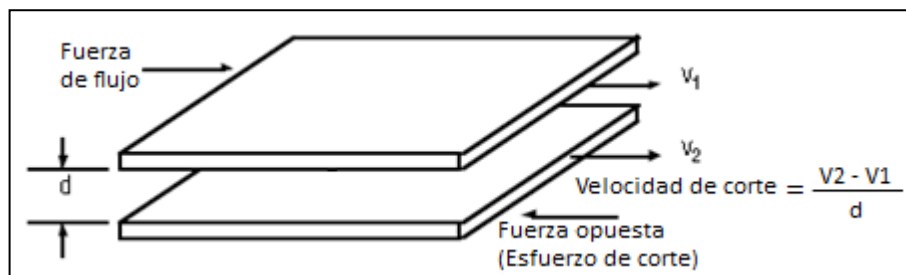
También hay que considerar un volumen adicional al volumen de lechada en el espacio anular, de tal manera que este ocupe unos pies por arriba de la boca del liner; reglas generales aconsejan una longitud de 30 pies.

NOTA: La herramienta software CEMSEI utiliza las ecuaciones anteriores para el cálculo de los volúmenes totales de fluidos y para determinar porcentajes de llenado de las secciones a lo largo de la operación (Ver Capítulo 6).

3. REOLOGÍA DE LOS FLUIDOS PRESENTES EN LA OPERACIÓN DE CEMENTACIÓN PRIMARIA

La reología es la ciencia que se encarga del estudio de la deformación y el flujo de la materia cuando esta se somete a esfuerzos externos; esta ciencia analiza principalmente la relación existente entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte y el impacto que estos tienen sobre las características de flujo dentro de tuberías y en espacios anulares. Durante la circulación se presenta una fuerza de fricción cuando una capa de fluido se desliza encima de otra (Figura 15), esta fuerza que se opone al flujo se conoce como *Esfuerzo de Corte* (τ) y tiene unidades de fuerza sobre área. Por otro lado, la relación entre el gradiente de velocidad entre dos capas de fluido y la distancia que las separa se conoce como *Velocidad de Corte* (γ) y tiene unidades de velocidad sobre longitud²².

Figura 15. Velocidad de corte y esfuerzo de corte



Fuente: "Reología e Hidráulica", Manual MI (2001), Capítulo 5. Modificada

La velocidad de corte depende de la velocidad de flujo en la geometría en la que se está fluyendo; en geometrías pequeñas la velocidad de corte será mayor y a su vez se necesitará un mayor esfuerzo de corte que en geometrías grandes para mantener dicha velocidad, ya que el esfuerzo de corte requerido aumenta a mayor velocidad de corte.

La relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte se conoce como Viscosidad, que es la resistencia u oposición de un fluido a la deformación

²² MI. Manual MI. 2001. Capítulo 5 "Reología e Hidráulica". 2p.

debida al flujo y en unidades de campo se expresa en Centipoises (cP). Si los fluidos utilizados en el proceso de cementación primaria son base agua, la presión no afecta considerablemente su viscosidad ya que no se comprimen perceptiblemente.

3.1 VISCOSÍMETRO ROTACIONAL DE FANN

Es un instrumento constituido por dos cilindros concéntricos, uno externo llamado rotor y uno interno llamado estator; el rotor gira a una velocidad rotacional constante (W), y esta velocidad en presencia de la muestra de fluido produce un torque que generalmente se mide en la pared del estator, simulando el movimiento de placas cilíndricas paralelas²³.

Figura 16 – Viscosímetro rotacional de Fann



Fuente: Viscosímetro 35A [en línea], Disponible en: fanninstrument.com.br

Las velocidades rotacionales se fijan en el viscosímetro y para cada una el aparato proporciona una lectura (θ) en grados. Con las velocidades rotacionales y las respectivas

²³ API. NORMA API RP 10B - "Recommended Practice for Testing Well Cements", Ed. 22. 1997, 113p

lecturas en grados, se puede determinar las velocidades de corte (γ) y los esfuerzos de corte (τ) mediante las siguientes expresiones:

$$\gamma = 1.705 * W \quad (3.1)$$

$$\tau = 1.067 * \theta \quad (3.2)$$

Donde:

W= velocidad rotacional del viscosímetro [rpm]

γ = Velocidad de corte [s^{-1}]

θ = Lectura del viscosímetro en grados [$^{\circ}$]

τ = Esfuerzo de corte [Lbf/100 ft²]

Los valores de velocidad de corte y esfuerzo de corte se utilizan para determinar el comportamiento de flujo de un determinado fluido y establecer el modelo reológico que mejor se ajusta a este comportamiento.

3.2 MODELOS REOLÓGICOS

Un modelo reológico es aquel que describe la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte que se aplica a determinado fluido y de acuerdo a esta relación se puede determinar el comportamiento de flujo; con base en este comportamiento, los fluidos se clasifican en dos tipos diferentes de fluidos²⁴: fluidos Newtonianos y No Newtonianos.

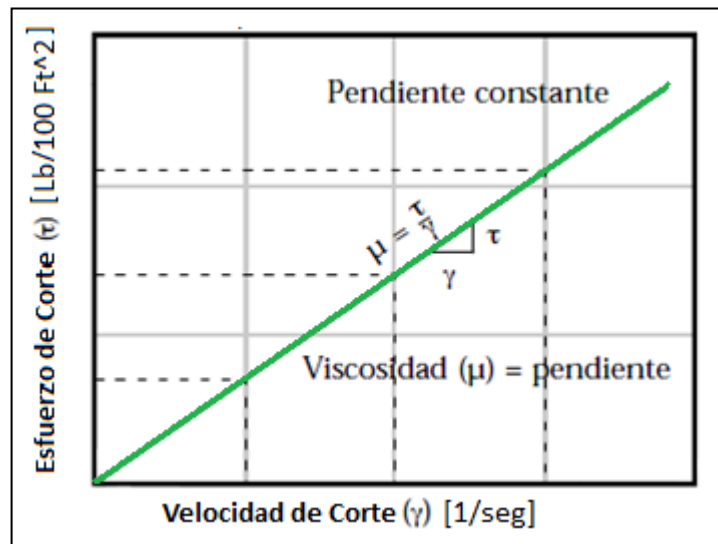
3.2.1 Fluidos Newtonianos. Es la clase más simple de fluidos, la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte es directamente proporcional. Si se realiza una gráfica en el plano cartesiano de Esfuerzo de Corte (coordenada y) versus Velocidad de Corte (coordenada x), los puntos forman una línea recta que pasa por el origen (Figura 17), indicando que el esfuerzo de corte requerido para iniciar el movimiento en un fluido

²⁴ MI, Op. cit., Capítulo 5 - 10p

newtoniano siempre será cero. La pendiente de esta recta es la viscosidad (μ) del fluido newtoniano.

La viscosidad de este tipo de fluidos no cambia con el esfuerzo de corte, se mantiene constante durante el flujo. El agua y los aceites minerales son claros ejemplo de fluidos Newtonianos y en la operación de cementación primaria, como se mencionó anteriormente, el fluido lavador generalmente tiene este comportamiento.

Figura 17 – Gráfica Esfuerzo de corte vs Velocidad de corte, Fluidos Newtonianos



Fuente: “Reología e Hidráulica”, Manual MI (2001), Capítulo 5. Modificada.

3.2.1.1 Modelo Newtoniano. La ecuación de la gráfica anterior es la siguiente:

$$\tau = \mu * \gamma \tag{3.3}$$

Esta ecuación es el modelo reológico que describe el comportamiento de flujo de los fluidos newtonianos y se conoce como *Ley de Viscosidad de Newton* o modelo newtoniano²⁵.

²⁵ MI, Op. cit., Capítulo 5 -13p

La viscosidad tomada de la pendiente de la gráfica de Esfuerzo de corte en Lbf/100 ft² versus Velocidad de corte en s⁻¹ viene dada en unidades inglesas, por lo cual para pasarla a centipose se debe multiplicar por 478.9:

$$\mu(\text{cP}) = 478.9 * \frac{\tau}{\gamma} = 478.9 * m \quad (3.4)$$

Donde:

m= Pendiente de la recta (viscosidad en unidades inglesas)

Simplificando valores numéricos se puede obtener que el valor de la viscosidad de un fluido newtoniano en centipose es igual a la lectura en grados del viscosímetro de Fann a una velocidad rotacional de 300 rpm:

Reemplazando las ecuaciones (3.1) y (3.2) en la ecuación (3.4) se tiene:

$$\mu(\text{cP}) = 478.9 * \frac{1.067 * \theta}{1.705 * W}$$

$$\mu(\text{cP}) = 300 * \frac{\theta}{W}$$

Con W=300 rpm

$$\mu(\text{cP}) = \theta_{@ 300 \text{ rpm}} \quad (3.5)$$

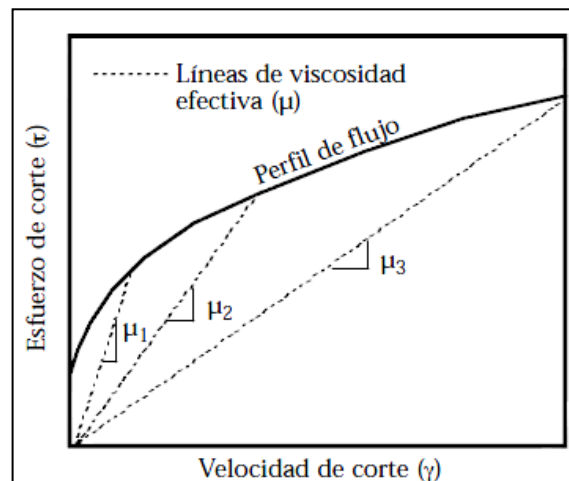
Con lo cual, si se conoce que el comportamiento de un fluido es newtoniano, se puede determinar su viscosidad con solo una lectura del viscosímetro rotacional de Fann.

3.2.2 Fluidos No Newtonianos. En este tipo de fluidos, el esfuerzo de corte no aumenta proporcionalmente con la velocidad de corte, por lo cual, estos fluidos no tienen una viscosidad constante que defina su comportamiento a cada velocidad. Para describir la viscosidad de los fluidos No Newtonianos se utiliza la *Viscosidad Efectiva*, la cual se

define como la relación de esfuerzo de corte a velocidad de corte, a una velocidad de corte determinada²⁶.

En este tipo de fluidos la viscosidad efectiva disminuye al aumentar la velocidad de corte y gráficamente se representa como la pendiente de una recta que va desde el origen a la curva de esfuerzo de corte a la velocidad de corte determinada (ver Figura 18).

Figura 18 – Representación Gráfica de la Viscosidad Efectiva



Fuente: “Reología e Hidráulica”, Manual MI (2001), Capítulo 5.

Existen numerosos modelos que han sido desarrollados para describir el comportamiento de flujo de los fluidos No Newtonianos, por lo sencillo de sus ecuaciones y la fácil determinación de los factores involucrados, los modelos reológicos más utilizados generalmente son el modelo “Plástico de Bingham” y el modelo “Ley de Potencia”.

3.2.2.1 Modelo Plástico de Bingham. Un fluido con comportamiento Plástico de Bingham es aquel que necesita un esfuerzo de corte determinado para iniciar el flujo (Punto Cedente), y luego el esfuerzo de corte aumenta proporcionalmente al aumentar la velocidad de corte, presentando una viscosidad constante (Viscosidad Plástica).

²⁶ MI, Op. cit., Capítulo 5 - 11p

Viscosidad Plástica (μ_p): Este parámetro es comúnmente descrito como la parte de la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica y es afectada en mayor medida por la concentración de partículas sólidas, el tamaño y la forma de las mismas y la viscosidad de la fase fluida²⁷. Fluidos con una baja viscosidad plástica producen menores pérdidas de presión a altas tasas de corte y una mejor suspensión y levantamiento de sólidos.

Punto Cedente (Y_p): es el esfuerzo de corte mínimo que se requiere para iniciar el flujo. Este parámetro es una medida de las fuerzas electroquímicas presentes en un fluido, que resultan de las cargas ubicadas en la superficie de las partículas. El valor del punto cedente en un fluido se incrementa al aumentar el contenido de sólidos y disminuye al aumentar el contenido de agua o de agentes dispersantes, ya que de esta manera se reducen las fuerzas de atracción entre partículas.

Al realizar una gráfica de esfuerzo de corte versus velocidad de corte en coordenadas cartesianas, un fluido con comportamiento reológico Plástico de Bingham dará como resultado una recta cuya ecuación es la siguiente:

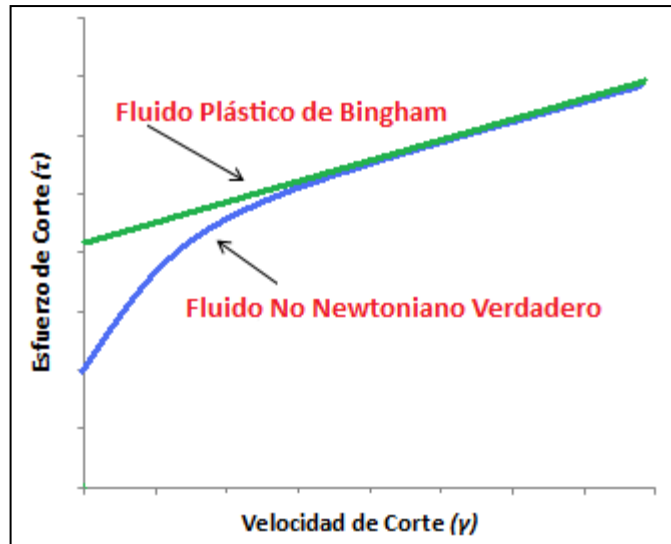
$$\tau = \mu_p * \gamma + Y_p \quad (3.6)$$

La viscosidad plástica tomada de la pendiente de la gráfica de Esfuerzo de corte en Lbf/100 ft² versus Velocidad de corte en s⁻¹ viene dada en unidades inglesas, por lo cual para pasarla a centipose se debe multiplicar por 478.9 (Ec. 3.4); el punto cedente tomado de la gráfica viene ya en Lbf/100 ft² y no necesita conversión.

La representación gráfica que muestra el comportamiento del modelo Plástico de Bingham con respecto a un fluido No Newtoniano verdadero se presenta en la gráfica 19.

²⁷ BEDOYA, María, CARDONA, Natalia. Estudio Comparativo de Modelos Reológicos para Lodos de Perforación. Medellín, 2009. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.16p

Figura 19. Comparación Modelo Plástico de Bingham



Fuente: Los autores

Los parámetros involucrados en el modelo Plástico de Bingham (Viscosidad Plástica y Punto Cedente) se pueden determinar a partir de un viscosímetro rotacional de dos velocidades sin necesidad de hacer una gráfica ni una regresión de los datos, simplemente a partir de las siguientes expresiones:

$$\mu_p(\text{cP}) = \theta_{@ 600 \text{ rpm}} - \theta_{@ 300 \text{ rpm}} \quad (3.7)$$

$$Y_P\left(\frac{\text{Lbf}}{100\text{ft}^2}\right) = \theta_{@ 300 \text{ rpm}} - \mu_p \quad (3.8)$$

Donde:

$\theta_{@ 600 \text{ rpm}}$: Lectura del viscosímetro en grados a una velocidad de 600 rpm.

$\theta_{@ 300 \text{ rpm}}$: Lectura del viscosímetro en grados a una velocidad de 300 rpm.

3.2.2.2 Modelo Ley de potencia. Este modelo es un poco más complicado que el modelo Plástico de Bingham, ya que no se considera una relación lineal entre esfuerzo de corte y velocidad de corte, pero la curva de esfuerzo de corte versus velocidad de corte de un fluido con comportamiento de Ley de potencia pasa por el origen, al igual que los fluidos

Newtonianos, lo que indica que bajo este modelo, los fluidos comienzan su deformación a una tasa de corte igual a cero.

La ecuación que describe el comportamiento reológico del modelo Ley de Potencia es la siguiente:

$$\tau = K * \gamma^n \quad (3.9)$$

Donde:

n: Índice de Ley de Potencia (adimensional)

K: Índice de consistencia (Lbf-seg⁻ⁿ/100ft²)

Índice de Ley de Potencia (n): Este parámetro indica que tanto un fluido se comporta como No Newtoniano sobre un rango determinado de velocidades de corte. De acuerdo al valor de “n”, existen tres tipos diferentes de comportamientos del fluido²⁸:

- n<1: El fluido es un No Newtoniano que disminuye su viscosidad con el esfuerzo de corte.
- n=1: El fluido es Newtoniano
- n>1: El fluido es un fluido dilatante que aumenta su viscosidad con el esfuerzo de corte (esta categoría no incluye los fluidos presentes en la operación de cementación primaria).

Mientras más bajo sea el valor de n, mayor será la disminución de la viscosidad del fluido con el esfuerzo de corte sobre el rango de velocidades de corte y la relación esfuerzo de corte/velocidad de corte será más curvada, es decir, que mientras más se aleje el valor de n de 1, las características no newtonianas del fluido serán más pronunciadas²⁹.

Índice de consistencia (K): Este parámetro representa una caracterización numérica de la consistencia del fluido, en otras palabras, es una medida indirecta de su viscosidad; a mayor valor de K, más viscoso y espeso será el fluido y presentará una mayor eficacia al

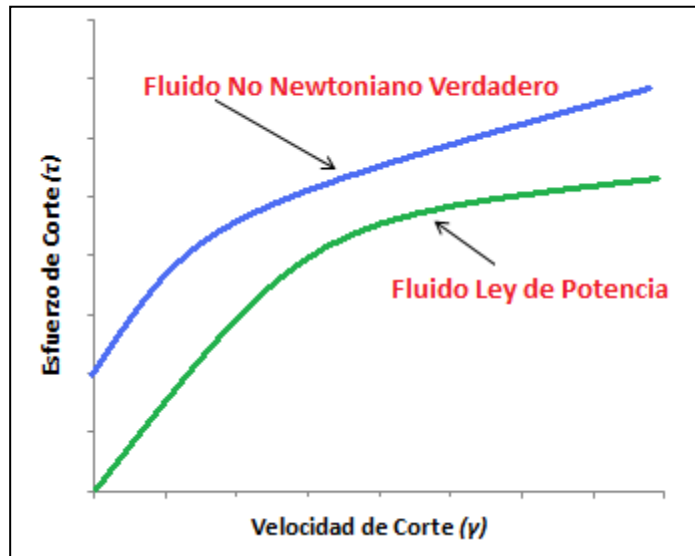
²⁸ MI, Op. cit., Capítulo 5 - 15p

²⁹ BEDOYA, Op. cit., 16p

suspender sólidos. Sus unidades dependen del valor de n, generalmente se expresa en $\text{Lbf}\cdot\text{seg}^{-n}/100\text{ft}^2$.

En la gráfica 20 se representa el comportamiento de un fluido Ley de Potencia con respecto a un fluido No Newtoniano verdadero:

Figura 20. Comparación Modelo Ley de Potencia



Fuente: Los autores

Al igual que el modelo reológico anterior, los parámetros involucrados en el modelo Ley de Potencia (n y K) se pueden determinar a partir de un viscosímetro rotacional de dos velocidades con las siguientes expresiones:

$$n = 3,32 * \text{Log} \left(\frac{\theta_{@ 600 \text{ rpm}}}{\theta_{@ 300 \text{ rpm}}} \right) \quad (3.10)$$

$$K = \left(\frac{5,11 * \theta_{@ 600 \text{ rpm}}}{1022^n} \right) \text{ ó } \left(\frac{5,11 * \theta_{@ 300 \text{ rpm}}}{511^n} \right) \quad (3.11)$$

Nota: En la norma API 13D, tercera edición de Junio de 1995, se recomiendan dos conjuntos de ecuaciones para el cálculo de n y k, uno para condiciones turbulentas y otro para condiciones laminares, pero implica el uso de un viscosímetro de más de dos

velocidades, por lo cual, para mayor facilidad, en el desarrollo de este proyecto se trabajará con las ecuaciones mencionadas anteriormente (3.10 y 3.11).

3.3 ANÁLISIS REOLÓGICO DE LOS FLUIDOS.

El análisis reológico de un fluido consiste en determinar cuál modelo reológico representa de una mejor manera su comportamiento de flujo y las características y parámetros reológicos que involucra determinado modelo.

Para hacer esto, como se mencionó antes, se hace uso de un viscosímetro rotacional de Fann, a partir del cual se pueden determinar varios datos de velocidad de corte y esfuerzo de corte; entre más datos se tenga, mejor será el análisis.

3.3.1 Determinación del modelo reológico que mejor se ajusta al comportamiento de flujo. Cuando se cuenta con varios datos de esfuerzo de corte versus velocidad de corte, estos deben ser analizados con respecto a las ecuaciones 3.3, 3.6 y 3.9 con el fin de tomar una decisión acerca de cuál modelo se ajusta mejor a los datos. La mejor manera de hacer esto es mediante una regresión, el modelo con el mejor coeficiente de determinación será el modelo que mejor representa el comportamiento del fluido que se está analizando.

3.3.1.1 Regresión Lineal. Una regresión lineal es un método matemático que permite ver la tendencia que presenta un conjunto de datos con respecto a la ecuación de una recta. Por la sencillez de sus expresiones, se empleará la regresión lineal para determinar el modelo y los parámetros reológicos que representan adecuadamente el comportamiento de flujo del fluido de interés.

El primer paso para hacer la regresión lineal es calcular los valores promedio:

$$\bar{x} = \left(\frac{\sum x_i}{n} \right) \quad (3.12)$$

$$\bar{y} = \left(\frac{\sum y_i}{n} \right) \quad (3.13)$$

Donde:

x_i : Datos de la coordenada x

y_i : Datos de la coordenada y

\bar{x} : valor promedio de los datos en la coordenada x

\bar{y} : valor promedio de los datos en la coordenada y

n: número total de datos x vs y

Con los datos y los valores promedio se procede a determinar la pendiente de la recta y el punto de corte:

$$m = \left(\frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \right) \quad (3.14)$$

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (3.15)$$

Donde:

m: Pendiente de la recta

b: Punto de corte con la coordenada y

El último paso es calcular el Coeficiente de Determinación, el cual indica si la regresión lineal se aproxima a los datos que se están analizando; si el valor de este factor es igual a la unidad, quiere decir que la regresión se ajusta perfectamente a los datos y entre más bajo sea este valor, menos representativa es la regresión.

$$R^2 = \frac{[\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]^2}{[\sum(x_i - \bar{x})^2][\sum(y_i - \bar{y})^2]} \quad (3.16)$$

Donde:

R^2 : Coeficiente de determinación

El modelo reológico que mejor representa el comportamiento de flujo del fluido, será el que presente el factor de determinación más cercano a uno. A continuación se describe el proceso de regresión lineal para los modelos Plástico de Bingham y Ley de Potencia y los parámetros reológicos de cada modelo obtenidos a partir de la regresión.

3.3.1.2 Regresión lineal en Modelo Plástico de Bingham. El análisis reológico con regresión lineal debe ser hecho a partir de la ecuación 3.6, donde el valor de la pendiente corresponde a la Viscosidad Plástica y el punto de corte corresponde al Punto Cedente.

Al aplicar la regresión lineal a los datos de Esfuerzo de corte (coordenada y) /Velocidad de corte (coordenada x), se puede obtener el valor de la pendiente (m) con la ecuación 3.14 y el valor del punto de corte (b) con la ecuación 3.15. Con los datos de esfuerzo de corte en Lbf/100 ft² y los datos de velocidad de corte en seg⁻¹, los parámetros reológicos del modelo Plástico de Bingham en unidades de campo se determinan con las siguientes expresiones³⁰:

$$\mu_p(\text{cP}) = 478.9 * m \quad (3.17)$$

$$Y_p \left(\frac{\text{Lbf}}{100\text{ft}^2} \right) = b \quad (3.18)$$

Si el valor del punto de corte es igual a cero (0), quiere decir que el fluido que se está analizando presenta un comportamiento Newtoniano, no presenta punto cedente y el valor de la pendiente corresponde a la viscosidad aparente del fluido.

Por último se determina el coeficiente de determinación con la ecuación 3.16.

3.3.1.3 Regresión lineal en Modelo Ley de Potencia. El análisis reológico con regresión lineal para este modelo debe ser hecho a partir de la ecuación 3.9, pero debido a que este modelo no es lineal, se debe utilizar la siguiente expresión que representa la forma logarítmica del modelo Ley de Potencia:

$$\text{Log}(\tau) = n * \text{Log}(\gamma) + \text{Log}(K) \quad (3.19)$$

Los valores a los que se les aplica la regresión lineal son los datos de Log(γ) (coordenada x) / Log(τ) (coordenada y). Al igual que con el modelo Plástico de Bingham, el valor de la pendiente (m) se obtiene con la ecuación 3.14 y el valor del punto de corte (b) se obtiene con la ecuación 3.15.

³⁰ API, NORMA API RP 10B, Op. cit., 99p

Con los datos de esfuerzo de corte en Lbf/100 ft² y los datos de velocidad de corte en seg⁻¹, los parámetros del modelo Ley de Potencia (n y K) se determinan a partir de la regresión lineal de la siguiente manera:

El *Índice de Ley de Potencia* (n) corresponde al valor de la pendiente (m) obtenida con la regresión:

$$n = m \quad (3.20)$$

El *Índice de Consistencia* (K) en Lbf-seg⁻ⁿ/100ft² se obtiene a partir del punto de corte de la recta (b) obtenido con la regresión:

$$K = 10^b \quad (3.21)$$

Para obtener un valor más preciso de índice de consistencia, el valor calculado a partir de la regresión generalmente se modifica con la siguiente expresión:

$$K' = K * \left[\frac{(3n+1)^n}{(4n)^n} \right] \quad (3.22)$$

Donde:

K' = Índice de consistencia modificado [Lbf-seg⁻ⁿ/100ft²]

Si el valor del Índice de Ley de Potencia es igual a uno, quiere decir que el fluido presenta un comportamiento Newtoniano.

Por último se calcula el coeficiente de determinación con la ecuación 3.16.

Se debe hacer el análisis reológico para ambos modelos y el modelo con el coeficiente de determinación más cercano a uno (1) será el modelo que mejor representa el comportamiento de flujo del fluido de interés.

Es necesario conocer la reología de todos los fluidos que intervienen en el proceso de cementación primaria e identificar el modelo reológico que mejor se ajusta a cada fluido. Conociendo el comportamiento y los parámetros reológicos de los fluidos que intervienen en la operación, se puede proceder a realizar el análisis hidráulico correspondiente.

4. HIDRÁULICA DE LA CEMENTACIÓN PRIMARIA

La hidráulica es una rama de la física y de la ingeniería que describe la manera en que el flujo de fluidos crea y utiliza las presiones. En la operación de cementación primaria, se debe establecer el comportamiento de flujo de los fluidos presentes mediante modelos reológicos antes de proceder a realizar los cálculos de las presiones del sistema de flujo. Durante el desplazamiento de los fluidos de cementación al fondo del pozo, estos tienen que pasar por secciones de diferentes geometrías, comportándose de diferente forma en cada sección de diámetro constante. Para cada sección se debe determinar las pérdidas de presión producidas por la circulación de cada fluido. Debido a la cantidad de secciones y a la cantidad de fluidos presentes durante la operación de cementación primaria, es necesario el uso de una herramienta de que realice los cálculos de hidráulica necesarios para conocer la pérdida total de presión del sistema a medida que los fluidos se desplazan.

Como se verá en el capítulo 6, la herramienta software CEMSEI realiza un análisis hidráulico de la operación de cementación, y parte de ese análisis es el cálculo de las presiones del sistema, comprendidas por la presión debido a la fricción, la presión hidrostática y la presión debido a la inercia. Para realizar esos cálculos, el software requiere de un conjunto de ecuaciones matemáticas, algunas de las cuales difieren dependiendo del comportamiento reológico de cada fluido y del régimen de flujo que se presente en cada intervalo geométrico del sistema.

En este capítulo se presentan las ecuaciones de hidráulica necesarias para el cálculo de las presiones del sistema en una operación de cementación primaria.

4.1 INFORMACIÓN REQUERIDA ANTES DE LOS CÁLCULOS

Para realizar los cálculos de hidráulica, es necesario contar con ciertos datos acerca del pozo y los fluidos a utilizar. La información requerida es la siguiente:

Estado Mecánico del pozo: Incluye profundidades y diámetros tanto del agujero, como de las tuberías de revestimiento anteriores y a cementar.

Volumen de los fluidos a bombear: El volumen de las lechadas y del fluido desplazante se obtiene a partir de la geometría del estado mecánico; y el volumen de los baches lavador y espaciador se determina de acuerdo a especificaciones de cada proyecto (Ver capítulo 2).

Reología De los fluidos presentes en la operación: Es necesario conocer cual modelo reológico representa el comportamiento de flujo de cada fluido y los parámetros reológicos sujetos a cada modelo (Ver capítulo 3), ya que es el factor de diferencia más importante en las ecuaciones hidráulicas de pérdida de presión.

Gradientes de presión: Es necesario conocer los gradientes de poro y de fractura en la sección de asentamiento de la zapata de la tubería de revestimiento que se desea cementar, ya que esta sección es la que soporta una mayor columna de fluidos, siendo una zona crítica al momento de la operación.

Determinación de zonas o profundidades con presiones anormales: esta información es muy importante, ya que aquí se puede presentar fracturamiento de la roca o posible migración de fluidos de la formación hacia el espacio anular. Cuando se determinan estas profundidades, se debe definir los gradientes de poro y de fractura, para evaluar los efectos que se presenten durante la operación de cementación.

Cantidad y especificaciones de las bombas y unidades cementadoras: A partir de las características de las bombas a utilizar se determinan los caudales máximos de bombeo con las ecuaciones 6.1 ó 6.2 (Capítulo 6), y conociendo el caudal máximo se puede establecer el caudal de operación para cada fluido.

4.2 CÁLCULOS DE HIDRÁULICA PARA LA DETERMINACIÓN DEL RÉGIMEN DE FLUJO Y LAS PRESIONES DEL SISTEMA DURANTE LA CEMENTACIÓN.

Una vez se tiene la información necesaria se puede iniciar con los cálculos. Como ya se mencionó, los cálculos se deben hacer en cada sección de diámetro constante, tanto

dentro de la tubería como en el anular y para cada fluido presente durante el desplazamiento.

4.2.1 Determinación del Régimen de Flujo. Durante la operación de cementación, los fluidos están sometidos a diferentes etapas de flujo, dependiendo de cada etapa los fluidos presentan diferentes comportamientos que se ven reflejados en diferentes valores pérdidas de presión a lo largo de la geometría de flujo.

Generalmente se habla de tres regímenes de flujo: Flujo laminar, flujo transición y flujo turbulento.

El régimen de flujo que ha mostrado mayor eficiencia en el desplazamiento del lodo en el espacio anular es el turbulento, pero por lo general la lechada no lo alcanza. Debido a su reología, se comporta como fluido no Newtoniano resultando las caídas de presión por fricción altas. De no ser posible alcanzarlo es recomendable hacerlo al mayor gasto posible, cuidando no rebasar la presión de fractura³¹.

Para determinar el régimen de flujo en el que se encuentra un fluido, generalmente se hace uso del *Número de Reynolds* (N_R), el cual es un valor adimensional que depende de tres parámetros: la geometría de flujo, la velocidad media de propagación de los fluidos y la viscosidad de los mismos.

El valor del número de Reynolds y los rangos de este valor dentro de los cuales un fluido se encuentra dentro de un régimen determinado varía dependiendo de la reología de cada fluido; es decir, para cada tipo de modelo reológico existe un conjunto de ecuaciones diferentes para la determinación del régimen de flujo.

4.2.1.1 Velocidad media de propagación. La velocidad media de propagación es la velocidad a la que los fluidos fluyen a través de una tubería o un espacio anular. El concepto de velocidad media de propagación supone que la totalidad del fluido se mueve

³¹ PEMEX. Procedimiento para el Diseño de la Cementación de Tuberías de Revestimiento: Clave: 223 – 21100 – Di – 042. Gerencia de Estrategias de Ingeniería y Diseño de Perforación y Terminación De Pozos. 2005. 31p.

a la misma velocidad, sin tener en cuenta diferencias instantáneas que se pueden presentar cuando se alcanza flujo turbulento.³²

Las ecuaciones para la determinación del valor de la velocidad media de propagación que se mostrarán en este capítulo fueron tomadas del Manual MI de fluidos de perforación. Estas ecuaciones no dependen de las propiedades de cada tipo de fluido, dependen de los diámetros de flujo y de los caudales de bombeo que se están utilizando. Si el caudal de bombeo es constante, la velocidad media de propagación cambiará cuando haya variación en los diámetros de las secciones de flujo.

Ecuaciones para el cálculo de la velocidad media de propagación:

- Velocidad media de propagación dentro de tubería:

$$V[Ft/min] = 0,5828 * \frac{Q}{ID^2} \quad (4.1)$$

- Velocidad media de propagación en espacio Anular:

$$V[Ft/min] = 0,5828 * \frac{Q}{(D_h^2 - OD^2)} \quad (4.2)$$

Donde:

Q= Caudal de bombeo [Bb/min]

ID= Diámetro interno de la tubería [in]

OD= Diámetro externo de la tubería [in]

D_h=Diámetro del pozo o de una tubería de revestimiento anterior [in]

4.2.1.2 Régimen de flujo para fluidos Newtonianos. Como ya se mencionó, la determinación del régimen de flujo se hace en base al número de Reynolds. El cálculo del Número de Reynolds para fluidos Newtonianos se caracteriza por el uso de la viscosidad aparente de los fluidos, la cual como se vio en el Capítulo 3 se asume constante a lo largo del flujo y se determina con la lectura del viscosímetro de Fann a 300 rpm.

³² MI, Op. cit., 2001. Capítulo 5 - 21p

Ecuaciones para el cálculo del Número de Reynolds para fluidos Newtonianos: Las siguientes expresiones para el cálculo del Número de Reynolds para fluidos Newtonianos fueron tomadas de la Norma API RP 10B “Recommended Practice for Testing Well Cements”, sección 13; una es para dentro de la tubería y la otra es para el espacio anular:

- Número de Reynolds dentro de tubería:

$$N_R = 15,467 * \frac{V * ID * \rho}{\mu_a} \quad (4.3)$$

- Número de Reynolds en espacio anular:

$$N_R = 15,467 * \frac{V * (D_h - OD) * \rho}{\mu_a} \quad (4.4)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido [lpg]

μ_a = Viscosidad aparente del fluido [cP]

V = Velocidad media de propagación del fluido [Ft/min]

Determinación del régimen de flujo Fluidos Newtonianos: Dependiendo del valor del Número de Reynolds, el régimen de flujo se considera como:

Tabla 4. Régimen de flujo Fluidos Newtonianos

Régimen de Flujo	Número de Reynolds
Laminar	$N_R \leq 2100$
Transición	$2100 < N_R < 3000$
Turbulento	$N_R \geq 3000$

Caudal crítico para alcanzar Flujo turbulento en fluidos Newtonianos: El caudal crítico es el valor mínimo del caudal de bombeo a partir del cual el régimen de flujo es turbulento.

El caudal crítico para fluidos Newtonianos se determina a partir de una velocidad media de propagación crítica, la cual depende del número de Reynolds crítico, el cual para fluidos Newtonianos es igual a 3000. Las ecuaciones para el cálculo del caudal crítico son las siguientes:

- Dentro de tubería:

$$V_c [Ft/min] = \frac{N_{Rc} * \mu_a}{15,467 * \rho * ID} \quad (4.5)$$

$$Q_c [Bb/min] = \frac{V_c * ID^2}{1028,16} \quad (4.6)$$

- En espacio anular:

$$V_c [Ft/min] = \frac{N_{Rc} * \mu_a}{15,467 * \rho * (D_h - OD)} \quad (4.7)$$

$$Q_c [Bb/min] = \frac{V_c * (D_h^2 - OD^2)}{1028,16} \quad (4.8)$$

Donde:

V_c = Velocidad media de propagación crítica [Ft/min]

Q_c = Caudal Crítico [Bb/min]

N_{Rc} = Número de Reynolds Crítico, igual a 3000

4.2.1.3 Régimen de flujo para fluidos Ley de Potencia. Como se vio en el capítulo 3, la viscosidad de los fluidos No Newtonianos varía dependiendo de la velocidad de corte y esta viscosidad variable se conoce como viscosidad efectiva. Para el cálculo del Número de Reynolds de los fluidos Ley de Potencia se utiliza esta viscosidad, la cual depende de los parámetros reológicos del modelo Ley de Potencia (n y K) y de la velocidad media de propagación.

Ecuaciones para el cálculo de la viscosidad efectiva: Debido a que la viscosidad efectiva varía dependiendo de la geometría de flujo, existen dos expresiones para su determinación, una para el espacio dentro de la tubería y otra para el espacio anular. Las siguientes expresiones para el cálculo de la viscosidad efectiva de fluidos Ley de Potencia, fueron tomadas del Manual MI de fluidos de perforación:

- Viscosidad efectiva dentro de tubería:

$$\mu_e(cP) = 100 * K * \left[\frac{1,6*V}{ID} \right]^{n-1} * \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^n \quad (4.9)$$

- Viscosidad efectiva en espacio anular:

$$\mu_e(cP) = 100 * K * \left[\frac{2,4*V}{D_h-OD} \right]^{n-1} * \left[\frac{2n+1}{3n} \right]^n \quad (4.10)$$

Donde:

n= Índice de Ley de Potencia (Adimensional)

K= Índice de consistencia (Lbf-segⁿ/100ft²)

V= Velocidad media de propagación del fluido

Ecuaciones para el cálculo del Número de Reynolds para fluidos Ley de potencia: El número de Reynolds para fluidos que se comportan de acuerdo al modelo Ley de Potencia se determina de la misma manera que para los fluidos Newtonianos, pero se utiliza la viscosidad. Las siguientes ecuaciones para el cálculo del Número de Reynolds fueron tomadas del Manual MI de fluidos de perforación:

- Número de Reynolds dentro de tubería:

$$N_R = 15,467 * \frac{V*ID*\rho}{\mu_e} \quad (4.11)$$

- Número de Reynolds en espacio anular:

$$N_R = 15,467 * \frac{V*(D_h-OD)*\rho}{\mu_e} \quad (4.12)$$

Donde:

μ_e = Viscosidad efectiva del fluido (cP)

Determinación del régimen de flujo Fluidos Ley de Potencia: Además del Número de Reynolds, el régimen de flujo para fluido Ley de Potencia depende del valor del Índice de consistencia de los fluidos; de acuerdo a esto, el régimen de flujo se considera como:

Tabla 5. Régimen de flujo Fluidos Ley de Potencia

Régimen de Flujo	Número de Reynolds
Laminar	$N_R \leq 3250 - 1150*n$
Transición	$3250 - 1150n < N_R < 4150 - 1150*n$
Turbulento	$N_R \geq 4150 - 1150*n$

Caudal crítico para alcanzar Flujo turbulento en fluidos Ley de Potencia: El caudal crítico para fluidos Ley de Potencia se determina a partir de la velocidad media de propagación crítica, la cual se determina mediante iteraciones, a partir de un valor inicial de velocidad V_i :

- Dentro de Tubería:

$$V_c = \left[\frac{N_{Rc}}{15,467 * \rho * (ID)} \right] * 100 * K * \left[\frac{1,6 * V_i}{ID} \right]^{n-1} * \left[\frac{3n+1}{4n} \right]^n \quad (4.13)$$

Si el valor de la velocidad crítica es diferente al valor de V_i , el valor calculado toma el lugar de V_i y se calcula de nuevo, hasta que ambos valores sean iguales. Cuando ambos valores sean iguales, el valor de velocidad crítica final se utilizará para calcular el caudal crítico mediante la siguiente expresión:

$$Q_c [Bb/min] = \frac{V_c * ID^2}{1028,16} \quad (4.14)$$

- En espacio anular: se hace lo mismo que para dentro de tubería.

$$V_c = \left[\frac{N_{Rc}}{15,467 * \rho * (D_h - OD)} \right] * 100 * K * \left[\frac{2,4 * V_i}{D_h - OD} \right]^{n-1} * \left[\frac{2n+1}{3n} \right]^n \quad (4.15)$$

$$Q_c [Bb/min] = \frac{V_c * (D_h^2 - OD^2)}{1028,16} \quad (4.16)$$

Donde:

n = Índice de Ley de Potencia (Adimensional)

K = Índice de consistencia (Lbf-seg⁻ⁿ/100ft²)

V_c = Velocidad media de propagación crítica [Ft/min]

Q_c = Caudal Crítico [Bb/min]

N_{Rc} = Número de Reynolds Crítico, igual a $4150 - 1150*n$

4.2.1.4 Régimen de flujo para fluidos Plástico de Bingham. Para la determinación del régimen de flujo de estos fluidos se utilizan los parámetros reológicos del modelo Plástico de Bingham: la Viscosidad Plástica y el Punto Cedente; pero las ecuaciones requeridas necesitan que los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente a partir del viscosímetro se modifiquen de la siguiente manera³³:

$$\mu'_p [cP] = Exp[0,9815 * Ln(\mu_p) - 0,03832] \quad (4.17)$$

$$Y'_p \left[\frac{Lb}{100ft^2} \right] = 1,193 * Y_p - 1,611 \quad (4.18)$$

Donde:

μ_p = Viscosidad Plástica obtenida a partir de las lecturas del viscosímetro rotacional

μ'_p = Viscosidad Plástica modificada

Y_p = Punto cedente obtenido a partir de las lecturas del viscosímetro rotacional

Y'_p = Punto cedente modificado

Además de la modificación anterior a los parámetros reológicos, en la determinación del régimen de flujo aparecen dos nuevas expresiones: El *Número de Hedstrom* (He) y un factor que es función de este número, que se denota α_c .

Al igual que el Número de Reynolds, el Número de Hedstrom es un parámetro adimensional y es función de los parámetros reológicos modificados del modelo Plástico de Bingham, la densidad del fluido y varía de acuerdo a la geometría de flujo del sistema.

³³ API. NORMA API RP 10B, Op. cit., Sección 13 - 106p

El factor α_c depende del número de Hedstrom y ambos se utilizan para establecer el régimen de flujo de los fluidos Plástico de Bingham.

A continuación se presentan las ecuaciones para el cálculo del Número de Hedstrom, α_c y Número de Reynolds, tomadas de la Norma API RP 10B “Recommended Practice for Testing Well Cements”, sección 13.

Ecuaciones para el cálculo del Número de Hedstrom: El número de Hedstrom se determina se determina con las siguientes ecuaciones:

- Número de Hedstrom dentro de tubería:

$$He = 37010 * \frac{Y'_p * \rho * (ID^2)}{\mu_p'^2} \quad (4.19)$$

- Número de Hedstrom en espacio anular:

$$He = 37010 * \frac{Y'_p * \rho * (D_h - OD)^2}{1,5^2 * \mu_p'^2} \quad (4.20)$$

Donde:

μ'_p = Viscosidad Plástica modificada [cP]

Y'_p = Punto cedente modificado [Lb/100Ft²]

ρ = Densidad del fluido [lpg]

ID= Diámetro interno de la tubería [in]

OD= Diámetro externo de la tubería [in]

D_h =Diámetro del pozo o de una tubería de revestimiento anterior [in]

Ecuación para el cálculo de α_c : Este factor, función del Número de Hedstrom, se determina con la siguiente ecuación:

$$\alpha_c = \frac{3}{4} \left[\frac{\frac{2He}{24500} + \frac{3}{4} - \sqrt{\left(\frac{2He}{24500} + \frac{3}{4}\right)^2 - 4\left(\frac{He}{24500}\right)^2}}{\frac{2He}{24500}} \right] \quad (4.21)$$

Ecuaciones para el cálculo del Número de Reynolds para fluidos Plástico de Bingham: El Número de Reynolds para los fluidos que se comportan de acuerdo al modelo Plástico de Bingham está en función de los mismos parámetros que los modelos anteriores, pero se utiliza la viscosidad Plástica modificada (Ec. 4.17).

- Número de Reynolds dentro de tubería:

$$N_R = 15,467 * \frac{V * ID * \rho}{\mu'_p} \quad (4.22)$$

- Número de Reynolds en espacio anular:

$$N_R = 15,467 * \frac{V * (D_h - OD) * \rho}{1,5 * \mu'_p} \quad (4.23)$$

Determinación del régimen de flujo Fluidos Plástico de Bingham: El régimen de flujo para los fluidos Plástico de Bingham se considera de la siguiente manera³⁴:

Tabla 6. Régimen de flujo Fluidos Plástico de Bingham

Régimen de Flujo	Número de Reynolds
Laminar	$N_R \leq N_{R1}$
Transición	$N_{R1} < N_R < N_{R2}$
Turbulento	$N_R \geq N_{R2}$

Donde N_{R1} y N_{R2} dependen de los valores del Número de Hedstrom y de α_c . Los valores de N_{R1} y N_{R2} se determinan con las siguientes ecuaciones, unas para dentro de la tubería y otras para el espacio anular:

- Dentro de tubería:

$$N_{R2} = \frac{He(0,968774 - 1,362439 * \alpha_c + 0,1600822 * \alpha_c^4)}{8 * \alpha_c} \quad (4.24)$$

³⁴ NORMA API RP 10B, Op. cit., Sección 13 - 106p.

$$N_{R1} = N_{R2} - 866 * (1 - \alpha_c) \quad (4.25)$$

- En espacio anular:

$$N_{R2} = \frac{He(0,968774 - 1,362439 * \alpha_c + 0,1600822 * \alpha_c^4)}{12 * \alpha_c} \quad (4.26)$$

$$N_{R1} = N_{R2} - 577 * (1 - \alpha_c) \quad (4.27)$$

Caudal crítico para alcanzar Flujo turbulento en fluidos Plástico de Bingham: El caudal crítico para fluidos Plástico se determina a partir de una velocidad media de propagación crítica, la cual depende del número de Reynolds crítico, el cual para fluidos Plástico de Bingham es igual a N_{R2} (Ec. 4.26). Las ecuaciones para el cálculo del caudal crítico son las siguientes:

- Dentro de tubería:

$$V_c [Ft/min] = \frac{N_{Rc} * \mu'_p}{15,467 * \rho * ID} \quad (4.28)$$

$$Q_c [Bb/min] = \frac{V_c * ID^2}{1028,16} \quad (4.29)$$

- En espacio anular:

$$V_c [Ft/min] = \frac{N_{Rc} * 1,5 * \mu'_p}{15,467 * \rho * (D_h - OD)} \quad (4.30)$$

$$Q_c [Bb/min] = \frac{V_c * (D_h^2 - OD^2)}{1028,16} \quad (4.31)$$

Donde:

μ'_p = Viscosidad Plástica modificada [cP]

V_c = Velocidad media de propagación crítica [Ft/min]

Q_c = Caudal Crítico [Bb/min]

N_{Rc} = Número de Reynolds Crítico, igual a N_{R2}

4.2.2 Pérdidas de presión debido a la fricción. El sistema de flujo en una operación de cementación primaria consta de varios intervalos, cada uno de los cuales está sujeto a una determinada caída de presión debido a la fricción de los fluidos con las paredes de la tubería. La suma de la caída de presión de todos los intervalos es igual a las pérdidas de presión totales del sistema.

Las pérdidas de presión en cada intervalo dependen de los siguientes factores:

- La velocidad media de propagación de los fluidos
- La densidad de los fluidos
- La geometría de flujo
- La longitud de cada intervalo
- El factor de fricción de Fanning

4.2.2.1 Cálculo de pérdidas de presión unitarias. Las pérdidas de presión unitarias se refieren a la presión que se pierde por unidad de longitud en cada intervalo de diámetro constante; se determinan con las siguientes ecuaciones tomadas del Manual MI de fluidos de perforación, Sección 5:

Pérdidas de presión unitarias dentro de tubería:

$$\frac{\Delta P}{L} [psi/Ft] = \frac{f * V^2 * \rho}{92916 * ID} \quad (4.32)$$

Pérdidas de presión unitarias en espacio anular:

$$\frac{\Delta P}{L} [psi/Ft] = \frac{f * V^2 * \rho}{92916 * (D_h - OD)} \quad (4.33)$$

Donde:

ID= Diámetro interno de la tubería [in]

OD= Diámetro externo de la tubería [in]

D_h=Diámetro del pozo o de una tubería de revestimiento anterior [in]

V= Velocidad media de propagación del fluido[Ft/min]

ρ = Densidad del fluido [lpg]

f= Factor de fricción de Fanning

Factor de Fricción de Fanning: Este factor representa una indicación de la resistencia al flujo de fluido en la pared de la tubería. Se determina antes de calcular las pérdidas de presión, usando diferentes ecuaciones para flujo turbulento y no turbulento y para los diferentes tipos de fluido.

4.2.2.2 Factor de Fricción de Fanning para fluidos Ley de Potencia. Para los fluidos que se comportan de acuerdo al modelo Ley de Potencia, el factor de fricción de Fanning se determina con las siguientes ecuaciones³⁵, de acuerdo al régimen y al espacio de flujo (tubería o espacio anular):

Factor de Fricción de Fanning Para Flujo Laminar:

- Dentro de tubería:

$$f = \frac{16}{N_R} \quad (4.34)$$

- En espacio anular:

$$f = \frac{24}{N_R} \quad (4.35)$$

Factor de Fricción de Fanning Para Flujo Turbulento:

$$f = \frac{\left[\frac{\text{Log}(n)+3,93}{50} \right]}{N_R \left[\frac{1,75-\text{Log}(n)}{7} \right]} \quad (4.36)$$

Donde:

n= Índice de Ley de Potencia (Adimensional)

N_R =Número de Reynolds (Adimensional)

³⁵ MI, Op. cit., 2001, Capítulo 5 – p 24-25

NOTA: Para el cálculo del factor de fricción de Fanning en fluidos Newtonianos se utilizan las mismas ecuaciones que para los fluidos Ley de Potencia, pero el Índice de Ley de Potencia (n) toma un valor de uno (1)

4.2.2.3 Factor de Fricción de Fanning para fluidos Plástico de Bingham. Para fluidos que se comportan de acuerdo al modelo Plástico de Bingham, el factor de fricción de Fanning se determina con las siguientes ecuaciones³⁶, de acuerdo al régimen y al espacio de flujo (tubería o espacio anular):

Factor de Fricción de Fanning Para Flujo Laminar:

- Dentro de tubería:

$$f = 24 \left[\frac{1}{N_R} + \frac{He}{8 * N_R^2} \right] \quad (4.37)$$

- En espacio anular:

$$f = 16 \left[\frac{1,5}{N_R} + \frac{\frac{9}{8}He}{6 * N_R^2} \right] \quad (4.38)$$

Factor de Fricción de Fanning Para Flujo Turbulento:

$$f = A * (N_R)^{-B} \quad (4.39)$$

Los valores de las constantes A y B se dependen del valor del Número de Hedstrom:

Tabla 7. Constantes A y B para Factor de fricción en flujo turbulento, Fluido Plástico de Bingham

He	A	B
≤ 0,75E-5	0,20656	0,3780
0,75E-5 < He ≤ 1,575E-5	0,26365	0,38931
> 1,575E-5	0,20521	0,35579

³⁶ NORMA API RP 10B, Op. cit., Sección 13 - 125p.

NOTA: El valor del factor de fricción de Fanning para el régimen de flujo de transición, de acuerdo con la norma API RP 10B, "Recommended Practice for Testing Well Cements", se determina de manera gráfica, haciendo una aproximación logarítmica entre los valores de Número de Reynolds que limitan este flujo. Debido a la cantidad de intervalos y de fluidos presentes durante la operación de cementación primaria, es necesario hacer una gran cantidad de cálculos para determinar las pérdidas de presión minuto a minuto a lo largo de la operación, y sería un gasto de tiempo y esfuerzo para el usuario de la herramienta software determinar los valores de factor de fricción de manera gráfica. Por este motivo, y debido a que las diferencias son mínimas, la herramienta software CEMSEI determinará los valores del factor de fricción de Fanning para el régimen de flujo de transición con las mismas expresiones del régimen laminar para todos los fluidos.

4.2.3 Presión hidrostática. La presión hidrostática es la fuerza por unidad de área ejercida por una columna de fluido a una profundidad determinada. Durante la operación de cementación diferentes fluidos son bombeados, y al ir entrando y saliendo fluidos del pozo, la presión hidrostática que aporta la columna total de fluidos al sistema va cambiando. Por este motivo es necesario calcular esta presión durante todo el desplazamiento, ya que con esta se determina la densidad equivalente de circulación y la presión total del sistema en un punto determinado, la cual, al compararla con las presiones de poro y de fractura, permite observar posibles fracturas o pérdidas de fluido que afectan el éxito de la cementación.

Cálculo de la presión hidrostática: La presión hidrostática ejercida por un fluido a una profundidad de interés se determina con la siguiente expresión:

$$P_h [psi] = 0,052 * \rho * L \quad (4.40)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido [lpg]

L = Longitud de la columna de fluido [ft]

La constante 0,052 incluye el valor de la gravedad en unidades de campo.

4.2.4 Presión debido a la inercia. Esta presión es la que se produce debido al empuje adicional causado por los fluidos más densos sobre los de menor densidad, generando una aceleración en el sistema de flujo. El fenómeno que causa esta aceleración en el sistema de flujo y la presión adicional debida a la inercia se conoce como *Efecto de Caída Libre* ó *Efecto de Tubo en U*³⁷.

La presión debido a la inercia depende de la densidad de cada fluido, el área transversal de cada intervalo de diámetro constante, la longitud de la columna de fluido en cada intervalo y el cambio de caudal producido debido a la aceleración del flujo (Ver Sección 6.3.2.2). Esta presión adicional también se debe calcular a lo largo de la operación de cementación cuando se presente caída libre, ya que afecta la presión total del sistema y se puede pasar por alto posibles fracturas a la formación si no es tenida en cuenta.

4.2.5 Presión total del sistema. Para determinar la presión total en un punto determinado del sistema de flujo, se utilizan todas las presiones que se vieron anteriormente. La presión total a una profundidad deseada, de no presentarse efecto de caída libre, es igual a la suma de la presión hidrostática ejercida por los fluidos en dicho punto, mas las pérdidas de presión por fricción totales de los intervalos aguas abajo del punto deseado (aguas abajo se refiere a la dirección del flujo).

$$P_{total}[psi] = P_h + \Delta P_f \quad (4.41)$$

Cuando se presenta caída libre se debe adicionar la presión debido a la inercia causada por la aceleración de los fluidos:

$$P_{total}[psi] = P_h + \Delta P_f + P_i \quad (4.42)$$

Donde:

P_h = presión Hidrostática [psi]

ΔP_f = Pérdidas de presión debido a la fricción de los intervalos aguas abajo del punto de interés [psi]

³⁷ ARNOLD, E.S. "Cementing: Bridging the Gap From Laboratory Research to Field Operation", Journal of Petroleum Technology, Febrero de 1983.

P_i = Presión debido a la inercia [psi]

La presión total en cualquier punto del sistema varía a lo largo de la operación, dependiendo de los fluidos que se estén bombeando y los que vayan pasando por dicho punto.

4.2.6 Densidad equivalente de circulación. Con el fin de comparar la presión en un punto determinado del espacio anular, para verificar que no haya fractura o migración de fluidos, generalmente la presión total en determinado punto se expresa como la densidad del fluido que ejercería una presión hidrostática equivalente a esta presión total. Este peso equivalente del fluido se llama “Densidad Equivalente de Circulación (ECD)”³⁸. La ECD se determina de la siguiente manera:

$$ECD [Lb/gal] = \frac{P_{total}}{0,052 * TVD} \quad (4.43)$$

Donde:

TVD= Profundidad vertical del punto de interés [Ft]

Para comparar esta densidad equivalente de circulación con las presiones de poro y de fractura a la profundidad determinada, estas presiones también se deben expresar como densidades equivalentes (de poro y de fractura) y se les adiciona un margen de seguridad.

4.3 EFECTO DE CAÍDA LIBRE O DE TUBO EN U³⁹

Generalmente, en los proyectos de cementación primaria, las lechadas de cementación son mucho más densas que los fluidos de perforación y los demás fluidos que intervienen en la operación. Esta diferencia en las densidades causa una distorsión que acelera el

³⁸ MI, Op. cit., Capítulo 5 - 26p.

³⁹ CAMPOS, Wellington; LAGE, A. y POGGLO Ademar Jr. Free-Fall- Effect Calculation Ensures Better Cement-Operation Design. SPE Drilling & completion. September 1993. 1p

flujo de toda la columna de fluidos en el momento en el que los fluidos más densos son bombeados hacia el pozo a través de la tubería, lo que causa que todos los fluidos caigan a un mayor caudal que el caudal de bombeo de superficie, creando una región de baja presión entre el cabezal del pozo y la columna de fluidos que está cayendo. La presión en esta región, que generalmente se llama de vacío, corresponde a la presión de vapor de agua.

Como se mencionó anteriormente, este fenómeno se conoce como Efecto de Caída Libre o de Tubo en U.

4.3.1 Comienzo y fin de la caída libre. Cuando comienza el efecto de caída libre, la velocidad media de propagación de los fluidos cambia debido al aumento en el caudal. Generalmente, el sistema se acelera hasta que se alcanza un estado de equilibrio temporal, donde la velocidad media de propagación se mantiene constante.

El caudal de caída libre es igual al caudal de retorno de los fluidos por el espacio anular (considerando que los fluidos sean incompresibles). Cuando se obtiene el equilibrio mencionado, durante el periodo de aceleración, la tasa de flujo de caída libre es constante y mayor a la tasa de bombeo.

Cuando las lechadas de cementación pasan al espacio anular, la presión adicional debida a la inercia disminuye y comienza una deceleración. Durante este periodo, el caudal de caída libre disminuye hasta un valor mínimo, menor que el caudal de bombeo, y se mantiene constante, con lo cual se inicia otro estado de equilibrio temporal.

La zona de baja presión se incrementa al comienzo, mientras el caudal de caída libre es mayor que el caudal de flujo; después, cuando el caudal de caída libre es menor que el de flujo, la zona de baja presión disminuye y luego desaparece

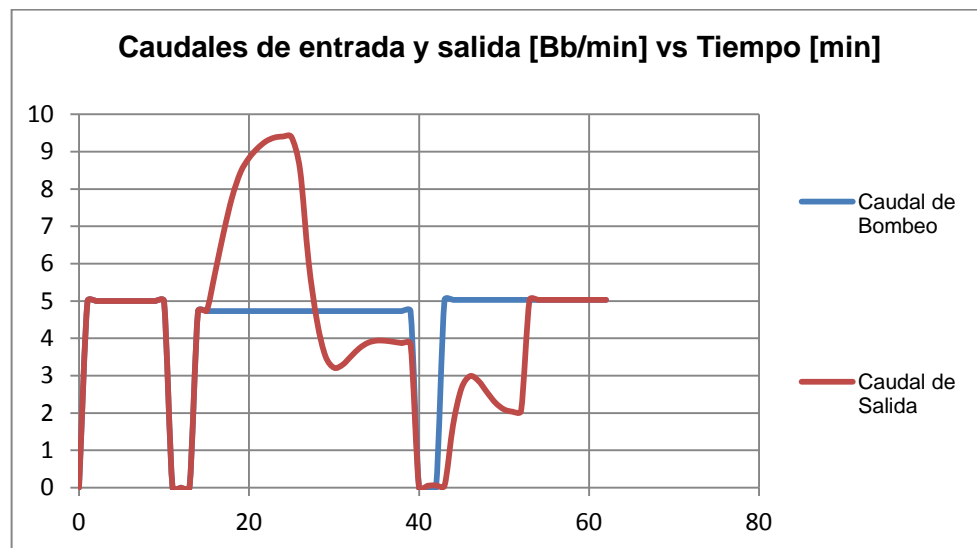
4.3.2 Predicción de la caída libre. Con el fin de que la operación de cementación primaria se desarrolle correctamente, es necesario predecir las tasas de flujo y las presiones que se presentarán durante la misma. Debido a la aceleración y deceleración que se presenta durante caída libre al desplazar las lechadas, es muy difícil conocer las tasas de retorno que se presentarán a lo largo del fenómeno. Para esto se han desarrollado diversos modelos matemáticos que intentan predecir el efecto de caída libre

con el fin de evitarlo o de minimizarlo durante la operación, ya que este proporciona una presión adicional al sistema y se puede presentar fractura de la formación si se sobrepasa el límite del gradiente de fractura.

El modelo utilizado en el desarrollo de este proyecto es el propuesto por Campos, Lage y Poggio⁴⁰, el cual está basado en las leyes de la conservación de la masa y el momentum para calcular el comportamiento de los fluidos en el pozo durante la caída libre. El modelo consta de un sistema de ecuaciones, el cual, asumiendo los fluidos como incompresibles, se reduce a una ecuación diferencial que se resuelve mediante métodos numéricos. La aplicación de este modelo en la herramienta software CEMSEI, para predecir el efecto de caída libre y los caudales de retorno, y la solución numérica del modelo se presentan en la sección 6.3.3.

Para observar gráficamente el efecto de caída libre, basta con graficar los caudales de bombeo y de retorno versus el tiempo de la operación (Gráfica 21). En la gráfica se observa claramente el inicio del efecto (cuando los caudales dejan de ser iguales); los caudales de retorno varían mucho durante la caída libre, debido a que no se pueden controlar durante la operación como los caudales de bombeo en superficie.

Figura 21. Caudales vs Tiempo



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

⁴⁰ CAMPOS (Wellington), Op. cit., 2p

5. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA

Uno de los objetivos de este proyecto es establecer una metodología amigable y didáctica con el usuario de la herramienta software CEMSEI, de tal manera que este pueda realizar un diseño de lechadas de cementación primaria y mediante un análisis reológico e hidráulico pueda validar el funcionamiento de la lechada y el éxito de la operación de cementación, y de no ser exitosa, se puedan hacer las modificaciones pertinentes para obtener los resultados deseados.

A continuación se presentará paso a paso la metodología que se debe hacer para el diseño de lechadas y de la operación de cementación como tal.

5.1 ESTABLECIMIENTO DEL ESTADO MECÁNICO Y LAS CONDICIONES DEL POZO

Antes de realizar cualquier diseño de lechadas es necesario conocer las características del pozo hacia el que van a ser bombeadas, ya que de ello dependen las propiedades y el requerimiento de materiales que se utilizará en la operación.

En este paso se debe definir el tipo de tuberías de revestimiento a utilizar, se deben determinar los volúmenes de los fluidos que se van a bombear hacia el pozo (Capítulo 2) y se establecen posibles zonas débiles o con presiones anormales que pueden presentar problemas durante el desplazamiento de los fluidos.

5.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las propiedades de las lechadas de cementación y de los demás fluidos se determinan mediante pruebas en laboratorio, los valores específicos de estas propiedades dependen de cada proyecto de cementación pero existen rangos establecidos que determinan si una lechada será adecuada o no para la operación. El Documento “Diseño de Laboratorio” del

menú “Ayuda” contiene algunas de las propiedades más importantes de las lechadas de cementación y se describen las pruebas que se realizan en laboratorio para su determinación. Las especificaciones de laboratorio requeridas se deben conocer antes de realizar pruebas de laboratorio.

Si las propiedades del diseño no cumplen con las especificaciones requeridas, se debe realizar modificaciones a la composición de la mezcla y se realizan nuevamente las pruebas. Una vez que las lechadas hayan sido diseñadas cumpliendo con las propiedades requeridas, se puede proceder a verificar si el diseño cumplirá con la operación.

5.3 ANÁLISIS REOLÓGICO

Aunque es parte de las pruebas de laboratorio determinar el comportamiento reológico de las lechadas de cementación, hay que recalcar que la reología se debe determinar a todos los fluidos que intervienen en la operación, ya que del modelo reológico de cada fluido depende el cálculo del régimen de flujo y las presiones del sistema (Capítulo 4).

5.4 DEFINIR CAUDALES DE BOMBEO

Dependiendo de las especificaciones de las bombas y de las unidades de cementación, se establecen caudales máximos de bombeo. Antes de la simulación, se definen los caudales de bombeo, los cuales deben ser inferiores a los caudales máximos y se deben considerar también los caudales críticos para obtener flujo turbulento, el cual es el régimen más favorable durante la operación debido a la capacidad que tienen los fluidos en este régimen para limpiar adecuadamente el pozo.

Si no es posible alcanzar flujo turbulento, se recomienda bombear a la mayor tasa posible, siempre y cuando no se sobrepasen los límites de presión de fractura y de poro de la formación en ningún punto.

5.5 SIMULACIÓN MINUTO A MINUTO DE LA OPERACIÓN

Para poder predecir las condiciones de desplazamiento de los fluidos dentro del pozo, antes de la operación de cementación se debe simular el proceso. Esto permite anticiparse a posibles factores e inconvenientes que atenten contra el éxito del trabajo y corregirlos a tiempo.

5.5.1 Cálculos de Hidráulica. Durante toda la operación, a medida que los fluidos son bombeados hacia el pozo, la herramienta software calculará los regímenes de flujo que se presenten en cada intervalo y para cada fluido, y calculará las presiones en todo el sistema cada minuto (Sección 4.2).

5.6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Una vez hecha la simulación, los resultados de la misma brindarán un panorama más claro de lo que sucederá durante la operación, si esta se realiza con las propiedades de los fluidos y los parámetros de flujo que se han establecido.

5.6.1 Evaluación de caída libre. Durante las operaciones de cementación, es necesario evitar que los fluidos bombeados entren en caída libre, ya que como se vio anteriormente, este causa un imbalance en el flujo proporcionando una presión adicional al sistema, lo cual puede causar que la densidad equivalente de circulación sobrepase el gradiente de fractura de la formación.

El efecto de caída libre se observa al comparar los caudales de entrada con los caudales de retorno (Sección 4.3.2), si estos se mantienen iguales a lo largo de la operación quiere decir que no hay caída libre.

Si se llega a presentar efecto de caída libre, se recomienda modificar los caudales de bombeo (disminuirlos), principalmente de las lechadas, que generalmente son los fluidos más densos, considerando que es favorable alcanzar un flujo turbulento durante la operación.

5.6.2 Evaluación de las densidades equivalentes de circulación. Con el fin de verificar que la densidad equivalente de circulación de todos los fluidos durante el desplazamiento se mantendrá dentro de los límites, se hace una gráfica de densidad equivalente a la profundidad de interés (generalmente a la profundidad de asentamiento de la zapata) versus el tiempo de la operación.

Si se observa que el límite de presión de fractura ha sido alcanzado o sobrepasado, se recomienda hacer cualquiera de las siguientes cosas:

- Disminuir los caudales de bombeo (considerando mantener un flujo turbulento si es posible).
- Disminuir la densidad de los fluidos (alguno(s)), recomendablemente los más pesados. Si se modifica la densidad de las lechadas, conlleva a realizar un nuevo diseño de laboratorio.
- Disminuir el volumen a bombear de los fluidos más densos (generalmente las lechadas de cementación); si se disminuye el volumen de las lechadas, conlleva a modificar el tope del cemento establecido (TOC)

Si se observa que el límite alcanzado es el de presión de poro, se recomienda hacer cualquiera de las siguientes cosas:

- Aumentar la densidad de los fluidos (recomendablemente Fluido lavador, Fluido espaciador); si se modifica la densidad de las lechadas, se debe hacer un nuevo diseño de laboratorio.
- Aumentar el volumen de los fluidos a bombear. Se recomienda disminuir el volumen de fluidos ligeros y aumentar el volumen de fluidos pesados

Si se modifican los parámetros de la operación, se debe realizar una nueva simulación y por lo tanto una nueva evaluación de los nuevos resultados.

5.6.3 Evaluación del tiempo de bombeabilidad. Es necesario que el tiempo total para preparar y bombear las lechadas, sea menor que el tiempo de bombeabilidad (t_b) de las lechadas determinado en laboratorio.

Si el tiempo de bombeabilidad es menor que el tiempo total para preparar y bombear las lechadas, se debe evaluar el diseño de laboratorio y adicionar aditivos retardantes a la mezcla. Esto implica realizar nuevas pruebas de laboratorio y verificar nuevamente que las propiedades obtenidas cumplan con las especificaciones requeridas. Posteriormente se realiza una nueva simulación y se evalúan nuevamente los resultados.

5.7 MODIFICACIONES DE PARÁMETRO INICIALES DE LA OPERACIÓN Y REDISEÑO DE LABORATORIO

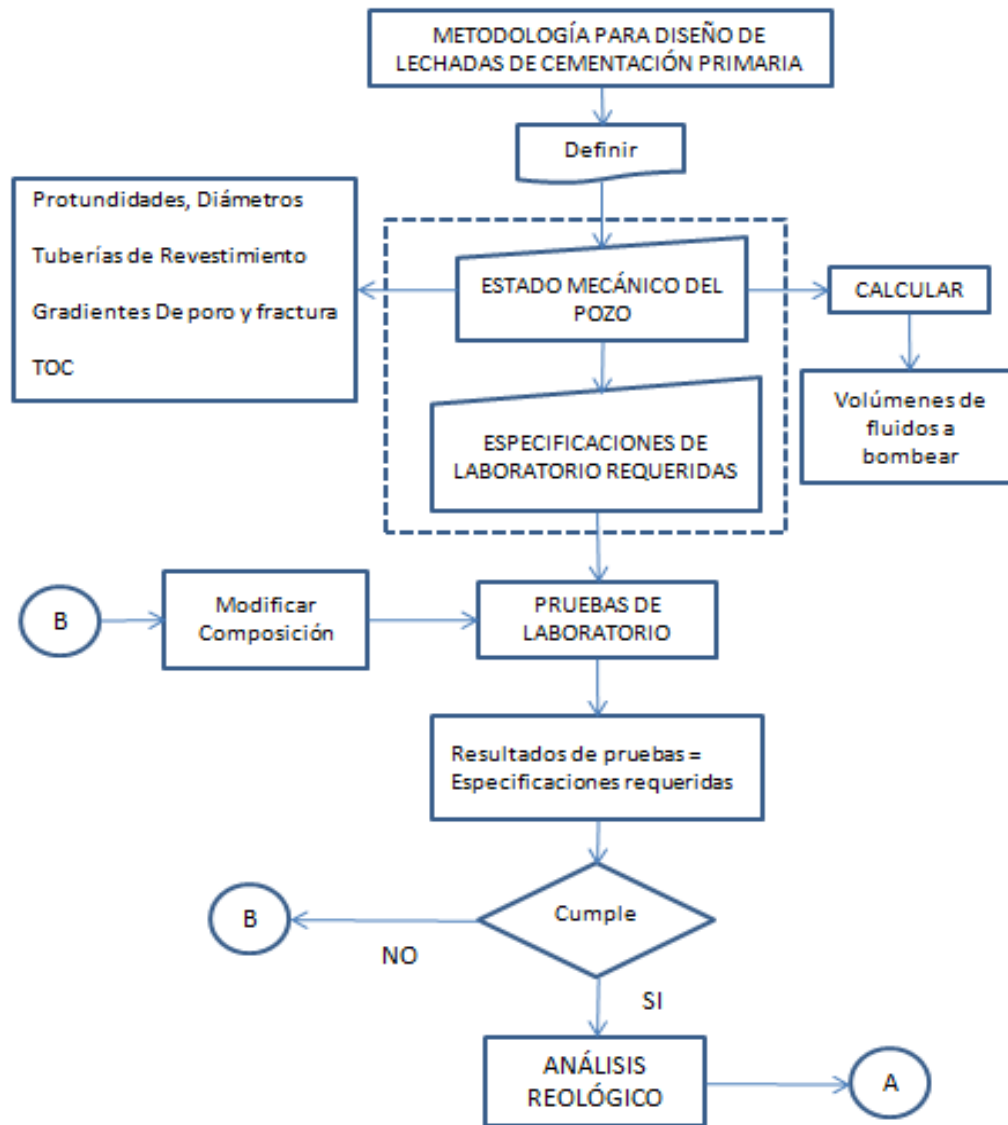
Si la operación de cementación primaria no ha resultado exitosa, es decir, si se han presentado inconvenientes a lo largo de la simulación, es necesario realizar ajustes a los parámetros operacionales establecidos inicialmente ó al diseño inicial de las lechadas de cementación y demás fluidos.

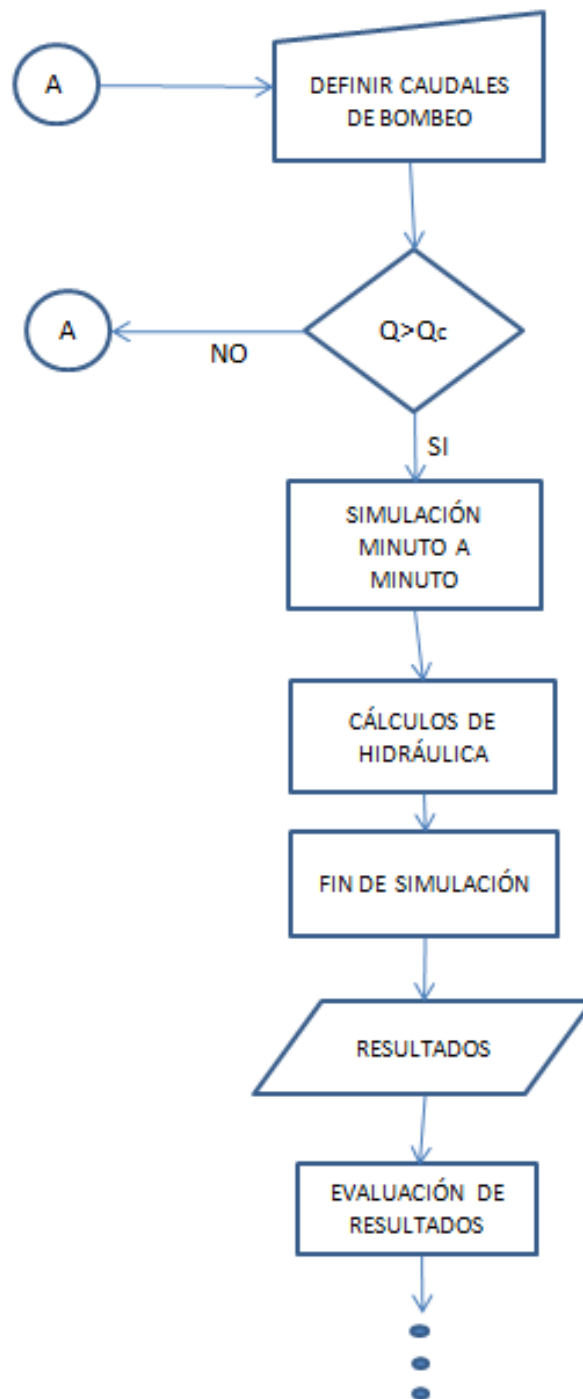
Los caudales de bombeo se deben modificar de acuerdo al tipo de problema que se presente. Es necesario que los nuevos caudales aseguren un flujo turbulento durante la operación, siempre y cuando no se sobrepasen los límites de presión de poro y de fractura de la formación.

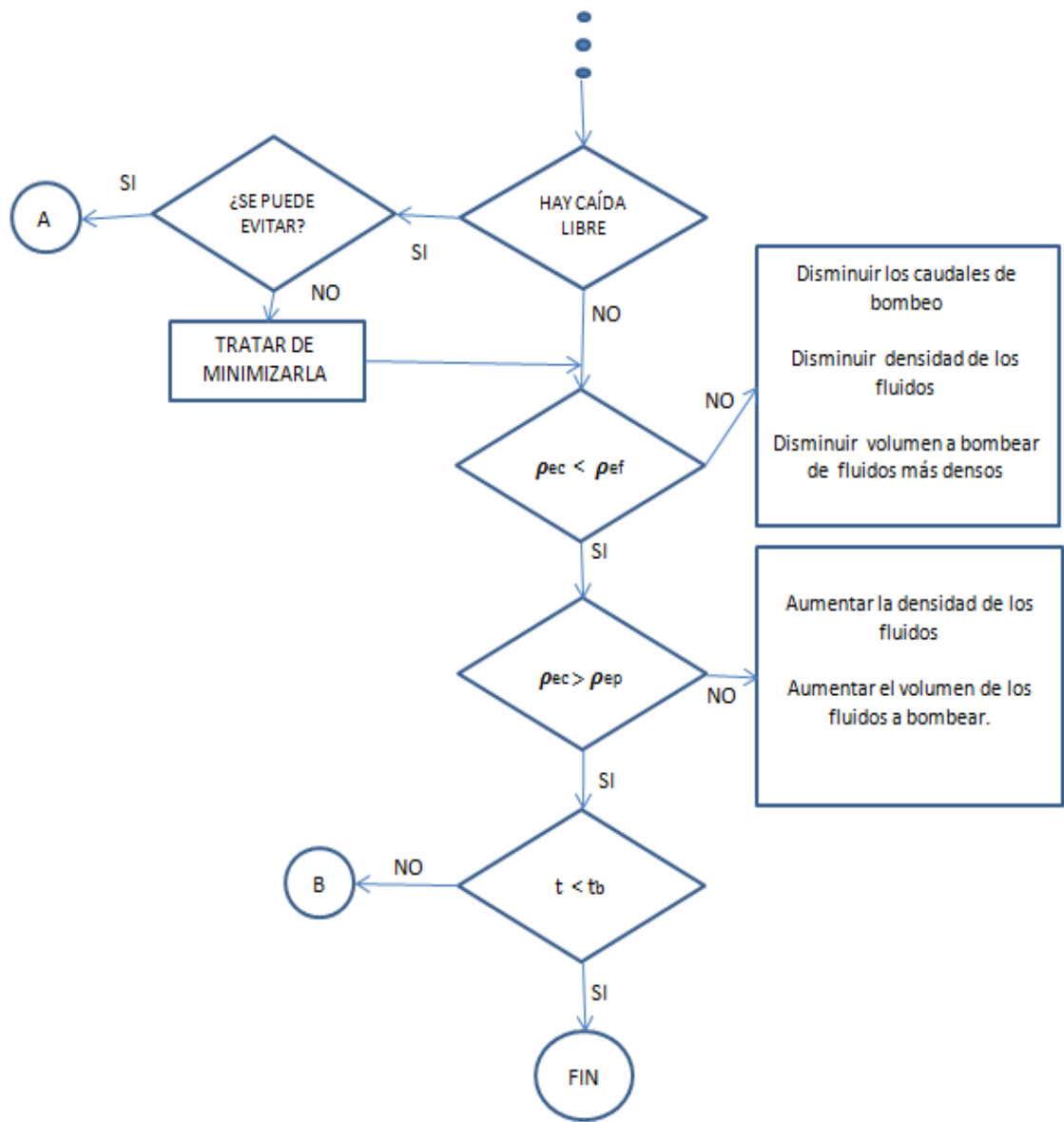
Si se realiza modificaciones a la composición de la mezcla establecida o si se utiliza una nueva composición, debido a que las propiedades actuales no cumplen con los requerimientos del desplazamiento, se debe asegurar nuevamente que las especificaciones requeridas de las pruebas de laboratorio se cumplan.

La Figura 22 contiene el diagrama de flujo que representa el paso a paso de la metodología propuesta.

Figura 22 – Diagrama de flujo metodología







Fuente: Los autores

6. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE CEMSEI

6.1 GENERALIDADES DEL PROGRAMA

El software CEMSEI es una herramienta con énfasis académico que permite al usuario planear operaciones de cementación primaria de una manera sencilla, guiándolo durante la entrada de datos y dándole una breve explicación de por qué son necesarios. Por medio de un análisis hidráulico de los fluidos en el sistema, el programa simula la operación y permite predecir las condiciones que prevalecerán en el pozo a lo largo de esta, de manera que el usuario pueda determinar si con el diseño propuesto se podrá realizar el trabajo sin que se generen problemas.

Este software comienza a ser útil desde la etapa del diseño de laboratorio, debido a que uno de sus módulos de entrada de datos funciona también como un asistente, el cual realiza un balance de materiales con el cual se puede, entre otras cosas, predecir la densidad de la lechada y el rendimiento de cada saco.

Otra de las funciones que posee el software es la de facilitar un análisis reológico de los fluidos que se van a utilizar, de manera que se pueda determinar cuál modelo describe mejor el comportamiento de cada fluido.

La función principal del programa como ya se mencionó anteriormente es realizar un análisis hidráulico y reológico en el sistema a lo largo de la operación de cementación, determinando así los esfuerzos a las que estará sometido el pozo, el régimen de flujo de los fluidos en cada sección y si se presenta caída libre o no entre otras cosas; para esto el software debe ser alimentado con 4 diferentes tipos de datos los cuales se leen desde distintos formularios y se agrupan de la siguiente manera: Estado mecánico, Propiedades de los Fluidos, Parámetros Operacionales y Diseño de laboratorio.

En cada uno de los formularios que se utilizan para lectura de datos, el programa cuenta con un panel de texto que trata de clarificar mediante mensajes, las dudas que podría tener el usuario sobre los datos que se le solicita ingresar y en algunos casos explicar de manera breve para que se utilizará esta.

6.1.1 Modo de operación. Debido a su énfasis académico, el programa alertará si se ha introducido algún dato que carece de consistencia física o que representa un error evidente en el completamiento normal de un pozo (por ejemplo, que un liner se ubique completamente en una zona ya completada), En estos casos el programa no permite llevar a cabo la simulación.

Una vez se han definido correctamente todos los datos necesarios, el programa permite iniciar la simulación, en este punto se le solicitará al usuario que defina ciertos parámetros de la operación y la simulación, como lo son por ejemplo el paso del tiempo que se manejará y los caudales de bombeo para cada fluido; además de esto, mostrará en el mismo formulario los caudales críticos para que cada fluido entre en turbulencia al ingresar al espacio anular del hueco destapado; también permitirá al usuario establecer hasta dos puntos de monitoreo adicionales que se encuentren dentro de la zona descubierta y definir los límites inferior y superior entre los cuales se desea que se mantenga la presión a lo largo de toda la operación. Cuando estos detalles han sido definidos, el programa está listo para simular.

El software necesita en general menos de 3 segundos para realizar todos los cálculos de la operación, por otro lado, requiere de un poco más de tiempo para generar el informe que se mostrará los resultados. En las secciones posteriores se explicará con más detalle cómo se lleva a cabo este procesamiento de datos.

Como resultado final, el programa haciendo uso de *Microsoft Excel*, muestra de manera gráfica la siguiente información en función del tiempo: Caudales de Bombeo y de salida en el sistema, presión hidrostática en el anular y la tubería, pérdidas debido a la fricción en el anular y en la tubería, densidad equivalente de circulación, de fractura y de poro a la profundidad de asentamiento de la zapata y la velocidad de los fluido en el anular; estas gráficas vienen acompañadas de su respectiva tabla de datos que se genera en una hoja aparte y en la cual también se relaciona el volumen de fluido bombeado con las variables ya mencionadas. Igualmente el programa grafica la presión en los puntos críticos del sistema en función del tiempo, es decir, en los puntos donde se presenta un cambio de diámetro, o en los que el usuario determinó que se debía monitorear.

En este informe, también se muestra un resumen que resalta los sucesos importantes que se determinaron durante la simulación, por ejemplo, que el tiempo de fraguado de alguna lechada es insuficiente para llevar a cabo la operación; además se genera también, en otra hoja, un listado detallado de la cantidad de materiales necesarios para preparar las lechas de acuerdo con el diseño de laboratorio dado.

Finalmente el programa cuenta también con una herramienta de visualización que permite al usuario de manera sencilla, observar entre otras cosas: la posición de los fluidos en cada momento, el régimen de flujo en cada sección y la presencia de “vacío” que se podría dar debido al efecto de caída libre.

Esta herramienta fue desarrollada haciendo uso de *Visual Basic 2008 Express Edition* y la codificación se encuentra disponible para que pueda ser estudiada libremente. En las siguientes secciones se explicará con más detalle el funcionamiento y proceso de desarrollo de este software, describiendo los sistemas de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de la información.

Para información más detallada del funcionamiento del software CEMSEI se pueden consultar los manuales de usuario y técnico, a los cuales se puede acceder desde el menú “Ayuda” de la herramienta.

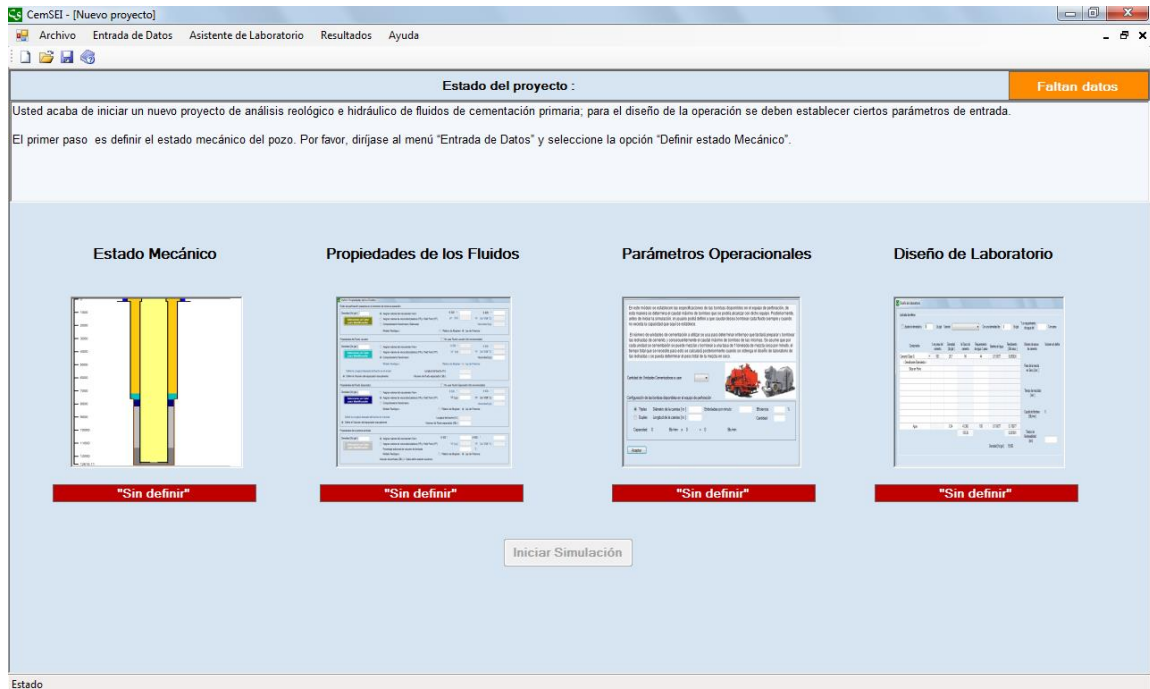
6.2 PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Como ya se mencionó con anterioridad al programa se le deben suministrar 4 diferentes tipos de datos, los cuales se ingresan por medio de diferentes formularios; a continuación se describirá de qué manera el programa almacena estos datos y qué facilidades permite durante el ingreso.

6.2.1. Base de trabajo. Este es el formulario que se muestra inmediatamente se inicia un nuevo proyecto, o se carga uno previamente guardado, está comprendido por un panel de texto que brinda al usuario información de cómo debe proseguir para iniciar un proyecto nuevo, una imagen y etiquetas de distinto color relacionadas con cada tipo de datos que

el usuario debe ingresar y el botón que permite iniciar la simulación; la Figura 23 muestra este formulario en el momento de iniciar un nuevo proyecto.

Figura 23. Formulario Base



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

Las etiquetas rojas que aparecen en la figura anterior manejan un código de colores para indicar al usuario el estado de cada grupo de datos de la siguiente manera: rojo cuando los datos no se han definido, naranja cuando los datos introducidos están incompletos y verde cuando los datos se ingresaron correctamente; en este formulario no se registran datos y representa solo una ayuda para el usuario en el manejo del programa.

6.2.2 Definición del estado mecánico. El estado mecánico es definido por medio de un formulario en el cual se registra la siguiente información: profundidad de la última sección perforada y el diámetro del agujero; profundidad de asentamiento y diámetro interno del casing anterior si lo hay; profundidad de asentamiento del casing que se va a cementar y la profundidad a la que se encuentra el collar flotador; el tipo o tipos de casing que componen la sarta que se desea cementar, y en caso de usarse liner, la sarta de

asentamiento usada, y la profundidad y diámetro del liner previo si lo hay; también se leen los topes de cemento planeados para cada lechada y los gradientes de poro y de fractura que se tienen a la profundidad de asentamiento de la zapata. La Figura 24 muestra el formulario “Definir Estado Mecánico”.

Figura 24. Formulario Definir Estado Mecánico

Profundidad Perforada [ft]	12450.79
Diámetro del agujero [in]	12.25
No hay casing previo	<input type="checkbox"/>
Profundidad de asentamiento del ultimo casing [ft]	7450.79
Seleccione el tipo de casing	OD= 13.375 Grado=J55 peso nominal=54.5
Configuración de la tubería de revestimiento a cementar	Cementar Liner <input type="checkbox"/>
Número de secciones de diferente tipo de revestimiento a cementar	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3
Profundidad de asentamiento de la zapata [ft]	12408.14
Profundidad del collar flotador [ft]	12290.03
Seleccione el tipo de casing	OD= 9.625 Grado=J55 peso nominal=40.00
Tope de la lechada de relleno [ft]	8202
Tope de la lechada de cola [ft]	11310.9
Usar una sola lechada	<input type="checkbox"/>
Gradiente de poro de la formación [psi/ft]	0.43
Gradiente de fractura de la formación [psi/ft]	0.77

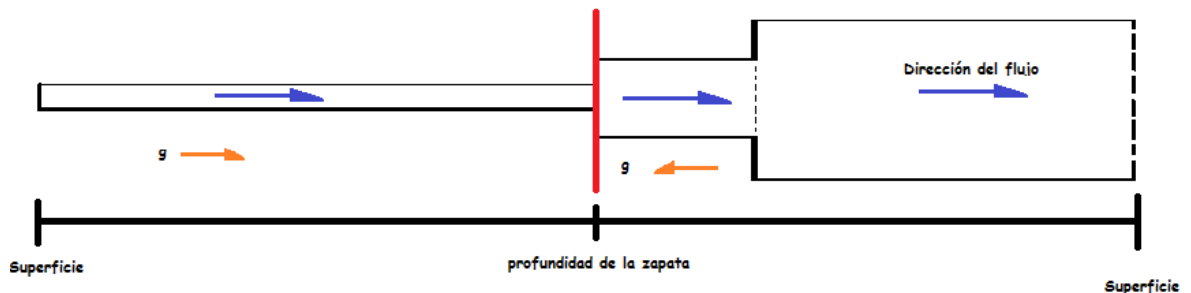
Fuente: Herramienta Software CEMSEI

Como se aprecia en la figura, este formulario cuenta con un panel de imagen que dibuja automáticamente, el estado mecánico que se está definiendo, esto, como una ayuda al usuario; el programa muestra además un panel de texto donde presenta información al usuario como ya se describió anteriormente y una serie de listas desplegables que permiten al usuario elegir entre diferentes referencias de tuberías de revestimiento; También se le facilita al usuario ingresar los datos ya sea en unidades de campo o internacionales, finalmente todos los datos son transformados a unidades de campo.

Una vez se presiona el botón aceptar, el programa almacena los datos de la siguiente manera: guarda los gradientes en dos variables y utiliza el resto de información del estado

para calcular el volumen necesario de cada lechada y de fluido desplazante (volumen al interior de la tubería hasta el collar flotador), y generar un sistema unidimensional, almacenando los diámetros y la ubicación de cada sección de diámetro constante en diferentes vectores, esto con el fin de poder aplicar posteriormente, durante el análisis, el modelo desarrollado por Campos, Lage y Poggio⁴¹ para la predicción caída libre y presiones durante operaciones de cementación primaria; este modelo será explicado posteriormente en la sección de procesamiento de la información. La Figura 25 muestra un esquema de básico del sistema 1D que se plantea, el número de secciones de diámetro constante variará de acuerdo a la geometría que describa el estado mecánico.

Figura 25. Esquema del sistema 1D almacenado



Fuente: Los autores

6.2.3 Definición de las propiedades de los Fluidos en la Operación. De manera similar que con el estado mecánico, el programa utiliza un formulario para leer las propiedades de los fluidos a utilizar durante la cementación; aquí el programa almacena mediante vectores las siguientes propiedades: densidad del fluido, modelo reológico que describe su comportamiento, las lecturas del viscosímetro de Fann $\Theta 600$ y $\Theta 300$, y el volumen a bombear de cada fluido; también pueden ser ingresados los datos de viscosidad plástica y yield point en lugar de las lecturas del viscosímetro, el programa convertirá automáticamente estos valores a lecturas del viscosímetro para almacenarlos.

En el caso de las lechadas y el desplazante el volumen es calculado automáticamente, aunque para las lechadas se da la opción de adicionar un exceso; para los fluidos lavador

⁴¹ CAMPOS (Wellington), Op. cit., 2p

y espaciador se da la opción de definir este volumen manualmente o pedirle al software que lo calcule para obtener el largo deseado del bache de fluido en el anular, eso siempre y cuando se haya definido previamente el estado mecánico; el programa también da la opción de usar o no fluido lavador o espaciador. La Figura 26 muestra parcialmente el formulario “Definir propiedades del los Fluidos”.

Figura 26. Formulario Definir propiedades del los Fluidos

Fuente: Herramienta Software CEMSEI

6.2.4 Definición de los parámetros operacionales. El tercer grupo de datos que se deben ingresar corresponden a las propiedades de la bomba del equipo de perforación y la cantidad de unidades de cementación a utilizar, estos datos se utilizarán para determinar el máximo caudal al que se podrán bombear los fluidos.

Dependiendo de si se dispone de bombas duplex o triplex, el programa hará uso de las ecuaciones 6.1 o 6.2 respectivamente, y calculará el caudal máximo al que se podrán bombear los fluidos que serán impulsados por este equipo; este caudal será almacenado y usado posteriormente como límite superior cuando se le solicite al usuario seleccionar los caudales de bombeo (excepto para las lechadas).

$$Q_{max} = \frac{0.02575}{159} (2Dc^2 - Dv^2) * (Lv) * (N) * (E) * (n) \quad (6.1)$$

$$Q_{max} = \frac{0.03862}{159} (Dc^2) * (Lv) * (N) * (E) * (n) \quad (6.2)$$

- Q_{max} = Caudal máximo [Bb/min]
 Dc = Diámetro de la camisa [in]
 Dv = Diámetro del vástago [in]
 Lv = Longitud del vástago [in]
 N = Número de emboladas por minuto
 E = Eficiencia
 n = Número de bombas

Básicamente en este formulario se leen solo dos variables, el caudal máximo que permite el equipo, el cual es calculado por el software de acuerdo a los datos ya nombrados, y el número de unidades de cementación, el cual será usado más adelante por otro formulario de entrada. La Figura 27 muestra el formulario de entrada de los parámetros operacionales.

Figura 27. Formulario de entrada de los parámetros operacionales

Definir Parámetros Operacionales

En este módulo se establecen las especificaciones de las bombas disponibles en el equipo de perforación, de esta manera se determina el caudal máximo de bombeo que se podría alcanzar con dicho equipo. Posteriormente, antes de iniciar la simulación, el usuario podrá definir a que caudal desea bombear cada fluido siempre y cuando no exceda la capacidad que aquí se establece.

El número de unidades de cementación a utilizar se usa para determinar el tiempo que tardará preparar y bombear las lechadas de cemento, y consecuentemente el caudal máximo de bombeo de las mismas. Se asume que por cada unidad de cementación se puede mezclar y bombear a una tasa de 1 tonelada de mezcla seca por minuto, el tiempo total que se necesite para esto se calculará posteriormente cuando se obtenga el diseño de laboratorio de las lechadas y se pueda determinar el peso total de la mezcla en seco.

Cantidad de Unidades Cementadoras a usar: 2

Configuración de las bombas disponibles en el equipo de perforación

Triplex Diámetro de la camisa [in] 7 Emboladas por minuto 100 Eficiencia 85 %
 Duplex Longitud de la camisa [in] 12 Cantidad 1

Capacidad: 12,140 Bb/min x 1 = 12,14 Bb/min

Aceptar

Fuente: Herramienta Software CEMSEI

cada aditivo: el porcentaje en peso del cemento al que se adicionará, su densidad y el requerimiento de agua de este como porcentaje en peso del aditivo; el programa facilita un archivo adjunto en el cual muestra un listado de los aditivos más comunes junto con estas propiedades.

El balance de materiales se realiza de la siguiente manera: conociendo el porcentaje en peso al que se adicionará cada aditivo y las libras en un saco de cemento, se obtienen las libras necesarias de cada aditivo por saco de cemento a usar, con este valor y con el requerimiento de agua de cada material se puede obtener el agua total de mezcla que se adicionará por saco de cemento; por medio de estos dos últimos valores y la densidad de cada uno de los materiales se puede estimar el rendimiento (volumen) que aporta cada uno, incluyendo el agua, haciendo uso de la expresión 6.3; cabe resaltar que todos los cálculos están hechos sobre la base de un saco de cemento.

$$Rendimiento_i \left[\frac{Bb}{saco} \right] = \frac{masa_i \text{ por saco de cemento } \left[\frac{lb}{saco} \right]}{densidad_i \left[\frac{lb}{gal} \right] * 42 \left[\frac{gal}{Bb} \right]} \quad (6.3)$$

Con la suma del rendimiento de cada compuesto se obtiene el rendimiento total del diseño, es decir, el volumen que se podrá generar por saco de cemento; por otro lado, ya se conocen las libras que aporta cada compuesto por saco de cemento, si se suman, se determina el peso total que tendrá la lechada por cada saco de cemento, si se divide este valor sobre el rendimiento (haciendo el ajuste de unidades correspondiente), se determina la densidad que tendrá la lechada. La consistencia dimensional se comprueba con la siguiente expresión.

$$Densidad \left[\frac{lb}{gal} \right] = \frac{masa \text{ total por saco de cemento } \left[\frac{lb}{saco} \right]}{Rendimiento \text{ total } \left[\frac{Bb}{saco} \right] * 42 \left[\frac{gal}{Bb} \right]} \quad (6.4)$$

6.2.5.1 Ajuste de la densidad a un valor determinado. Una de las funciones con las que cuenta este formulario, es la de agregar automáticamente la cantidad necesaria de densificante o extendedor para ajustar la densidad de la lechada a un valor deseado, para que el programa realice este cálculo, es necesario que se le indique que compuesto se

desea usar, su densidad, y el requerimiento de agua de este; El programa facilita mediante un listado, los agentes pesantes y extendedores más usados en el laboratorio, y una vez se selecciona uno de estos, asigna de manera automatizada los valores correspondientes de densidad y requerimiento de agua según el agente a usar, de igual forma, estos últimos valores pueden ser modificados por el usuario. Para usar esta función basta con activar una casilla de verificación situada en el formulario.

La cantidad de aditivo que se debe agregar se calcula mediante el siguiente balance: por definición se sabe que la densidad de la lechada una vez se agrega el agente pesante estará dada por la ecuación 6.5.

$$\rho_l = \frac{m_1 + m_p + m_w}{V_1 + V_p + V_w} \quad (6.5)$$

Donde:

ρ_l = Densidad final de la lechada

m_1 = Masa de la lechada sin el agente

V_1 = Volumen de la lechada sin el agente

m_p = Masa del agente

V_p = Volumen que ocupa el agente

V_w = Volumen de agua requerido por el agente

m_w = Masa del agua necesaria por el agente

Ya que se desea encontrar la masa del agente pesante (m_p) y se conoce la densidad de este (ρ_p) se puede remplazar su volumen usando la expresión 6.6; la masa y el volumen de la lechada antes del agente se conocen del balance hecho previamente, la masa de agua se puede obtener usando la ecuación 6.7 ya que se conoce el porcentaje requerido en peso del compuesto (R), y finalmente el volumen agua se obtiene conociendo la densidad de esta de acuerdo con 6.8.

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p} \quad (6.6)$$

$$m_w = R * m_p \quad (6.7)$$

$$V_w = \frac{m_w}{\rho_w} \quad (6.8)$$

Remplazando 6.6, 6.7 y 6.8 en 6.5 se eliminan todas las incógnitas excepto la masa del agente pesante, despejando se obtiene la ecuación (6.9), la cual es usada por el programa para el cálculo de la cantidad de agente pesante o adelgazante necesario para alcanzar la densidad deseada (ρ_i)

$$m_p = \frac{m_1 - \rho_l * V_1}{\frac{\rho_l}{\rho_p} + \frac{\rho_l * R}{\rho_w} - 1 - R} \quad (6.9)$$

6.2.6 Establecer Ubicación Offshore. Cuando el caso de estudio es un pozo en una ubicación offshore se debe hacer uso de un formulario adicional al que se puede acceder desde del menú “Entrada de datos”, en este formulario se registra la siguiente información: Profundidad de la capa de agua, Diámetros internos y externos de la sarta de asentamiento, y el diámetro interno del riser que se está usando. La Figura 29 muestra el formulario mediante el cual se definen estos datos.

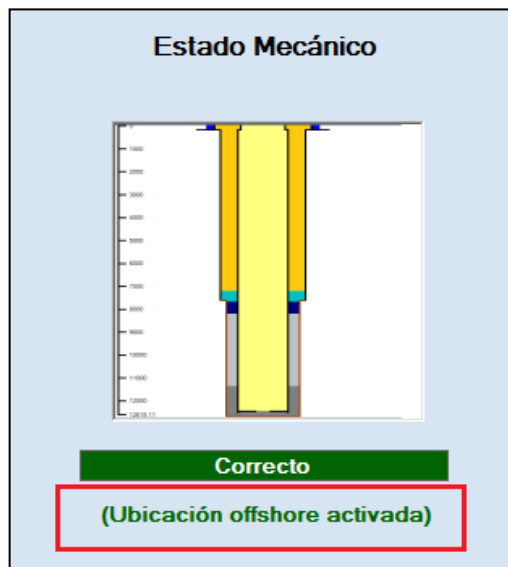
Figura 29. Formulario para establecer una ubicación offshore

Fuente: Herramienta software CEMSEI

Si la información necesaria se define correctamente el programa mostrará una etiqueta verde adicional en el formulario base (desde el que se inicia la operación), cuando los datos digitados son incorrectos o están incompletos la etiqueta será de un tono rojizo, en este caso el programa no impedirá la simulación, pero, no tendrá en cuenta que se trata de una ubicación costa afuera, es decir, realizará el análisis como si se tratase de un pozo onshore. La Figura 30 muestra la etiqueta que indica que la ubicación offshore fue definida correctamente.

Los valores que se leen y se almacenan en esta etapa serán usados más adelante al iniciar la simulación, donde el programa adicionará dos nuevas secciones de diámetro constante al sistema, una al principio y una al final, esto con el fin de tener en cuenta el recorrido de los fluidos desde el equipo de perforación hasta el lecho marino y su retorno por el riser, y cuantificar la presión hidrostática que esta profundidad adicional aporta; la sección del principio representa el interior de la sarta de asentamiento, y la del final, el anular formado entre la sarta de asentamiento y el riser.

Figura 30. Confirmación de la que la ubicación offshore fue establecida



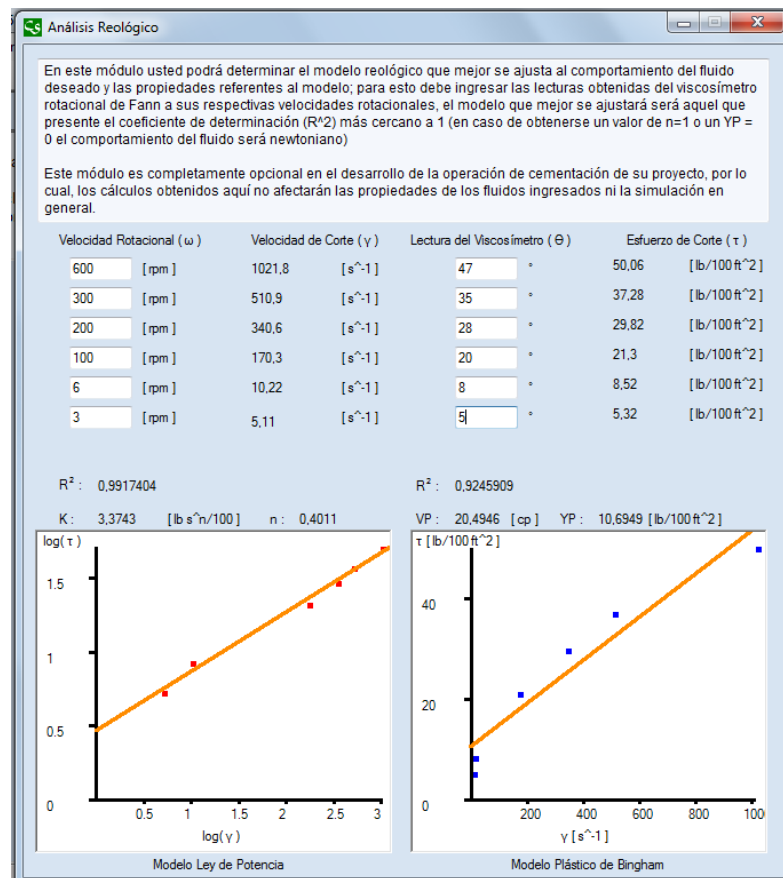
Fuente: Herramienta software CEMSEI

Al finalizar el análisis, estas secciones adicionales son retiradas para evitar que se acumulen conforme se realizan más simulaciones, y los vectores que almacenan la

información de las secciones (y que describen la geometría del pozo) vuelven a tener los valores que les fueron asignados en la definición del estado mecánico.

6.2.7 Formulario de Análisis Reológico. Este formulario es de uso totalmente opcional y no registra ningún dato que sea usado en la simulación, por otra parte, es de gran utilidad ya que permite determinar qué modelo reológico describe mejor el comportamiento de un fluido del cual se poseen por lo menos 3 lecturas del viscosímetro rotacional; cabe recordar que el modelo reológico que describe cada fluido sí es un dato de entrada y que tendrá un efecto directo sobre los resultados, por esto, siempre que se tengan suficientes lecturas del viscosímetro (por lo menos 3) se debe realizar este análisis reológico con el fin mejorar la calidad de la predicción realizada por el programa. La Figura 31 muestra la estructura de este formulario.

Figura 31. Formulario de Análisis Reológico



Fuente: Herramienta software CEMSEI

Como se puede observar en la imagen, se permite al usuario ingresar hasta 6 diferentes lecturas a sus respectivas velocidades. El programa calcula inmediatamente los valores de velocidad de corte y esfuerzo de corte, y realiza las gráficas correspondientes para el modelo de Ley de Potencia (logarítmica) y el modelo de Plástico de Bingham (cartesiana); después de esto aplica regresión lineal sobre los puntos de estas gráficas y determina los parámetros usados para describir el comportamiento del fluido estudiado según cada modelo, es decir, viscosidad plástica y yield point para el plástico de Bingham, y “n” y “k” para el de ley de potencia; también calcula el coeficiente de determinación (R^2) de la regresión, de manera que se pueda saber qué modelo describe mejor el comportamiento del fluido.

Se dice que son necesarios 3 puntos o más debido a que si se utilizan solo 2, el coeficiente de determinación será igual a 1 para ambos casos, haciendo imposible determinar qué modelo es el que más se ajusta.

6.2.8 Definir Parámetros de la Simulación. Otro grupo de información que es necesaria, es la referente a la simulación que se desea realizar, por esto, una vez se presiona el botón “Iniciar Simulación”, el programa abre un formulario en el que se define básicamente 4 cosas: el paso de tiempo a trabajar, los caudales de bombeo para cada fluido, la configuración de tapones y la presencia de zonas de presión anormal.

El paso de tiempo y los caudales se definen por medio de barras deslizantes, cuyos valores oscilan entre 1 y 2 minutos para el tiempo; y 0.01 Bb/min y el caudal máximo calculado (de los parámetros operacionales y el diseño de laboratorio) para los caudales de cada fluido. Para los tapones el programa permite por medio de cajas de confirmación para seleccionar el uso de uno u otro, mientras que para el monitoreo de zonas de presión anormal, se deben ingresar datos más puntuales como profundidad y presión de poro y de fractura (ver manual de usuario). La Figura 32 muestra el formulario mencionado.

Como se puede apreciar en la parte derecha de la figura, en este formulario se muestran los caudales críticos para entrar en turbulencia, los cuales fueron calculados con la información reológica previamente introducida.

Una vez se presiona el botón “Iniciar” se da inicio a la simulación; la información leída en el modulo es almacenada en las respectivas variables, y los caudales son almacenados en un vector con el gasto programado para cada fluido.

Figura 32 – Formulario para definir los parámetros de Simulación

Antes de comenzar con la simulación de la operación de cementación por favor ajuste los caudales a los que desea bombear cada fluido y el paso de tiempo al que desea simular; en la columna de la derecha se muestran los caudales mínimos a los que se deben desplazar los fluidos al entrar al anular para alcanzar la turbulencia, lo cual es conveniente para un óptimo desplazamiento y remoción del fluido de perforación.

El programa monitoreará la presión en cada interfaz de sección de diámetro constante del sistema; adicionalmente si hay presencia en el anular de zonas de alta presión o zonas frágiles, se puede indicar al programa que monitoree estos puntos; para esto active las opciones en la parte inferior del formulario.

Parámetro	Valor	Unidad	Caudal crítico para alcanzar turbulencia en el anular	Unidad
Paso de tiempo	1	min	47.96	Bb/min
Fluido de perforación			0.49	Bb/min
Caudal para el lavador	12.14	Bb/min	0.32	Bb/min
Caudal para el espaciador	12.14	Bb/min	11.44	Bb/min
Caudal para la primer lechada	9.5	Bb/min	11.29	Bb/min
Caudal para la segunda lechada	6.57	Bb/min		
Caudal de desplazamiento	12.14	Bb/min		

Tapón Inferior Tapón Superior
 Monitorear zona de presión anormal (En el anular destapado)
 Profundidad [ft] Presión de Fractura [psia] Presión de Poro [psia]
 Monitorear otra zona de presión anormal (En el anular destapado)
 Profundidad [ft] Presión de Fractura [psia] Presión de Poro [psia]

Fuente: Herramienta software CEMSEI

6.3 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Una vez el programa cuenta con la mínima información necesaria para realizar el análisis hidráulico, está listo para iniciar la simulación de la operación; en esta etapa, el software predice el desplazamiento de los fluidos a lo largo del pozo durante toda la cementación, y estima el valor de diferentes propiedades que se deben controlar con el fin de saber si el diseño planteado dará como resultado una cementación exitosa o no.

Para realizar la simulación, el programa cuenta con un modulo programado en lenguaje BASIC, el cual haciendo uso de las ecuaciones correspondientes para cada caso, calcula las presiones en diversos puntos del sistema, y por medio de un balance macroscópico,

basado en la conservación de la masa y la energía, estima el valor del cambio del caudal con respecto al tiempo (dq/dt); conociendo este valor y usando métodos numéricos el software puede predecir las condiciones futuras del sistema, y de esta manera repetir cíclicamente los cálculos avanzando en el tiempo de acuerdo con el paso determinado por el usuario, hasta que se cumplan los volúmenes de bombeo programados para cada fluido.

A continuación se describirá de manera más detallada el funcionamiento de las distintas partes del procedimiento usado por el programa para simular la operación.

6.3.1 Simulación del desplazamiento de los fluidos. Como ya se mencionó brevemente antes, los cálculos realizan repetidamente para cada instante de tiempo, esto se logra mediante el uso de dos ciclos, uno que se repite un número definido de veces y otro cuya duración será condicionada.

El primer ciclo, el cual engloba el segundo, se repetirá un número definido de veces, el que estará dado por el número de etapas que se tengan programadas, es decir, la cantidad de diferentes fluidos que se desean bombear, se debe tener en cuenta, que ya se cuenta con vectores que almacenan el volumen y el caudal programados para cada fluido.

A diferencia del primer ciclo, el segundo se repetirá indefinidamente hasta que se complete el volumen programado en cada etapa, esto se hace llevando un acumulador que registra la cantidad de volumen bombeado de cada fluido, y que incrementará en cada iteración a razón del producto del caudal por el paso de tiempo.

Para controlar la posición de los fluidos en el sistema, se lleva un registro de la cantidad de fluido en general que ha entrado al sistema y de la cantidad que ha salido, cabe recordar que los caudales de entrada y de salida al sistema no son siempre los mismos, de manera que cuando el total de fluido que ha abandonado el pozo, es mayor que la cantidad que ha ingresado, se detecta la presencia de “vacío” en el sistema; por el contrario, no se puede dar que la cantidad de fluido que ingresa sea mayor que la sale del sistema, esto debido a que se asume que todos los fluidos en el sistema son

incompresibles, de acuerdo con el modelo planteado por Campos, Lage y Poggio⁴², el cual será usado posteriormente en el cálculo de la derivada del caudal con respecto al tiempo, entonces, cuando la cantidad de fluido que ha entrado supera la cantidad que ha salido, se entiende que el sistema no está en caída libre, y que los caudales de entrada y salida deben ser los mismos, al igual que los volúmenes totales de entrada y salida.

Es importante recordar que también se conocen la geometría y dimensiones del pozo, de manera que usando esta información el software puede calcular el volumen de cada una de las secciones de diámetro constante que componen el sistema y el volumen total que hay entre el origen y cada interfaz de sección de diámetro constante, información que será utilizada por el software para determinar la ubicación de los fluidos como se explicara a continuación.

6.3.1.1 Determinación de la posición de los fluidos. Para registrar la ubicación de los fluidos en cada instante de tiempo el programa usa una matriz tridimensional en la cual se almacena el porcentaje que ocupa cada fluido de una determinada sección de diámetro constante en un tiempo, siendo cada uno de sus valores representado así: *porcentaje llenado (tiempo, fluido, sección)*.

El cálculo de este porcentaje se realiza por medio de un balance del volumen que sale y entra al sistema de cada fluido, y el volumen conocido de las secciones de diámetro constante, todo bajo la hipótesis de que todos los fluidos en el sistema incompresibles, el fluido bombeado aparece directamente sobre la interfaz fluido-vacio, y las paredes en el anular y el casing son rígidas; se debe recordar que las propiedades de los fluidos son almacenadas en vectores ordenados en el mismo orden que estos serán bombeados, por ejemplo el lodo será el primer fluido (subíndice 0) y el desplazante será el último fluido (subíndice n, donde n es el número de fluidos a bombear).

Teniendo en cuenta lo anterior, el primer paso para determinar el porcentaje de llenado, es calcular el volumen que existe entre el origen y la interfaz anterior de cada fluido, esto se logra sustrayendo al volumen que ha abandonado el sistema, el volumen de liquido

⁴² CAMPOS (Wellington), Op. cit., 1p

que ha sido bombeado este fluido y antes de este fluido, tal como lo expresa la ecuación 6.10.

$$Volantes(i) = Volsalida - \sum_{j=1}^i Volbombeado(j) \quad (6.10)$$

Donde,

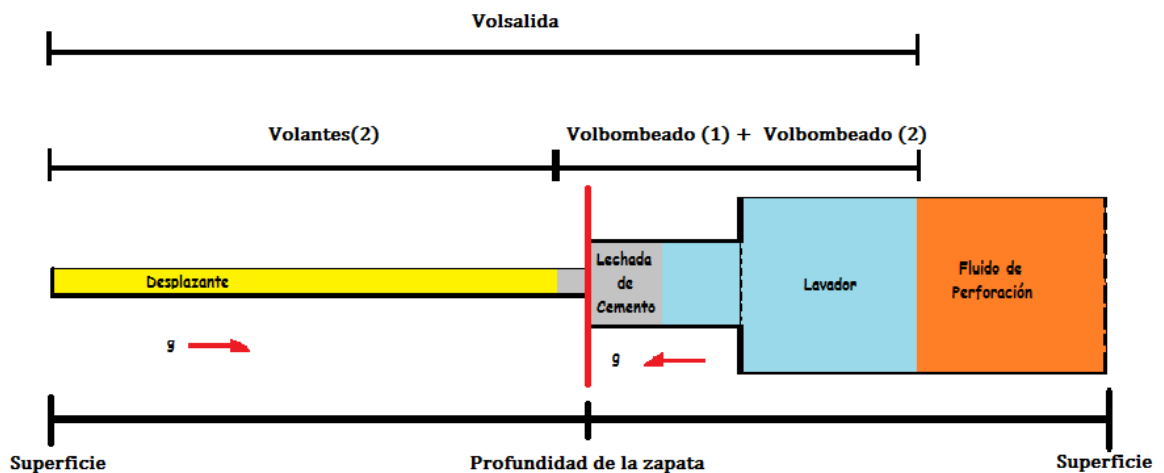
$Volantes(i)$ = Volumen que existe entre el origen y la interfaz del fluido i

$Volsalida$ = Volumen que ha abandonado el sistema

$Volbombeado(j)$ = Volumen bombeado del fluido j

La Figura 33 muestra de manera más explícita los términos de la anterior ecuación, en esta ocasión la ilustración representa el balance para fluido número 2, que para este caso sería la lechada de cemento; recuérdese que el fluido de perforación que está presente en el momento de iniciar la operación se denotará siempre como el fluido 0.

Figura 33. Esquema del balance de volumen

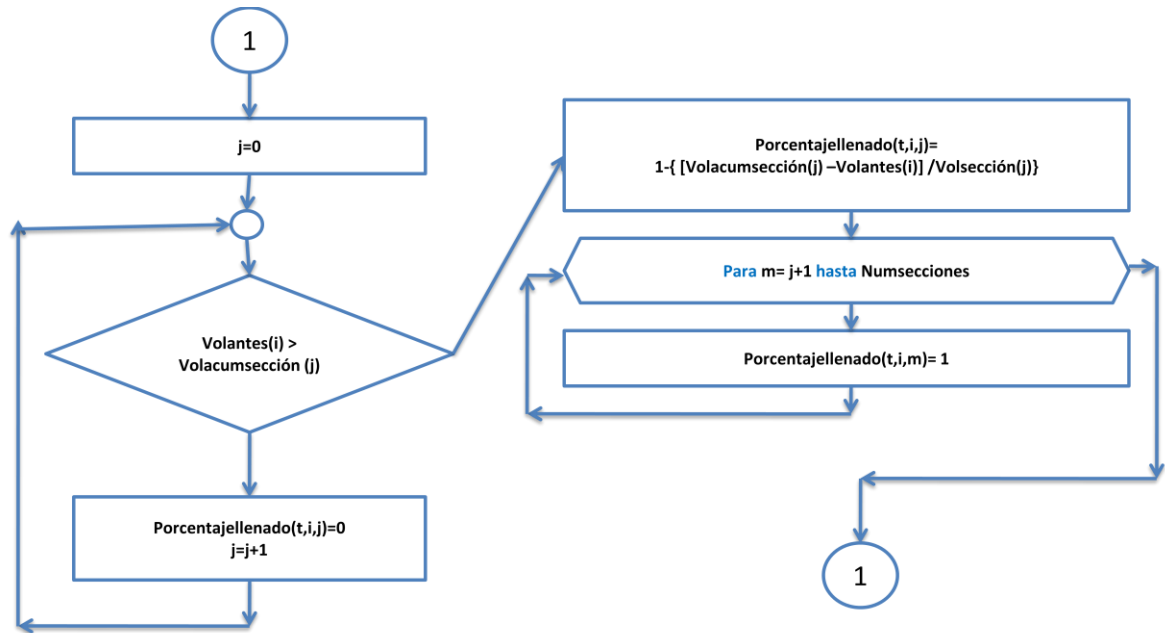


Fuente: Los autores

Una vez se conoce el volumen que hay entre el origen del sistema y la interfaz de un fluido, se puede determinar en qué sección se encuentra esta e igualmente calcular que fracción de dicha sección se encuentra llena de este fluido. La Figura 34 muestra un

diagrama de flujo del procedimiento que se toma para calcular el porcentaje de llenado de un fluido.

Figura 34. Diagrama de flujo para obtener el porcentaje de llenado de un fluido



Fuente: Los autores

En esta ilustración el vector *Volacumsección(j)* almacena el volumen de la sección j más el de las secciones anteriores, mientras que el vector *Volsección(i)*, almacena el Volumen de la sección j nada más, la variables *Numsecciones* se refiere al número de secciones de diámetro constante que componen el sistema; Este fragmento de la programación debe ser repetido para cada fluido en cada tiempo.

Es importante mencionar que como se observa en el diagrama, se le asigna un valor de porcentaje de llenado igual a 1 a las secciones posteriores a donde se encuentra la interfaz, lo cual solo se cumplirá para el fluido número 0, por esto, el porcentaje calculado se debe corregir posteriormente restándole el porcentaje en la misma sección del fluido anterior, por ejemplo, al fluido número 2 en la sección 2, se le debe restar el porcentaje del fluido 1 en la misma sección.

De esta manera al finalizar esta etapa del procesamiento se obtiene una matriz en la cual está almacenado la fracción de sección que está ocupada por cada fluido en un tiempo; cabe resaltar que el sistema unidimensional no tiene en cuenta el espacio comprendido entre la zapata y la profundidad total perforada, ya que aquí no se presenta flujo, por esto, en el caso en que la zapata se encuentra por encima de la profundidad total perforada se usa una matriz auxiliar que si tiene en cuenta este volumen y que solo será usada en la determinación de la posición de los fluidos mas no en los otros cálculos necesarios.

6.3.2. Cálculo de las presiones en el sistema. La determinación de las presiones en los diferentes puntos del sistema, se lleva a cabo secuencialmente partiendo la única presión conocida del sistema, la cual es la presión a la salida del anular y que será la atmosférica; teniendo este valor y adicionando la presión debido a la fricción, hidrostática e inercia que aporta cada sección el programa obtiene la presión en las interfaces de sección de diámetro constante. Las ecuaciones 6.11⁴³ y 6.12 muestran la expresión matemática permite este cálculo.

$$P_k = P_{k+1} + \sum_{i=0}^n \rho_i * g * \delta * h_{ij} + \rho_i * \left(\frac{L_{ij}}{A_j}\right) * \left(\frac{dq}{dt}\right) + L_{ij} \left|\frac{dP_f}{ds}\right|_{ij} \quad (6.11)$$

$$P_k = P_{k+1} + P_{hidrostática}(j) + P_{inercia}(j) + P_{fricción}(j) \quad (6.12)$$

Donde,

ρ_i = Densidad del Fluido i

g = Aceleración de la gravedad

h_{ij} = Altura del fluido i en la sección j

L_{ij} = Largo del bache del fluido i en j

δ = -1 en la tubería, 1 en el anular

n = Número de fluidos

A_j = Área transversal de la sección j

$\left|\frac{dP_f}{ds}\right|_{ij}$ = Pérdidas unitarias de presión debido a la fricción

q = Caudal

⁴³ CAMPOS (Wellington), Op. cit., 1p

$\frac{dq}{dt}$ = Tasa de cambio del caudal con respecto al tiempo

En 6.11 y 6.12 el subíndice k denota cada una de las interfaces de sección de diámetro constante, mientras que j representa cada sección; j y k deben tomar el mismo valor cada vez que se aplique la ecuación, la cual debe usarse variando el valor de k desde el número de secciones hasta 0, para cada instante de tiempo.

En las secciones posteriores se explicará con más detalle de qué manera se obtienen los términos de la ecuación 6.12.

6.3.2.1 Determinación de la presión debido a la fricción. Para encontrar las pérdidas debido a la fricción el programa debe primero encontrar la velocidad a la que se desplazan los fluidos por el sistema, se debe tener en cuenta que la velocidad dependerá exclusivamente del caudal y del área transversal de flujo, es decir, se tendrá una misma velocidad a lo largo de cada sección de diámetro constante que conforma el sistema, independientemente de los fluidos que se encuentren en la sección.

Una vez que se tiene la velocidad en cada sección, el software usa una serie de subrutinas y funciones para determinar los distintos parámetros de flujo de cada fluido en cada sección, como lo son por ejemplo, el número de Reynolds y el régimen de flujo, que son necesarios para calcular el factor de fricción de Fanning, y que se almacenan en matriz tridimensionales, para cada tiempo, fluido y sección; una vez se tiene la información necesaria, este factor de fricción es determinado e inmediatamente se calculan las pérdidas unitarias para cada fluido en cada sección haciendo uso de las ecuaciones 4.32 y 4.33; estas pérdidas también son almacenadas en matrices para su posterior uso.

Por otra parte ya se conoce el porcentaje de llenado de cada fluido en las secciones, de manera que si se multiplica este porcentaje de llenado por el largo de cada sección se obtiene el largo del bache de fluido dentro de esa sección, que será después multiplicado por las pérdidas unitarias con el objetivo de determinar las totales en cada sección.

Cabe resaltar que a pesar de que el programa determina cuando un fluido se encuentra en el régimen de transición, este solo usa ecuaciones para régimen turbulento y no

turbulento, es decir, calcula la fricción de un fluido en transición como si este estuviera en flujo laminar, esto debido a que las ecuaciones disponibles para flujo en transición son muy sensibles y no encajan bien con las que se manejan para turbulento a laminar

6.3.2.2 Determinación de la presión hidrostática. Para encontrar la presión hidrostática que aportan los fluidos de cada sección, el primer paso es determinar la altura de los baches de cada fluido, y ya que el software está diseñado para pozos verticales, esta altura será igual al largo del bache en la sección y que puede ser determinada de igual manera que se hizo anteriormente para la fricción.

Por otra parte se conoce la densidad de cada uno de los fluidos, de manera que el programa posee toda la información necesaria para calcular las presiones hidrostáticas; se debe tener cuidado con observar la dirección de la gravedad en el sistema, por tanto se agrega un término condicional que toma el valor de 1 para cuando se está en el anular y -1 para cuando se está en la tubería.

6.3.2.2 Determinación de la presión debido a la inercia. La aceleración de los fluidos en el sistema debido al cambio de caudal que se produce por el imbalance que conlleva al fenómeno de caída libre, también genera una presión adicional, la cual puede ser calculada con la expresión 6.13.

$$\text{Presión debido a la inercia} = \rho_i * \left(\frac{L_{ij}}{A_j} \right) * \left(\frac{dq}{dt} \right) \quad (6.13)$$

Hasta este punto el único valor desconocido de la ecuación anterior es el valor de la derivada del caudal con respecto al tiempo; la sección 6.3.3 muestra la formula que se usa para calcular esta derivada, al igual que su deducción.

6.3.3 Determinación del inicio de la caída libre y el caudal futuro. Parte del análisis hidráulico que realiza el software consiste en determinar si ocurrirá el fenómeno de caída libre y cuantificar su efecto sobre el caudal de salida del sistema, para esto el programa

hace uso de la ecuación deducida por Campos, Lage y Poggio⁴⁴, la cual se desarrolla con base en las leyes de conservación de la masa y del momento, partiendo de un balance macroscópico de las presiones en el sistema como se muestra en 6.14.

$$P_v - P_a = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n \rho_i * g * \delta * h_{ij} + \rho_i * \left(\frac{L_{ij}}{A_j}\right) * \left(\frac{dq}{dt}\right) + L_{ij} \left|\frac{dP_f}{ds}\right|_{ij} \quad (6.14)$$

Se puede observar que la expresión 6.14 es la aplicación de 6.11 para todas las secciones del sistema, donde P_a , es la presión a la salida del sistema, igual a la atmosférica, P_v (0.50683 psia⁴⁵) representa la presión de vapor de agua, que será la presión que se tendrá en el origen del sistema una vez los fluidos entran en caída libre, y m es el número de secciones; despejando se llega a 6.15, ecuación diferencial que permite predecir el caudal futuro mediante la aplicación de métodos numéricos.

$$\frac{dq}{dt} = \frac{P_v - P_a - \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n \rho_i * g * \delta * h_{ij} + L_{ij} \left|\frac{dP_f}{ds}\right|_{ij}}{\sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n \rho_i * \left(\frac{L_{ij}}{A_j}\right)} \quad (6.15)$$

La ecuación anterior y el valor de la última tasa de flujo conocida, plantean un problema de valor inicial, el cual el programa resuelve aplicando el método de Runge-Kutta, que para este caso particular plantea que el caudal futuro estará dado por la ecuación 6.16.

$$q^{t+1} = q^t + \frac{1}{6} * (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (6.16)$$

Siendo,

$$q'(q, t) = f(q, t) = \frac{dq}{dt}$$

$$k_1 = \Delta t * q'(q, t)$$

$$k_2 = \Delta t * q' \left(q + \frac{1}{2} * k_1 * \Delta t, t + \frac{1}{2} * \Delta t \right)$$

⁴⁴ CAMPOS (Wellington), Op. cit., 1p

⁴⁵ FAROUQ ALÍ, S.M. Saturated-Steam-Property Functional Correlations for Fully Implicit Thermal Reservoir Simulation. SPE Reservoir Engineering. SPE Journal. 1989.

$$k_3 = \Delta t * q' \left(q + \frac{1}{2} * k_2 * \Delta t, t + \frac{1}{2} * \Delta t \right)$$

$$k_4 = \Delta t * q'(q + k_3 * \Delta t, t + \Delta t)$$

Para encontrar el valor de estas constantes, el programa hace uso de una subrutina en la cual se determina el valor de dq/dt variando el valor de q y t según corresponda.

Se debe tener en cuenta que la ecuación 6.15 solo debe ser utilizada cuando el sistema se encuentra en caída libre, lo cual el programa identifica de dos maneras, la primera es que la presión en el origen del sistema (en superficie) caiga por debajo de la presión de vapor del agua, en tal caso el programa iniciará los cálculos respectivos para cuando el sistema entre en caída libre; la segunda es que el volumen total que ha abandonado el sistema sea mayor que el que ha ingresado, esto es indicio de que aun hay vacío y de que el software debe continuar realizando los cálculos correspondientes; una vez ninguna de estas condiciones se cumple el programa entiende que ha terminado la caída libre y no intenta calcular la derivada del caudal o aplicar el método numérico.

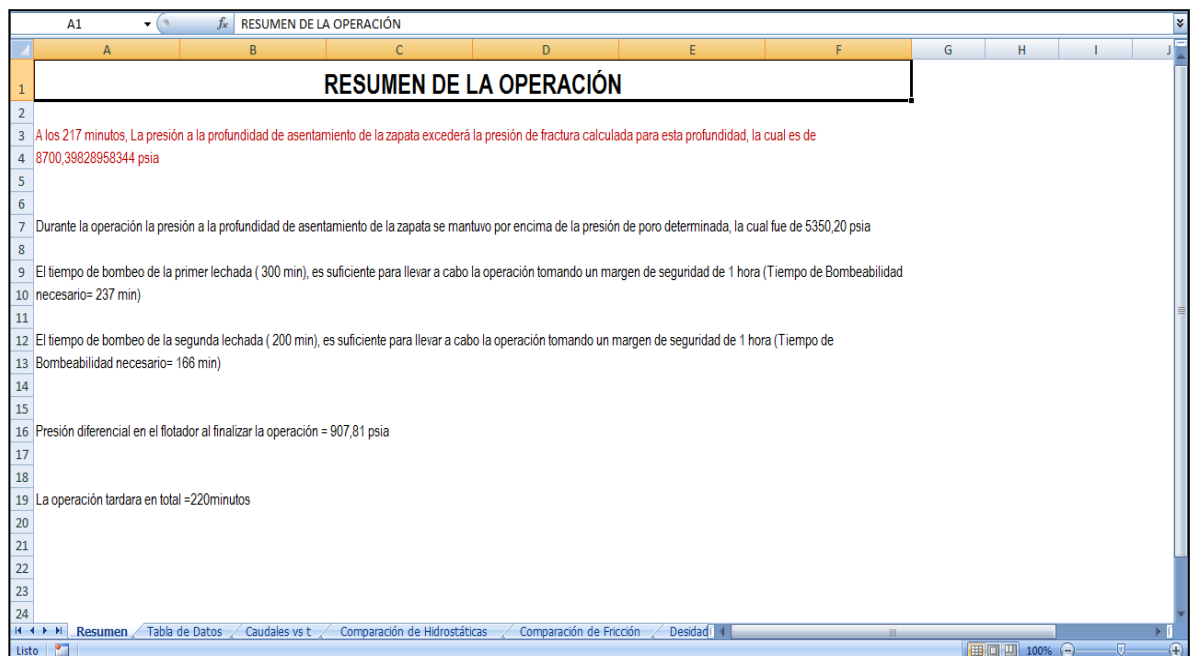
Para finalizar el análisis hidráulico, el programa realiza el cálculo de las presiones nuevamente, pero ahora teniendo en cuenta la inercia dado el caso de que se haya determinado un valor de dq/dt diferente de 0; si el análisis hidráulico se realizó correctamente cuando el sistema entra en caída libre, la presión determinada en cabeza debe ser igual a la presión de vapor del agua.

6.4 POST-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Después de realizar la simulación, el programa debe dar al usuario los resultados de esta, mostrando para cada tiempo la información más importante del sistema, lo cual el software hace de dos diferentes formas, una en es un informe detallado en Excel que muestra de manera gráfica la información para facilitar la interpretación, y la otra es mediante un modulo de visualización, el cual muestra una animación de la operación a medida que permite identificar datos importantes como la posición de los fluidos en cada tiempo y el régimen de flujo.

6.4.1 Informe Gráfico en Excel. Una vez la simulación se finaliza con éxito, el programa inicia el proceso de exportar los datos obtenidos a Microsoft Office Excel, esta operación puede tardar hasta 30 segundos, durante los cuales el programa muestra una barra que se va llenando indicando que porcentaje del proceso de exportación esta completo; al terminar de generar el informe, el programa muestra un libro de Excel, cuyo número de hojas variará dependiendo de la complejidad del sistema.

Figura 35. Informe en Excel- Hoja de Resumen



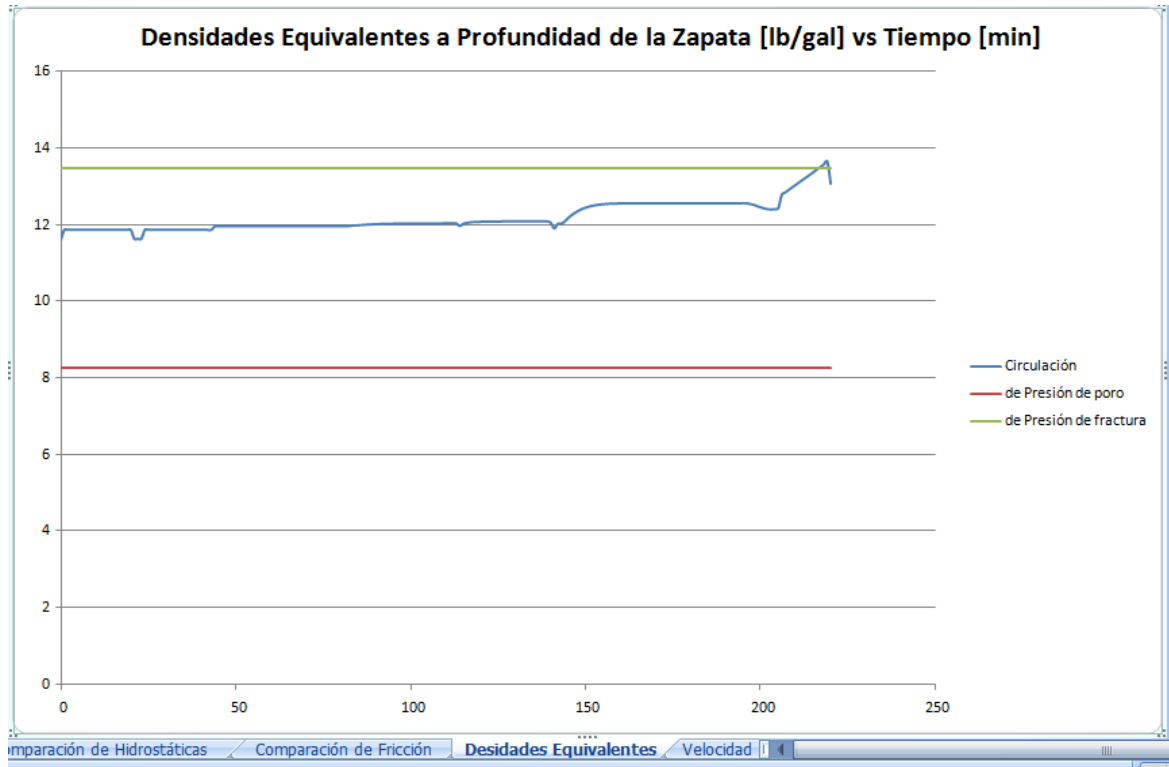
Fuente: Herramienta Software CEMSEI

En la primera hoja del libro se tendrá un resumen en el cual de manera rápida, se mostrarán los resultados importantes obtenidos de la comparación de ciertas variables con valores de control que no se desean exceder, es decir, se mostrará si en algún momento se excede alguna de las presiones de fractura dadas o si la presión cae por debajo de las presiones de poro establecidas, también se mostrará el tiempo de bombeabilidad que debe tener cada lechada y si el dado por el usuario en el diseño de laboratorio es suficiente; cuando alguno de estos parámetros no cumple, el programa

resalta el mensaje en rojo para llamar la atención del usuario; en este resumen también se enseña la presión diferencial que se obtendrá en el flotador al terminar la operación.

En la Figura 35 se puede observar como es este resumen.

Figura 36. Gráfica de densidad equivalente de circulación en el informe



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

En las demás hojas del libro se muestran los principales parámetros de control de la operación, graficando contra el tiempo las siguientes variables: Caudales de entrada y salida, presión hidrostática en el anular y la tubería, presión debido a la fricción en el anular y la tubería, densidad equivalente de circulación en fondo y velocidad en el anular; también se generan las respectivas gráficas de presión en cada una de las interfaces de diámetro constante del sistema, comparándolas con las presiones de poro y fractura en los casos que sea posible. En la segunda hoja del libro de Excel se puede encontrar la tabla de datos a partir de la cual se generan cada una de las gráficas.

La Figura 36 muestra la gráfica de densidad equivalente de circulación generada en un informe de un caso particular.

Finalmente en la última hoja de libro, el programa también genera un listado de los materiales requeridos para la elaboración de las lechadas a usar, incluyendo la cantidad de agua necesaria.

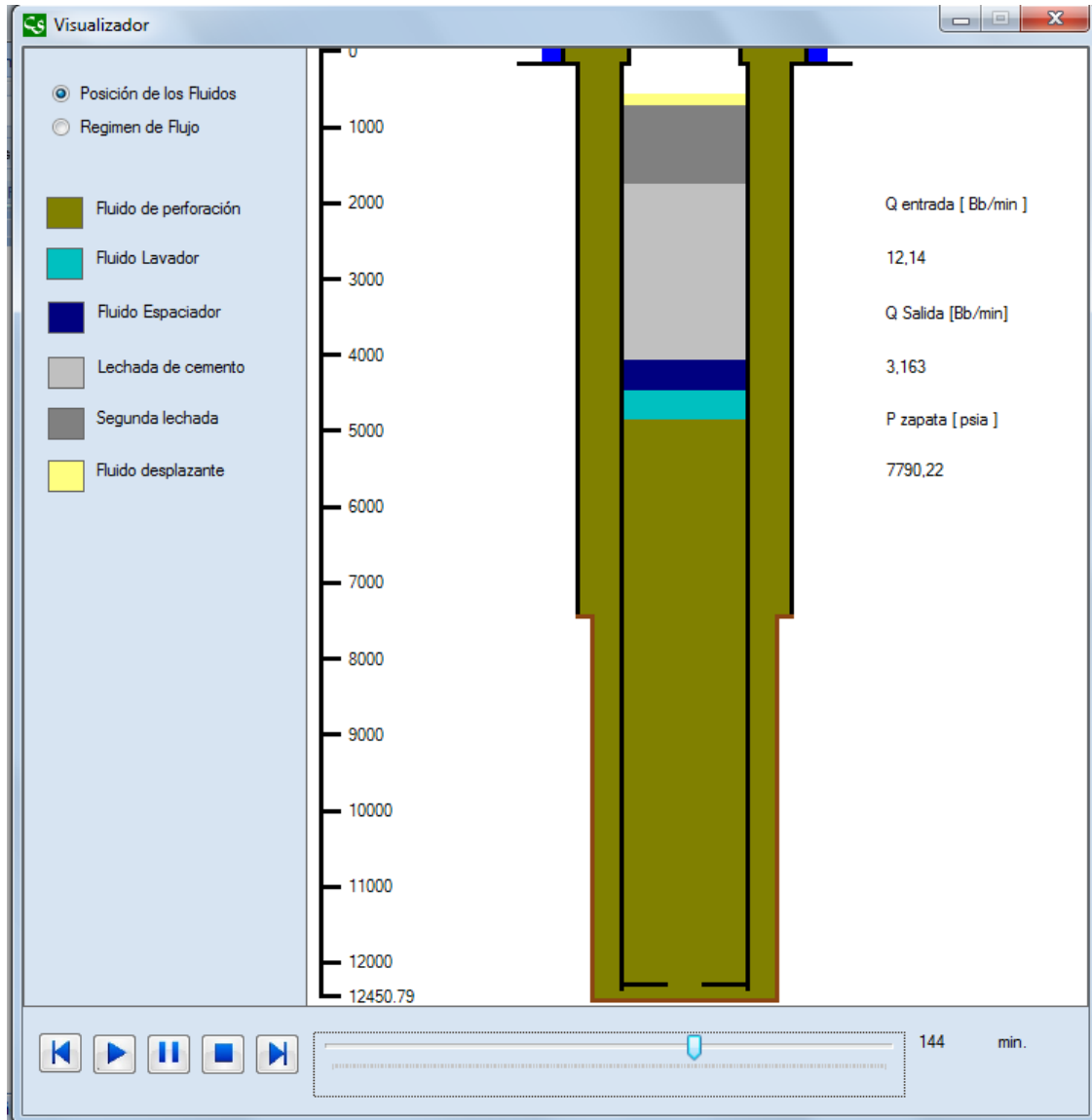
6.4.2 Visualizador. Al terminar de generar el informe en Excel, el programa habilita un nuevo modulo al que se puede acceder por medio de la opción “Visualizador” del menú “Resultados”, y en el cual se muestra una animación de la operación, facilitando observar la posición de los fluidos en cada instante de tiempo; también a medida que transcurre dicha animación, se muestran los valores de los caudales de entrada y salida, y la presión en fondo.

El modulo cuenta con controles que permiten al usuario desplazarse hasta cualquier tiempo que este desee y observar las condiciones que prevalecen en ese instante.

De igual manera este visualizador también permite ver el régimen de flujo que presentan los fluidos en el sistema; cuando se activa esta opción, el programa muestra por medio de un código de colores en que partes del sistema se tiene flujo laminar, transición o turbulento.

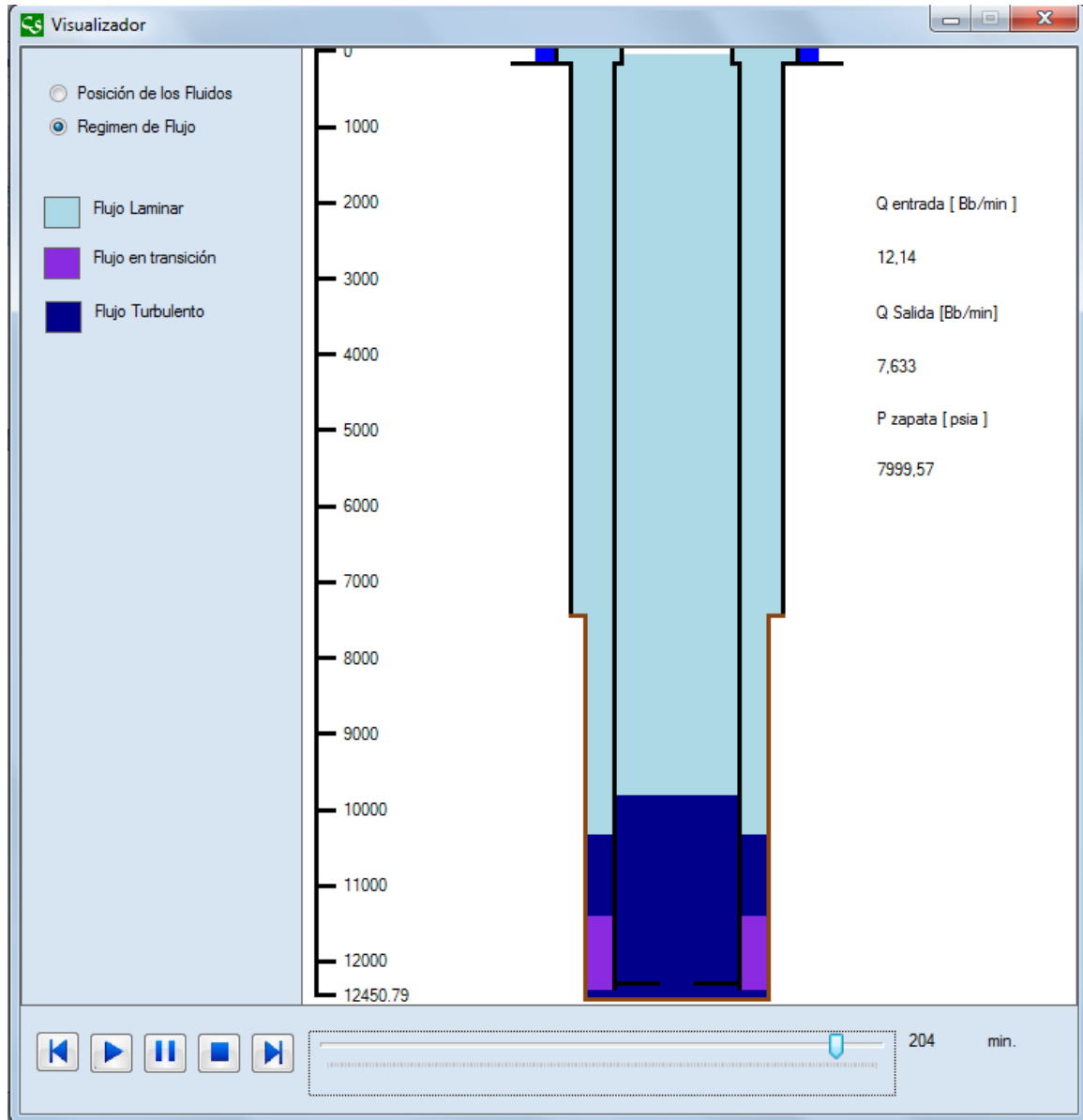
Las figuras 37 y 38 son imágenes del visualizador mostrando la posición de los fluidos y el régimen de flujo en el sistema respectivamente, como se puede apreciar, este modulo también permite observar el nivel de vacío que se tiene en cada instante de tiempo.

Figura 37. Visualizador mostrando la posición de los fluidos



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

Figura 38. Visualizador mostrando el régimen de flujo



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

6.5 CONSIDERACIONES DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

A continuación se presenta un listado de las suposiciones que se tuvieron en cuenta en el desarrollo del software y que fueron mencionadas con anterioridad:

- Los fluidos son incompresibles
- Las paredes de las tuberías y del agujero se consideran rígidas
- Cuando el sistema está en caída libre los fluidos bombeados son adheridos directamente a la interfase fluido-vacio.
- La tubería a cementar está lo suficientemente centralizada como para que el stand-off no tenga un efecto considerable sobre la distribución de velocidad de flujo.
- Se consideran diámetros promedios concéntricos constantes a lo largo de cada sección.
- Cuando hay flujo en transición el factor de fricción se calcula con las ecuaciones dadas para flujo no turbulento.
- El pozo es vertical.
- Se puede preparar y bombear lechada a razón de una tonelada de mezcla en seco por minuto por cada unidad cementadora disponible, y se necesitan 4 minutos para soltar cada tapón.

7. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA SOFTWARE

En esta sección se procederá a comparar los resultados obtenidos del programa CEMSEI con los de otras herramientas software del mismo tipo, y con los datos obtenidos de la cementación del casing de superficie del pozo ANH PATIA 1 ST P, esto con el fin de verificar el correcto funcionamiento de la herramienta.

7.1 COMPARACIÓN CON DATOS DE UN TRABAJO DOCUMENTADO

Para realizar esta comparación se hace uso de los resultados registrados en el trabajo realizado por Campos, Lage y Poggio sobre el efecto de caída libre⁴⁶, el cual muestra las gráficas producidas por el programa SIMENTAR (una herramienta software de la misma naturaleza que el software CEMSEI) para dos casos, el primero de estos consiste en la cementación de un casing de producción en el campo *Fazenda Bálsamo*, haciendo uso de fluido lavador y una sola lechada, y el segundo caso consiste en la cementación de un casing intermedio en un pozo de ubicación offshore, usando dos lechadas, fluido lavador y espaciador.

La información completa de los dos casos se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Datos de entrada para los casos de comparación

Caso	1	2
Dato	Valor	
Pozo	7-FMB-39-BA	3-RSN-125
Profundidad del zapato [ft]	4265.09	12408.14
Profundidad del pozo [ft]	4265.09	12450.79
Diámetro del hueco [in]	8.75	12.25
Profundidad de la capa de agua [ft]	0	167.32
Profundidad del collar [ft]	4166.67	12290.03
Tope de la lechada de relleno [ft]	1640.42	8202.1
Tope de le lechada de cola [ft]	-	11318.9

⁴⁶ CAMPOS (Wellington), Op. cit., 3p

Tabla 8. (Continuación)

Diámetros nominales [in]		
Casing previo	9.625	13.375
Riser	-	20
Casing	5.50	9.625
Profundidades [ft]		
Casing previo	328.08	7450.79
Riser	-	167.33
Casing	4265.09	12408.14
Propiedades de los fluidos		
Fluido Desplazante		
Densidad [lb/ft]	8.33	11.6
Viscosidad [cp]	1	-
Volumen [Bb]	99.12	908.2
Lechada de cemento de cola		
Densidad [lb/ft]	-	16
Viscosidad Plástica [cp]	-	28
Yield point [lbf/100 ft ²]	-	4
Volumen [Bb]	-	69.4
Lechada de cemento de relleno		
Densidad [lb/gal]	15.9	16
Viscosidad Plástica [cp]	28.4	28
Yield point [lbf/100 ft ²]	4	4
Volumen [Bb]	118	173.4
Fluido de Perforación		
Densidad [lb/gal]	10.5	11.6
Viscosidad Plástica [cp]	30	42
Yield point [lbf/100 ft ²]	5	30
Espaciador		
Densidad [lb/gal]	-	12.7
Viscosidad [cp]	-	1
Volumen [Bb]	-	30
Lavador		
Densidad [lb/gal]	8.33	8.5
Viscosidad [cp]	1	1
Volumen [Bb]	30	30

Fuente: “Free-Fall-Effect Calculation Ensures Better Cement-Operation Design” CAMPOS, Wellington. LAGE, Antônio. POGGIO, Ademar. Modificada

En los datos anteriores no se encuentran los caudales de bombeo de cada fluido, los cuales se deben establecer antes de realizar la simulación. Los caudales de bombeo de cada uno de los fluidos utilizados en cada caso se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Caudales de bombeo- Casos 1 y 2

Fluido	Caudales [Bb/min]	
	Caso 1	Caso 2
Lavador	5	1.5
Espaciador	-	1.5
Lechada de relleno	5	2.5
Lechada de cola	-	3
Desplazante	10	12

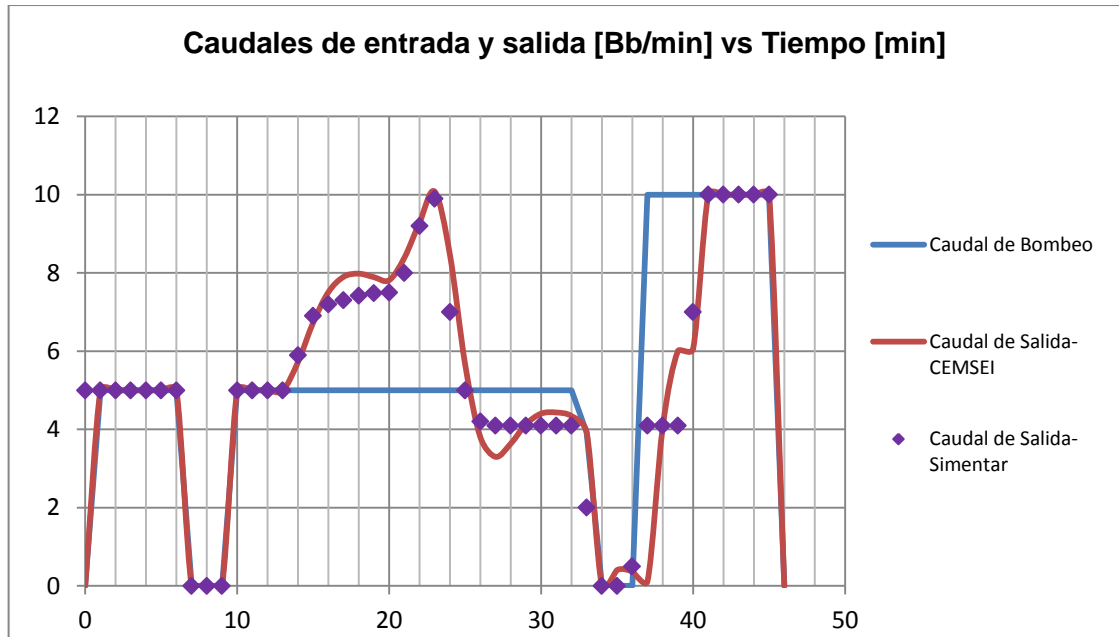
Fuente: "Free-Fall-Effect Calculation Ensures Better Cement-Operation Design" CAMPOS, Wellington. LAGE, Antônio. POGGIO, Ademar. Modificada

7.1.1 Comparación de los resultados obtenidos por SIMENTAR con los obtenidos por CEMSEI. Los datos anteriores se ingresaron en cada uno de los módulos de la herramienta software CEMSEI, se realizó una simulación de la operación y se obtuvieron los respectivos resultados.

La comparación de los resultados obtenidos se realizó utilizando la gráfica de Caudales de entrada y salida vs Tiempo de operación; esta gráfica es el referente de comparación ya que el objetivo del trabajo realizado por Campos, Lage y Poggio utilizando el software SIMENTAR se refería al efecto de la caída libre, apreciable claramente en esta gráfica.

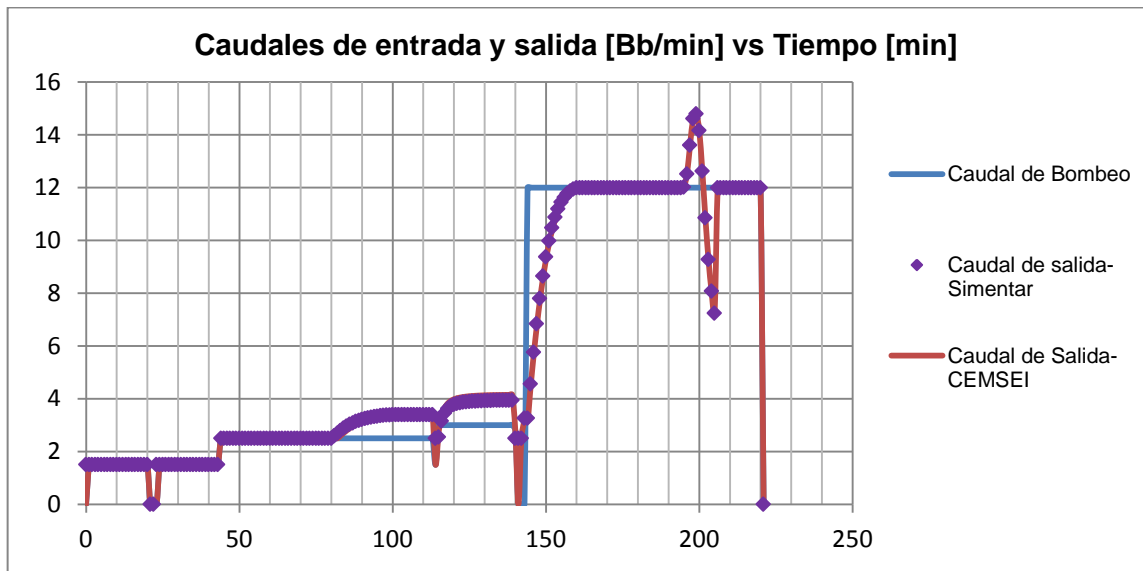
En las figuras 39 y 40 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos para cada software en los casos 1 y 2 respectivamente.

Figura 39. Comparación de resultados caso 1



Fuente: CAMPOS, Wellington. LAGE, Antônio. POGGIO, Ademar (modificada)

Figura 40. Comparación de resultados caso 2

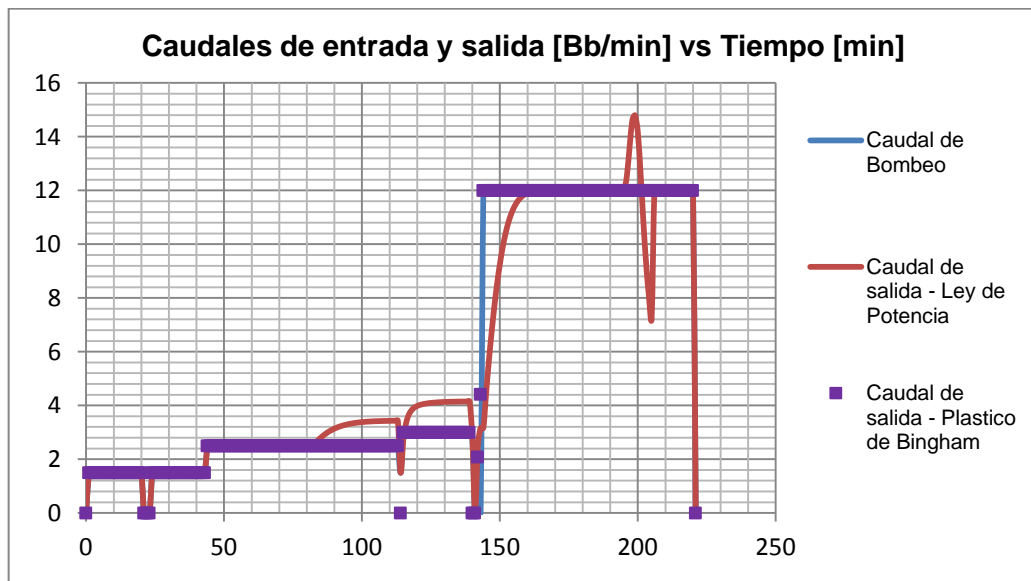


Fuente: CAMPOS, Wellington. LAGE, Antônio. POGGIO, Ademar (modificada)

Debido a que el paper no da información acerca del modelo reológico que describe el comportamiento de cada fluido, se realizó la simulación con ambos, Bingham y de Ley de Potencia; aunque para el primer caso los resultados arrojados por los dos modelos son casi idénticos, para el segundo caso hay un cambio radical en el comportamiento predicho por el software al cambiar de un modelo a otro, tal como se puede apreciar en la Figura 41, en donde mientras para el modelo de ley de potencia se obtiene caída libre en varias ocasiones, para el de plástico de Bingham no, lo que demuestra la importancia de realizar el análisis reológico a los fluidos antes de comenzar la simulación, y que el modelo seleccionado puede tener un impacto importante sobre los resultados arrojados por la herramienta, principalmente cuando se trabajan caudales pequeños. El comportamiento mostrado en las figuras 39 y 40 es el obtenido usando el modelo de ley de potencia en todos los fluidos no newtonianos del sistema.

Como se puede observar en las mencionadas figuras, el comportamiento del caudal de salida reproducido por la herramienta desarrollada coincide en la mayoría de los tiempos con el registrado en el paper para el software *Simentar*.

Figura 41. Resultados CEMSEI usando diferentes modelos reológicos



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

Se debe tener en cuenta que el cálculo de los caudales se obtiene a partir de un balance de las presiones del sistema, es decir, si los gastos de salida del sistema dados por los

dos programas son iguales, las presiones estimadas por estos también deben serlo, entonces, de acuerdo con lo mostrado por las figuras 39 y 40, se puede inferir que los resultados arrojados por la herramienta CEMSEI son coherentes y se aproximan a los dados por otros software comerciales.

7.2 VALIDACIÓN HERRAMIENTA SOFTWARE CEMSEI CON DATOS DE CEMENTACIÓN PRIMARIA DEL POZO ANH PATÍA 1 ST P

Con el fin de validar el funcionamiento de la herramienta software diseñada, se procedió a realizar una simulación de cementación primaria con los datos de la cementación del casing de superficie en el pozo ANH PATÍA 1 ST P. El objetivo de la simulación es comparar los resultados reales obtenidos en el pozo después de la operación de cementación, con los resultados que arrojó la herramienta software CEMSEI. Adicionalmente se realiza una comparación del análisis reológico real realizado a la lechada de cementación con el análisis reológico de la herramienta diseñada.

7.2.1 Información general del proyecto. El proyecto de cementación primaria a evaluar consistió en la cementación de todo el espacio anular entre el casing de superficie de 20" de diámetro externo, asentado a una profundidad de 765 Ft, y el hueco abierto de diámetro promedio 30,93" perforado con broca de 26" hasta una profundidad de 775 ft. El método utilizado para la operación fue cementación a través de tubería de perforación; los diámetros externo e interno de esta tubería fueron 5,875" y 5,045" respectivamente. El collar flotador se instaló a una profundidad de 760 Ft, en el interior del casing, profundidad hasta la que llega la tubería de perforación a través de la cual se bombearon los fluidos.

Solamente se utilizó una lechada de cementación y como preflujo se utilizó solamente un volumen determinado de agua fresca, con el fin de separar la lechada del lodo de perforación y para que actúe como fluido lavador. El fluido desplazante utilizado en esta operación también fue agua fresca.

Los datos completos del estado mecánico del pozo y propiedades de los fluidos que intervinieron en la operación, fueron proporcionados por el reporte post-operacional de la cementación realizada (Ver anexo D) y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 10. Información post-operacional ANH PATIA 1 ST P

POZO	ANH PATIA 1 ST P
Datos Estado Mecánico	
Profundidad del pozo [ft]	775
Profundidad del zapato [ft]	765
Diámetro de la broca [in]	26
Diámetro Promedio del hueco [in]	30,93
Profundidad del collar [ft]	760
Tope de la lechada [Ft]	0
Tipo de Casing a cementar	De Superficie
Diámetro Externo OD, [in]	20
Profundidad de Asentamiento [Ft]	765
Gradiente de fractura estimado psi/ft	0,62
Gradiente de poro estimado psi/ft	0,44
Características Del Drillpipe	
Diámetro externo (OD) [in]	5.875
Diámetro interno (ID) [in]	5.045
Profundidad de conexión con Collar	760
Datos de propiedades de los fluidos	
Fluido de Perforación	
Densidad [lb/gal]	9
Viscosidad Plástica [cp]	8
Yield point [lbf/100 ft ²]	16,5
Fluido Lavador	
Densidad [lb/gal]	8,4
Viscosidad [cp]	2
Volumen Bombeado [Bb]	50
Lechada de Cemento	
Densidad [lb/gal]	15,8
Viscosidad Plástica [cp]	28,3
Yield point [lbf/100 ft ²]	10,85
Volumen Bombeado [Bb]	434
Fluido Desplazante	
Densidad [lb/gal]	8,4
Viscosidad [cp]	2
Volumen Bombeado [Bb]	15

Fuente: CPVEN. Reporte post operacional cementación rev. 20" pozo ANH PATIA 1 ST P
(modificado)

Los caudales reales de bombeo de cada fluido, proporcionados en el Reporte Post-operacional de la cementación, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 11. Caudales de bombeo

FLUIDO	VOLUMEN [Bb]	CAUDAL DE BOMBEO [bpm]
Lavador (Agua Fresca)	50	5
Lechada de cemento	434	5,03
Desplazante (Agua Fresca)	15	2

*No se usaron tapones

Fuente: CPVEN. Reporte post operacional cementación rev. 20" pozo ANH PATIA 1 ST P (modificado)

Debido a que no se proporcionó información acerca de la cantidad y especificaciones de las bombas ni de las unidades cementadoras, estas fueron asumidas de tal manera que se pudiera bombear los fluidos con los caudales reales de la operación proporcionados en el reporte de la cementación.

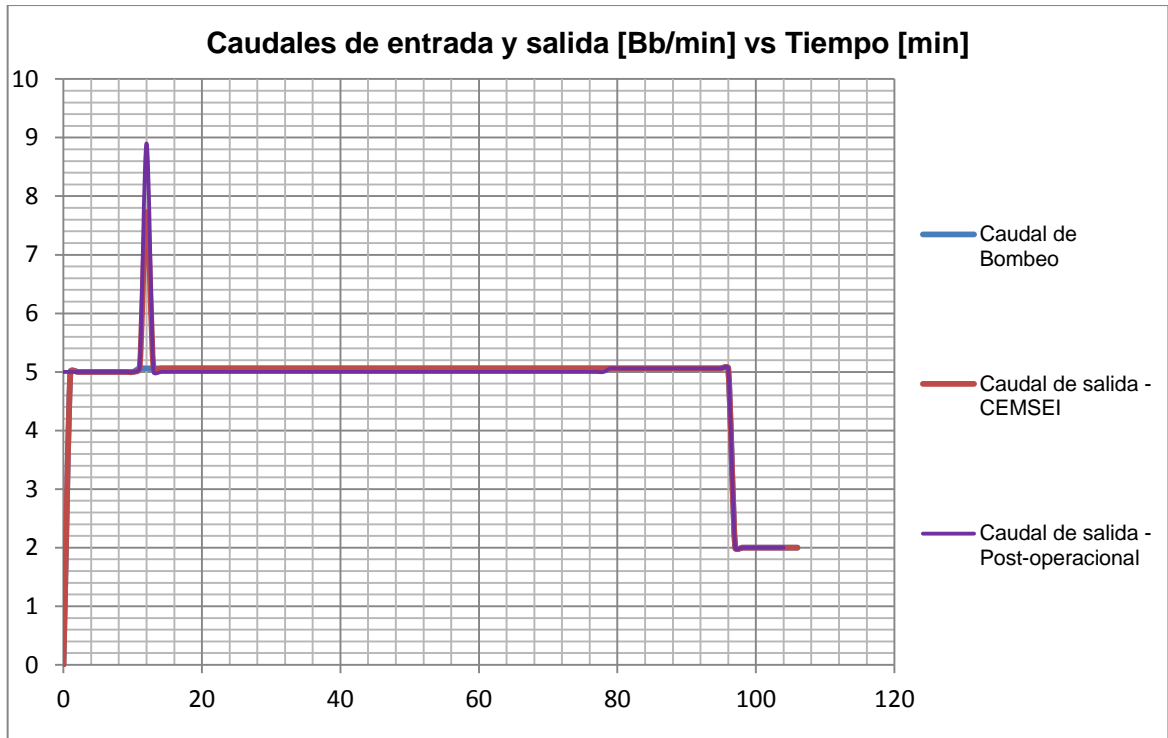
Toda la información anterior se ingresó en los diferentes formularios del software (Ver Capítulo 6), se obtuvieron los resultados de la simulación y se compararon con los resultados reales.

7.2.2 Comparación de resultados de la operación de cementación. Para una mayor apreciación de la operación de cementación primaria, los resultados obtenidos se compararon con los resultados reales mediante gráficas, en las cuales se puede observar la variación de los parámetros de interés a lo largo del tiempo de operación.

En las siguientes gráficas se podrá comparar las diferencias encontradas entre los resultados reales de la cementación con los resultados arrojados por la simulación realizada con la herramienta software CEMSEI:

7.2.2.1 Caudales de salida. La siguiente gráfica muestra la comparación de los resultados de los caudales de salida obtenidos por la herramienta con los caudales de salida obtenidos durante la operación de cementación (los caudales de bombeo son parámetros de entrada en la simulación y controlados en superficie durante la operación real):

Figura 44. Caudal de entrada y salida ANH PATIA 1 ST P



Fuente: CPVEN. Reporte post operacional cementación rev. 20" pozo ANH PATIA 1 ST P (modificado)

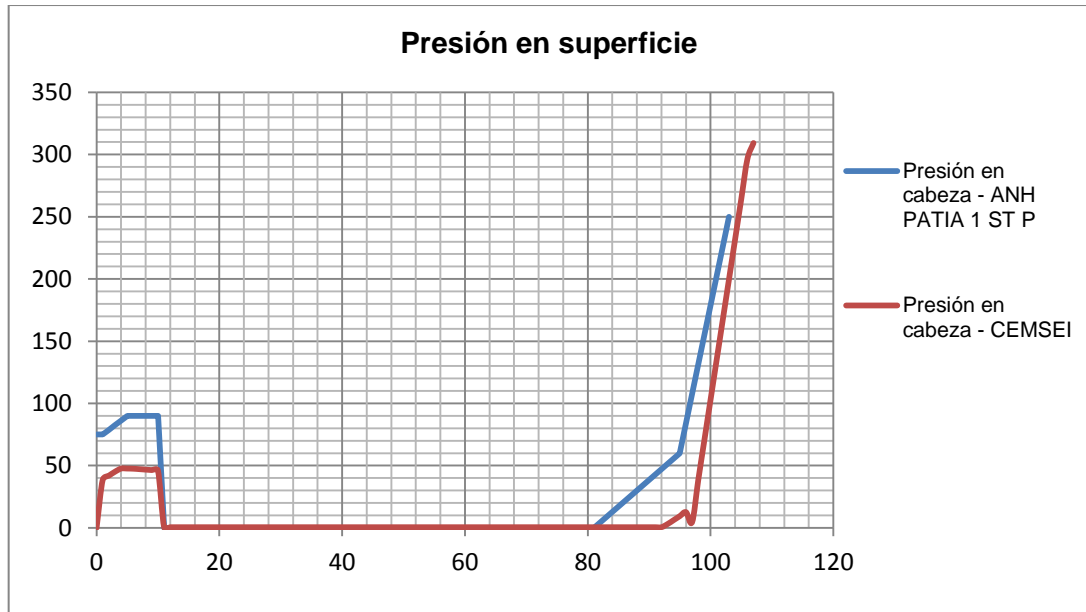
En la gráfica se puede apreciar que el efecto de caída se presenta en ambos resultados, además inicia y termina de la misma manera; la mayor diferencia entre las dos tendencias se presenta en el pico máximo de caída libre, apreciable entre los minutos 12 y 13, esta diferencia puede ser cuantificada como se muestra en la expresión siguiente expresión.

$$\%Error = \frac{|q_{real} - q_{calculado}|}{q_{real}} = \frac{|8.95 - 7.78|}{8.95} = 13.07\%$$

Pese a este error máximo obtenido, en general el resto de las curvas se sobreponen, lo que indica que la herramienta software cuantifica adecuadamente los caudales de salida durante el desplazamiento de los fluidos.

7.2.2.2 Presión en cabeza de pozo. El efecto de caída libre también se puede apreciar en la gráfica de presión en cabeza de pozo, la cual se presenta a continuación:

Figura 45. Presión en cabeza ANH PATIA 1 ST P



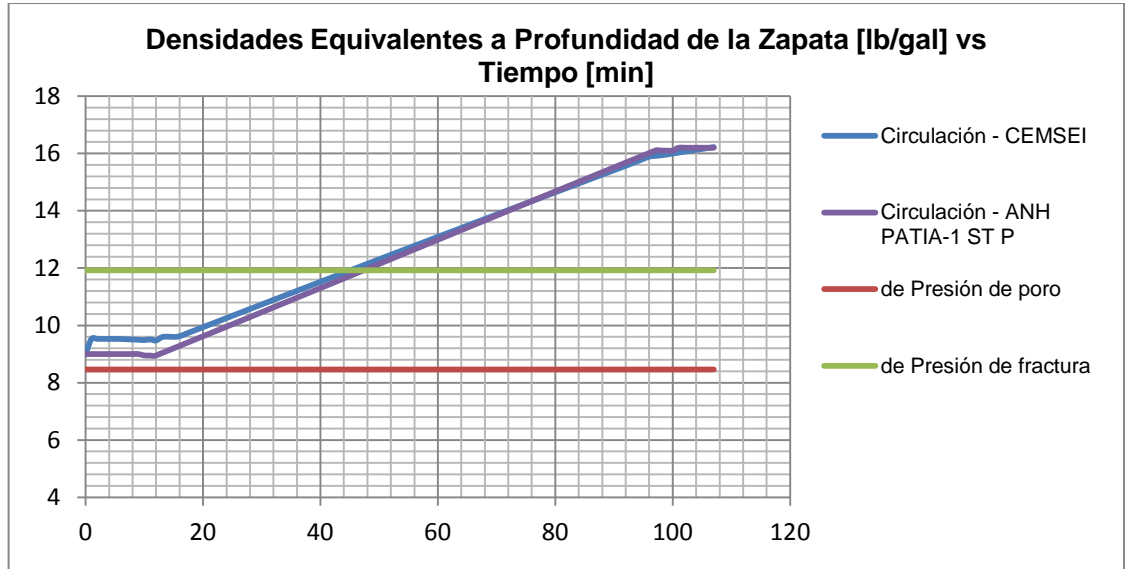
Fuente: CPVEN. Reporte post operacional cementación rev. 20" pozo ANH PATIA 1 ST P (modificado)

En la gráfica anterior se puede apreciar nuevamente que durante la operación se presentó efecto de caída libre, lo cual causa que la presión en cabeza se aproxime a un valor cercano a cero. Para ambos resultados este efecto comenzó aproximadamente al minuto 11, pero en la operación real la caída libre terminó más rápido que en la simulación realizada.

Esta gráfica muestra las mayores diferencias entre el comportamiento predicho por el software y los resultados reales de la operación, ya que como se puede apreciar, la presión en los instantes donde no hay caída libre es subestimada, presentando una diferencia porcentual máxima de 44.4% entre los minutos 4 y 12. A pesar de las diferencias que se aprecian, los resultados son coherentes y siguen la misma tendencia.

7.2.2.3 Densidades Equivalentes de Circulación. En la siguiente gráfica se presentan los resultados de las densidades equivalentes de circulación a la profundidad de asentamiento de la zapata, tanto los resultados reales como los obtenidos de la simulación con la herramienta software CEMSEI:

Figura 46. Densidad equivalente de circulación ANH PATIA 1 ST P



Fuente: CPVEN. Reporte post operacional cementación rev. 20" pozo ANH PATIA 1 ST P (modificado)

Como se puede observar, a excepción de algunos datos al inicio del desplazamiento, los datos de densidad equivalente de circulación obtenidos durante la operación de cementación se comportan de manera similar a los obtenidos con la simulación realizada con la herramienta software.

La mayor diferencia entre los resultados arrojados se aprecia en los primeros 10 minutos de la operación, y se cuantifica de la siguiente manera:

$$\%Error = \frac{|EDC_{real} - EDC_{calculado}|}{EDC_{real}} = \frac{|9.0 - 9.6|}{9.0} = 6.67\%$$

Como se puede apreciar el error máximo es relativamente pequeño, además de esto, la densidad equivalente en los últimos minutos coincide para ambos casos.

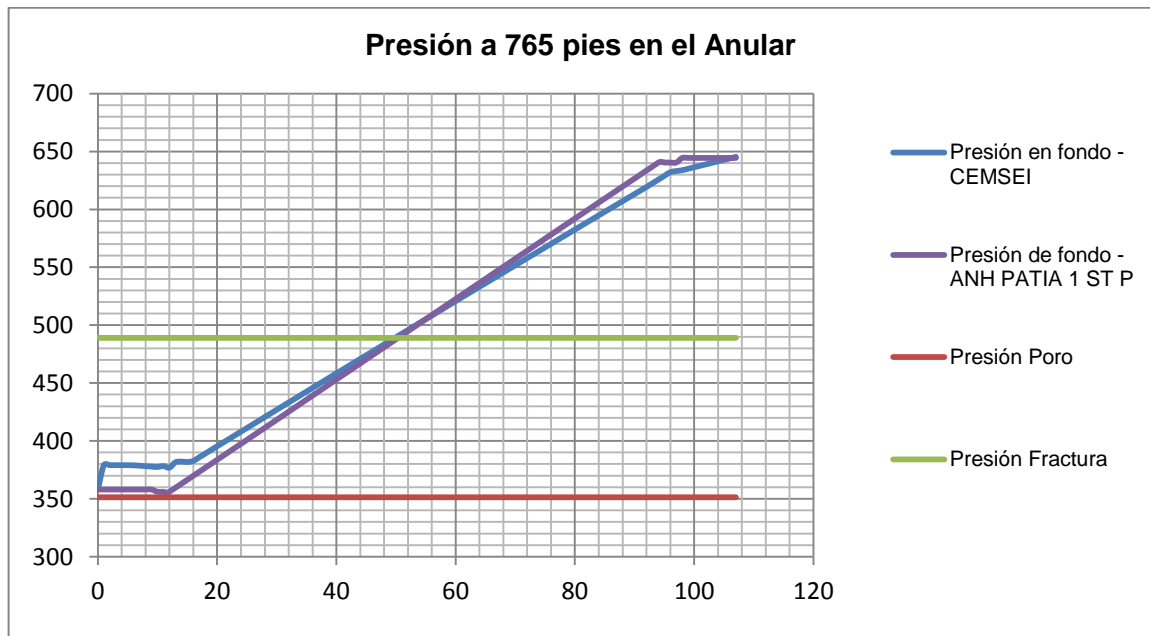
En la gráfica anterior se observa que durante el desplazamiento de los fluidos se sobrepasa la densidad equivalente de fractura estimada a la profundidad de asentamiento de la zapata; este exceso de presión se observa tanto en la gráfica de la operación real

como en la gráfica obtenida con los datos de la simulación realizada por la herramienta software.

7.2.2.4 Presión en fondo de pozo. La gráfica de presión en fondo (Figura 47), presenta un comportamiento similar a la gráfica 47, con lo cual se corrobora lo cercanía de los resultados arrojados por la herramienta software con los resultados reales de la operación.

7.2.3 Comparación Resultados de Análisis Reológico. Con el fin de probar el módulo de análisis reológico de la herramienta software, se realizó dicho análisis a la lechada de cementación utilizada en la operación y los resultados se compararon con el análisis reológico realizado en el laboratorio por la empresa encargada (Ver Anexo D). La realización del análisis con la herramienta software CEMSEI fue posible debido a que en el reporte Post-Operacional se proporcionó ciertas lecturas del viscosímetro a diferentes velocidades rotacionales

Figura 47. Presión en fondo ANH PATIA 1 ST P



Fuente: CPVEN. Reporte post operacional cementación rev. 20" pozo ANH PATIA 1 ST P (modificado)

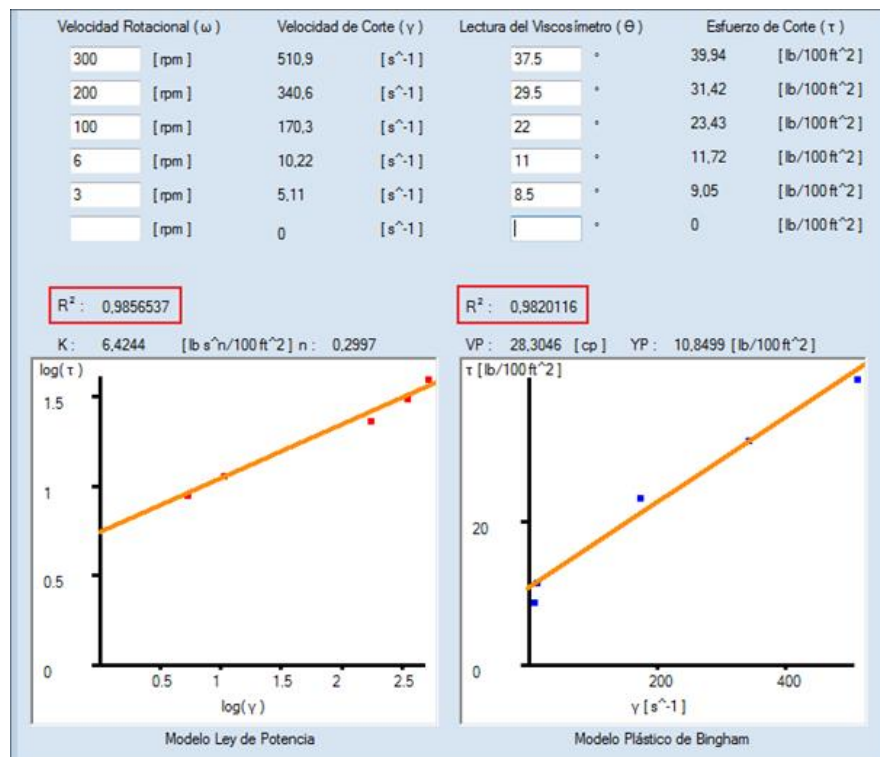
De acuerdo con el reporte de laboratorio, el análisis reológico realizado a la lechada de cementación, dio como resultado que presenta un comportamiento de acuerdo al modelo Ley de Potencia, lo cual será referencia de comparación para los resultados arrojados por la herramienta. Al módulo de la herramienta software se le ingresaron los siguientes datos:

Velocidad Rotacional [rpm]	Lectura del Viscosímetro [°]
300	37,5
200	29,5
100	22
6	11
3	8,5

NOTA: Las lecturas del viscosímetro ingresadas fueron los valores promedio de las lecturas obtenidas.

Al ingresar estos datos, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Figura 48 – Análisis reológico de la lechada utilizada en el pozo ANH PATIA 1 ST P



Fuente: Herramienta Software CEMSEI

Como se puede observar en la anterior figura, el coeficiente de determinación $[R^2]$ para el modelo Ley de Potencia es más cercano a uno que el coeficiente de determinación para el modelo Plástico de Bingham, por lo cual, acorde con el análisis realizado por la herramienta software CEMSEI, la lechada de cementación presenta un comportamiento reológico de acuerdo al modelo Ley de Potencia. El resultado arrojado por la herramienta coincide con el resultado del reporte de laboratorio, lo cual demuestra la confiabilidad de los resultados del módulo de análisis reológico de la herramienta diseñada.

En cuanto a los parámetros reológicos de cada modelo, también fueron proporcionados en el reporte de laboratorio de la empresa encargada; la comparación de estos parámetros se encuentra en la siguiente tabla:

Tabla 12. Comparación de los parámetros reológicos calculados por CEMSEI con los proporcionados por el laboratorio

Modelo Reológico	Parámetro Reológico	Unidades	Valor del Reporte	Valor de la Herramienta	Error Relativo
Plástico de Bingham	Viscosidad Plástica (VP)	cP	28,3	28,3	0%
	Punto Cendente (YP)	Lb/100Ft ²	10,85	10,85	0%
Ley de Potencia	Índice de Ley de Potencia (n)	Adimensional	0,2997	0,2997	0%
	Índice de consistencia (K)	Lb-s ⁿ /100Ft ²	6.42*	6.42	0%

*El valor de K proporcionado en el reporte de laboratorio (5.60 Lb-sⁿ/100Ft²) fue modificado haciendo uso de la ecuación 3.22, para que pudiera ser comparado con el valor de K arrojado por el software, el cual ya está modificado.

Fuente: Los Autores

Como se puede observar, los valores son exactamente iguales, lo que demuestra que el análisis reológico se realizó adecuadamente y los parámetros obtenidos fueron determinados de manera correcta por la herramienta.

7.3 EJERCICIOS PROPUESTOS PARA HACER USO DE LA HERRAMIENTA CEMSEI EN MATERIAS AFINES

Teniendo en cuenta la naturaleza académica del software, a continuación se proponen una serie de ejercicios con el fin de que la herramienta pueda ser usada por el

estudiantado para la resolución de problemas en materias afines con el tema de cementación como lo son laboratorio de lodos y cementos, y completamiento de pozos.

7.3.1 Práctica de laboratorio. Para la materia de *Laboratorio de lodos y cementos*, se propone un ajuste de la actual práctica de *Propiedades de los cementos*, ya que con el software a disposición los estudiantes podrán realizar un análisis más profundo acerca de cómo las diferentes propiedades de la lechada tienen un efecto directo sobre el desarrollo de la operación.

La práctica propuesta, que es una modificación de la consignada en la actual guía de laboratorio⁴⁷ puede ser encontrada en el anexo A.

7.3.2 Taller de completamiento. Para la asignatura *Completamiento de Pozos*, se propone un taller que consta de dos temas (A y B), el cual pretende que el estudiante entienda los lineamientos básicos que se deben seguir para planear una operación de cementación primaria, y comprenda que el uso de una herramienta software como CEMSEI durante esta etapa es indispensable.

Los temas del taller propuesto se pueden apreciar en los anexos B y C.

⁴⁷ RODRÍGUEZ, Eliserio. Reestructuración Teórico - Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas.

CONCLUSIONES

- Se desarrolló la herramienta software CEMSEI, la cual facilita realizar el análisis reológico e hidráulico de los fluidos involucrados en una cementación primaria de pozos verticales, permitiendo simular la operación bajo diferentes esquemas; además, se le dio un enfoque académico, de tal manera que sea amigable con el usuario guiándolo en el uso del programa, a diferencia de otras herramientas software del mismo tipo.
- Se planteó una metodología para el diseño de lechadas de cementación primaria, la cual establece el procedimiento a realizar desde la etapa de laboratorio hasta la simulación de la operación, analizando sus resultados y especificando las acciones que se deben tomar para obtener un diseño adecuado de la lechada y la operación.
- Los resultados arrojados por la herramienta software se compararon con los resultados documentados que se obtuvieron de un software similar; la cercanía entre estos evidenció la coherencia de los datos arrojados por la herramienta desarrollada.
- La herramienta software fue usada para simular una de las operaciones de cementación primaria del pozo ANH PATIA 1 ST P, comparando los resultados obtenidos con los registrados en el informe post-operacional; tanto para el análisis hidráulico como para el reológico, se presentó una gran similitud entre los datos, con lo cual se comprobó el adecuado funcionamiento del software diseñado.
- El modelo reológico seleccionado para describir el comportamiento de los fluidos involucrados puede tener un impacto importante sobre los resultados, principalmente cuando se trabaja con caudales pequeños, por lo cual es de gran importancia realizar el análisis reológico previo a la simulación.
- Antes de simular una operación de cementación primaria es necesario tener en cuenta que las lechadas de cementación y demás fluidos involucrados cumplan con las propiedades generales establecidas que se determinan en laboratorio, las cuales se

deben determinar cada vez que se realiza una modificación a la composición o a ciertos parámetros operacionales, obteniéndose un proceso de retroalimentación para que la operación de cementación sea exitosa.

- Se propuso una variación de la práctica de laboratorio existente para lechadas de cemento de tal manera que el estudiantado haga uso de la herramienta CEMSEI, permitiéndole realizar un análisis más detallado de las propiedades de las lechadas y de su uso; además, se plantearon dos talleres para la materia “Completamiento de pozos” de tal manera que, haciendo uso del software, los estudiantes pueden entender mejor el proceso de diseño de una operación de cementación primaria.

RECOMENDACIONES

Se debe aprovechar la naturaleza académica de la herramienta software CEMSEI para facilitar la enseñanza del proceso de planeación y diseño de operaciones de cementación primaria, así como para dar más claridad acerca de temas como el comportamiento reológico de los fluidos y su efecto sobre la hidráulica en un sistema de flujo, por lo que sería conveniente proponer alternativas adicionales a las guías y talleres propuestos en este trabajo para fortalecer los conocimientos del estudiantado en materia de cementación.

Con el fin de ampliar la utilidad del software se recomienda extender las funciones de la herramienta a pozos desviados, en donde se debe tener en cuenta el efecto de la centralización sobre el régimen de flujo, lo cual puede ser un tema de estudio interesante; Otra manera de aumentar la versatilidad del software es incluyendo otros tipos de cementación para los que no opera este software como por ejemplo, cementación multietapa y cementación forzada.

Utilizar modelos reológicos diferentes a los ya utilizados por la herramienta CEMSEI, para poder describir mejor el comportamiento de los fluidos

Se debe tener en cuenta que la herramienta CEMSEI puede servir de base para estudios posteriores acerca del efecto de caída libre y la manera cómo este afecta las operaciones de cementación primaria.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Norma API RP 10 - "Recommended Practice for Testing Oil Well Cements and Cements Additives", Dallas. 1984.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, Norma API RP 10B - "Recommended Practice for Testing Well Cements", Ed. 22. Dallas. 1997.
- ARNOLD, E.S. "Cementing: Bridging the Gap From Laboratory Research to Field Operation", Journal of Petroleum Technology, Febrero de 1983.
- BEIRUTE, R. M. The Phenomenon of Free Fall During Primary Cementing. SPE paper No.13045. The 59th Annual Conference And Exhibition Held In Houston. 1984
- BEDOYA, María, CARDONA, Natalia. Estudio Comparativo de Modelos Reológicos para Lodos de Perforación. Medellín, 2009. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- CAMPOS, Israel, GUEVARA, Dani, ARMAS, Diego. Metodología en Operaciones de Cementación Primaria y Forzada utilizando nuevas tecnologías. Guayaquil, Ecuador, 2010. Informe de materia de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero de Petróleos. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- CAMPOS, Wellington. LAGE, A. POGGLO, Ademar Jr. Free-Fall- Effect Calculation Ensures Better Cement-Operation Design. SPE Drilling & completion, September 1993.
- DOWELL. Cementing Engineering Manual. Schlumberger Educational Service. 1995.

- FAROUQ ALÍ, S.M. Saturated-Steam-Property Functional Correlations for Fully Implicit Thermal Reservoir Simulation. SPE Reservoir Engineering. SPE Journal. 1989.
- MI. Manual MI - Capítulo 5 "Reología e Hidráulica". 2001.
- NELSON, Erik B. Well Cementing. Texas: Schlumberger Educational Service. 1990.
- PEMEX. Procedimiento para el Diseño de la Cementación de Tuberías de Revestimiento: Clave: 223 – 21100 – Di – 042. Gerencia de Estrategias de Ingeniería y Diseño de Perforación y Terminación De Pozos. 2005
- PRADA, Katherine. ARGÜELLO, Fabio. Estudio técnico y elaboración de una herramienta de cálculo para el diseño de un sistema integrado de circulación para la perforación de pozos. Bucaramanga, 2011. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas.
- RODRÍGUEZ, Eliserio. Reestructuración Teórico - Práctica de la Guía de Laboratorio de Lodos y Cementos. Bucaramanga, 2007. Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físicoquímicas.
- SMITH, Dwight. Cementing, Ed. 2. New York City: Society of Petroleum Engineers Inc. 1990. ISBN 1-55568-006
- SUMAN, George. ELLIS, Richard. World Oil's Cementing Handbook: Including Casing Handling Procedures. Houston, Texas: Gulf Publishing Compan, 1977.

ANEXOS

ANEXO A

PRÁCTICA PROPUESTA – REOLOGÍA E HIDRÁULICA DE LECHADAS DE CEMENTO

OBJETIVOS

- Preparar distintas lechadas de cemento y determinar sus principales propiedades.
- Realizar un análisis reológico e hidráulico de las lechadas en una operación de cementación primaria.

FUNDAMENTO TEÓRICO

El cemento es todo material que tiene propiedades adhesivas o cohesivas que en contacto con el agua se solidifica y endurece. A esta mezcla de cemento y agua que se emplea en la cementación de pozos, es a la que se le denomina lechada.

Las propiedades que se requieren en una lechada dependen de su utilización y son muy variadas en función del tipo de trabajo. Para lograr estas propiedades se usan diferentes tipos de cementos, aunque si no es posible lograrlas solo con el cemento, se han desarrollado muchos productos que se usan como aditivos para modificar las propiedades del cemento.

Estas propiedades se deben monitorear constantemente para optimizar el uso de los cementos. Esto se hace mediante las pruebas que se realizarán en esta práctica y otras complementarias.

TEMAS DE INVESTIGACIÓN.

- Preparación de una lechada de cemento.
- Objetivos de la cementación y factores que la afectan.
- Clases de cementos.
- Aditivos para los cementos.

- Gradiente de fractura y de poro
- Flujo laminar, transición y turbulento
- Estado mecánico de un pozo
- Efecto de caída libre en cementación primaria

IMPORTANCIA Y APLICACIÓN

En la planeación de operaciones de cementación primaria, se debe buscar que se cumplan ciertas condiciones durante el desarrollo de esta, por ejemplo, que la presión se mantenga entre la de poro y fractura, que se alcance flujo turbulento en el anular, que el tiempo de bombeabilidad sea suficiente y que se tenga la caída libre lo más corta posible; que se alcancen estas condiciones o no depende fuertemente de las propiedades de la lechada que se va a utilizar, lo que hace sumamente importante la determinación de estas, de manera que con ayuda de una herramienta software se pueda predecir mediante la simulación de la operación, qué diseño de lechada favorecerá más que se presenten las condiciones necesarias para que la operación sea exitosa.

MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS

- Consistómetro atmosférico.
- Balanza de lodos.
- Viscosímetro Fann.
- Probetas (de 25 ml y 250 ml)
- Multimixer.
- Cemento clase G.

PROCEDIMIENTO

Preparar cuatro lechadas de cemento clase G (o la clase que determine el profesor) variando la cantidad de agua entre 30% y 60% del peso del cemento. Determinar: Densidad, tiempo de fraguado, lecturas de viscosímetro de Fann a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm, agua libre, y demás propiedades indicadas por el profesor.

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Lechada	% Agua	Agua c.c.	Cemento gr	Modelo Reológico	VP /k	YP /n	Tiempo de Bombeabilidad	Densidad	Consistencia a 20 min. (Uc)
1									
2									
3									
4									

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Use el software CEMSEI para determinar el modelo reológico que describe mejor el comportamiento de cada lechada, y el valor de la viscosidad plástica y Yield point, σ_y y k según sea el caso.

También use el programa para determinar el caudal crítico para obtener turbulencia en el anular en los casos *Fazenda Balsamo.cem* y *3 RSN 125.cem* (archivos disponibles en el software, solo debe variar las propiedades de la lechada), no olvide observar las diferencias en el estado mecánico en cada caso.

Realice la simulación de la operación en el caso *Fazenda Balsamo.cem* con cada una de las lechadas elaboradas y tomando los siguientes caudales, Lavador 5 bpm, Lechada 5 bpm y desplazante 10 bpm; responda las siguientes preguntas:

¿Cuáles lechadas alcanzan turbulencia en el anular? ¿Por cuánto tiempo?

¿Para cuáles lechadas la presión de fondo se mantiene en los rangos deseados?

¿El tiempo de bombeabilidad de las lechadas es suficiente en cada caso?

¿Qué diferencia se produce en el efecto de caída libre al usar una u otra lechada?

¿Qué diferencia hay en las pérdidas de presión debido a la fricción para cada lechada?

ANEXO B: TALLER DE COMPLETAMIENTO – CEMENTACIÓN PRIMARIA - TEMA A

Se desea realizar la cementación primaria del casing de producción para el pozo UIS-25 de acuerdo con el estado mecánico planeado, el equipo de laboratorio le presenta 3 diseños alternativos de lechadas que cumplen con las especificaciones necesarias; usted como ingeniero debe planear la operación de cementación de manera que se pueda llevar a cabo sin ningún problema, y presentar un informe completo en el que muestre: el plan de trabajo detallado (Caudales programados, lechada o lechadas a usar, fluido lavador, etc.), las consideraciones bajo las cuales realizó este diseño y los resultados obtenidos de la simulación que demuestran que se podrá realizar la operación sin inconvenientes.

INFORMACIÓN DEL ESTADO MECÁNICO:	
Profundidad del agujero	4270 ft
Diámetro promedio del agujero	8.75 in
Profundidad de asentamiento del casing previo	328 ft
Casing previo	OD=9.625'; peso:36 lb/ft; grado:J55
Profundidad de asentamiento - casing a cementar	4265 ft
Casing a Cementar	OD=5.50'; peso: 17 lb/ft; grado: K55
Profundidad del collar flotador	4200 ft
Tope del cemento	1640 ft
Gradiente de fractura estimado	0.7 psi/ft
Gradiente de poro estimado	0.46 psi/ft

La última sección fue perforada con lodo de bentonita con las siguientes características: Densidad= 9 ppg, Viscosidad plástica (VP)= 30 cp, Yield Point (YP)= 5 lb/100ft²; comportamiento de Plástico de Bingham; El agua disponible en la locación presenta una viscosidad de 2 cp y una densidad de 8.4 ppg.

El equipo de perforación dispone de una bomba con las siguientes características: Una Bomba tríplex con camisa de longitud de 1 ft x 7 pulgadas de diámetro, con capacidad para 80 emboladas por minuto y una eficiencia del 80%. Por cuestiones de presupuesto se restringe el número de unidades de cementadoras a una sola.

Diseños propuestos por el equipo de laboratorio			
Propiedad	Lechada 1	Lechada 2	Lechada 3

Densidad del agua [ppg]	8.4	8.4	8.4
Clase de Cemento	G	G	H
% Agua en peso del cemento	38	44	44
Ø600	50	42	60
Ø300	37.5	30.5	40
Ø200	29.5	23.5	30
Ø100	22	17.5	20
Ø6	11	10	9
Ø3	8.5	8	8
Aditivos	Ninguno	Ninguno	Ninguno
Resistencia a la compresión [psig]	2300	2000	2100
Tiempo de fraguado [min]	200	120	180

Use el software CEMSEI para determinar la densidad aproximada de cada diseño y las propiedades reológicas de las lechadas (Incluyendo el modelo); recuerde especificar en el informe la cantidad de sacos de cemento necesarios y los barriles de agua a utilizar, incluyendo los destinados para pre-flujo y/o desplazamiento.

Ya que la planeación de operaciones de cementación primaria consiste en una retroalimentación entre el diseño de laboratorio y el diseño de la operación, informe al equipo de laboratorio qué propiedades se deberían modificar para mejorar el diseño de las lechadas u otros fluidos presentes en la operación, para optimizar su desempeño durante esta.

ANEXO C: TALLER DE COMPLETAMIENTO – CEMENTACIÓN PRIMARIA - TEMA B

Se desea realizar la cementación primaria del casing intermedio para el pozo UIS-80 de acuerdo con el estado mecánico planeado, el equipo de laboratorio le presenta 3 diseños alternativos de lechadas que cumplen con las especificaciones necesarias; usted como ingeniero debe planear la operación de cementación de manera que se pueda llevar a cabo sin ningún problema, y presentar un informe completo en el que muestre: el plan de trabajo detallado (Caudales programados, lechada o lechadas a usar, fluido lavador, etc.), las consideraciones bajo las cuales realizó este diseño y los resultados obtenidos de la simulación que demuestran que se podrá realizar la operación sin inconvenientes.

INFORMACIÓN DEL ESTADO MECÁNICO:	
Profundidad del agujero	12283 ft
Diámetro promedio del agujero	12.25 in
Profundidad de asentamiento del casing previo	7328 ft
Casing previo	OD=13.375'; peso: 54.5 lb/ft; grado: J55
Profundidad de asentamiento - casing a cementar	12240 ft
Casing a Cementar	OD=9-625'; peso: 40 lb/ft; grado: J55
Profundidad del collar flotador	12150 ft
Tope del cemento	8000 ft
Gradiente de fractura estimado	0.73 psi/ft
Gradiente de poro estimado	0.6 psi/ft

La última sección fue perforada con lodo de bentonita con las siguientes características: Densidad= 12 ppg, Viscosidad plástica (VP)= 40 cp, Yield Point (YP)= 15 lb/100ft²; comportamiento de plástico de Bingham; El agua disponible en la locación presenta una viscosidad de 2 cp y una densidad de 8.4 ppg.

El equipo de perforación dispone de una bomba con las siguientes características: Una Bomba tríplex con camisa de longitud de 1 ft x 7 pulgadas de diámetro, con capacidad para 100 emboladas por minuto y una eficiencia del 85%. Por cuestiones de presupuesto se restringe en número de unidades de cementadoras a un máximo de 2.

Diseños propuestos por el equipo de laboratorio			
Propiedad	Lechada 1	Lechada 2	Lechada 3

Densidad del agua [ppg]	8.4	8.4	8.4
Clase de Cemento	G	G	H
% Agua en peso del cemento	38	44	44
Ø600	50	42	60
Ø300	37.5	30.5	40
Ø200	29.5	23.5	30
Ø100	22	17.5	20
Ø6	11	10	9
Ø3	8.5	8	8
Tiempo de fraguado [min]	360	300	340

Todas las lechadas son dosificadas al 0.5% en peso del cemento con un retardante que no requiere agua y tiene una densidad relativa de 1.2.

Use el software CEMSEI para determinar la densidad aproximada de cada diseño y las propiedades reológicas de las lechadas (Incluyendo el modelo); Recuerde especificar en el informe la cantidad de aditivos, sacos de cemento necesarios y los barriles de agua a utilizar, incluyendo los destinados para pre-flujo y/o desplazamiento.

Ya que la planeación de operaciones de cementación primaria consiste en una retroalimentación entre el diseño de laboratorio y el diseño de la operación, informe al equipo de laboratorio qué propiedades se deberían modificar para mejorar el diseño de las lechadas u otros fluidos presentes en la operación, para optimizar su desempeño durante esta.

ANEXO D: REPORTE POST OPERACIONAL
CEMENTACIÓN REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P



REPORTE POST
OPERACIONAL
CEMENTACION
REV. 20"
POZO ANH PATIA 1 ST P


Versión: 001
Fecha: 01/08/11
Código: PR-C-001

REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REVESTIMIENTO 20" @ 765 FT MD

POZO ANH PATIA 1 ST P WEATHERFORD

PRESENTADO A: INGS. JORGE CALVETE / WERNEY MACHUCA
Julio - 2012

PREPARADO POR: JOSÉ DAVID DÍAZ DÍAZ
CPVEN SUCURSAL COLOMBIA

	REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P	Versión: 001
		Fecha: 01/06/11
		Código: PR-C-001

OBJETIVOS

Los objetivos de cementación del Rev. de Superficie fueron:

Fijar el Revestimiento de 20" para establecer un buen soporte al mismo y continuar con la perforación de las siguientes fases del pozo,

Proveer un sello hidráulico en todo el espacio anular entre el revestimiento de 20" y el hueco perforado con broca de 26", garantizando un excelente sello al nivel del zapato y aislando fuentes de aguas superficiales.

CONSIDERACIONES

Esta sección fue perforada verticalmente con broca de 26" desde superficie hasta 775 ft MD; se utilizó lodo Agua Bentonita con una densidad entre 8.8 ppg - 9.0 ppg. Posteriormente se corrió y cementó el revestimiento de 20", L-80, 133 #/ft, BTC, R-3 a 765 ft MD.

El método de cementación utilizado fue el de Inner String Inner. Como equipo de Flotación se utilizó un Zapato Flotador Tipo Stabin Doble Válvula de 20", BTC, WTH y como tubería de trabajo se utilizó, Stinger y tubería DP de 5 7/8" conexión Express VX57. Adicionalmente fue instalado un centralizador de 5 7/8" x 20" 5 pies arriba del Stinger, para dirigir la punta del mismo al momento de realizar el Sting in.

Como equipo de centralización instalaron ocho (8) centralizadores Bow Spring 20" x 26" WTH, el primero a 10 ft arriba del Zapato Flotador con un Stop Ring de 20" y los restantes de acuerdo al Tally Anewo. Se recomendó instalar el último centralizador en el coupling entre el 2do y 3er tubo de revestimiento para asegurar la corrida de la tubería macarroni en el evento en que no retornara cemento en superficie al final del bombeo del volumen establecido.

El desplazamiento fue realizado con 15.0 bbl de Agua Fresca a una rata de 2.0 bpm y las bombas de la unidad de cementación. La presión final de desplazamiento fue de 250 psi. Al realizar el Back Flow se recibió en los tanques 0.1 bbl. El equipo de flotación funcionó perfectamente.


LECHADA

Para cubrir todo el espacio anular mezclaron y bombearon 434 bbl de Lechada NETA con densidad constante de 15.8 ppg, preparada con Cemento Clase "G", con un tiempo de bombeabilidad superior en 3:50 HH:MM, el tiempo Total de la operación fue de 2:05 HH:MM.

Para el cálculo inicial del volumen de la Lechada se recomienda utilizar un exceso del 100% sobre el volumen estimado con la broca utilizada para perforar esta sección, correspondiente a un Diámetro Equivalente de Hueco de 30.85".

De acuerdo al volumen de cemento bombeado, el cual fue de 434 bbl y al volumen de cemento retornado, se estima un diámetro promedio del hueco de 30.93", equivalente a un hueco en calibre con un exceso del 101%. Valor muy aproximado al asumido para el cálculo inicial.

Se dispuso en locación de 6000 Sx de Cemento Clase "G".

	<p style="text-align: center;"> REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P </p>	<p>Versión: 001</p>
		<p>Fecha: 01/06/11</p>
		<p>Código: PR-C-001</p>

PREFLUJOS

Como preflujo se bombearon 50 bbl de agua fresca 8.4 ppg para separar físicamente el lodo de la lechada de cemento y así evitar la contaminación del mismo. Presión Inicial 140 psi, Presión Final 150 psi.



REPORTE POST
OPERACIONAL
CEMENTACION
REV. 20"
POZO ANH PATIA 1 ST P

Versión: 001
Fecha: 01/06/11
Código: PR-C-001

DESCRIPCION POZO ANH PATIA 1 ST P

CSG 20" 0 ft – 765 ft (MD)

Diámetro Externo 26.0 in
Diámetro Interno 20.0 in
Peso Linear 133 lbm/ft
Grado del Casing L-80
Rosca BTC
Presión de Colapso 1600 psi
Presión de Estallido 4450 psi
Capacidad Interna 0.34079 bbl/ft

HUECO ABIERTO 26" 0 ft – 775 ft (MD)

Diametro Interno 26.0 in
Exceso 101% (Diámetro Real Pozo)

TUBERIA DP 5 7/8" 0 ft – 769 ft (MD)

Diámetro Externo 5.875 in
Diámetro Interno 5.045 in
Peso Linear 26.7 lbm/ft
Grado S-135
Conexión Express VX57
Capacidad Interna 0.024725 bbl/ft

LODO DE PERFORACION

Tipo de Lodo Acuagel.
Densidad de Lodo 8.8 - 9.0 ppg

TEMPERATURAS DE FORMACION @ 765 ft MD.

BHST 90.0 °F
BHCT 83.0 °F



**REPORTE POST
 OPERACIONAL
 CEMENTACION
 REV. 20"
 POZO ANH PATIA 1 ST P**

Versión: 001 Fecha: 01/06/11 Código: PR-C-001

CALCULOS

Volumen de Lechada

Para el cálculo inicial del volumen de la Lechada se recomendó utilizar un exceso del 100% sobre el volumen estimado con la broca utilizada para perforar esta sección, correspondiente a un Diámetro Equivalente de Hueco de 30.85".

De acuerdo al volumen de cemento bombeado, el cual fue de 434 bbl y al volumen de cemento retornado, se estima un diámetro promedio del hueco de 30.97", equivalente a un hueco en calibre con un exceso del 101%. Valor muy aproximado al asumido para el cálculo inicial.

Condiciones Iniciales para los Cálculos

Altura de Columna Hueco abierto: 765 ft
 Capacidad del Anular Hueco 26" - CSG 20": 0.26812 bbl / ft
 Capacidad del Hueco 26": 0.65669 bbl / ft
 Capacidad Interna del Rev. 20": 0.34079 bbl/ft
 Capacidad Interna Dp 5 7/8": 0.02472 bbl/ft
 Exceso: 100% en Open Hole

Volumen Lechada Principal 15.8 PPG:

Volumen de Lechada Anular: 765 ft x 0.26812 bbl / ft	205.2 bbl
Volumen Bolsillo: 5 ft x 0.65669 bbl / ft	3.3 bbl
Exceso 100% en Open Hole	208.5 bbl
Volumen Shoe Track: 10 ft x 0.34079 bbl/ft	3.4 bbl
Volumen Total de Lechada	420.4 bbl
Volumen Propuesto a Bombear (2060 Sx de Cemento "G")	<u>421.0 bbl</u>
Volumen Real Bombeado (2120 Sx de Cemento "G")	<u>434.0 bbl</u>

Desplazamiento

Volumen de Desplazamiento:

Long. Dp. 5 7/8" x Capacidad Interna del Dp 5 7/8"

Volumen Teórico de Desplazamiento: 765 ft x 0.02472 bbl/ft – Volumen Shoe Track	<u>15.5 bbl</u>
Volumen Real Desplazado	<u>15.0 bbl</u>



**REPORTE POST
OPERACIONAL
CEMENTACION
REV. 20"
POZO ANH PATIA 1 ST P**

Versión: 001

Fecha: 01/06/11

Código: PR-C-001

REPORTE DE LABORATORIO



REPORTE DE LABORATORIO

Versión: 001
 FECHA: 01/11/2011
 Código: F-C-LAB-003
 Página: 1 de 1

No DE REPORTE CP050 FECHA 05/04/2012

1. INFORMACION GENERAL

Compañía : weatherford
 Campo : ANH PATIA 1 ST - P
 Trabajo : casing 20
 Profundidad : 1.000 R.M.D.
 BHST: 92 'F'
 BHCT: 100 'F'
 Diámetro rev: 20 pulgadas

CLIENTE Wamey Machuca
 Pozo / Loe :
Taladro :
 Presión : 400 psi
 Densidad lodo : 8,4 lbs / gal
 Densidad mezcla : 15,5 lbs / gal
 Diámetro (hoyo) : 26 inch

2. INFORME DE FORMULACION

Cmto "G" + 0.012 Gal/Sx Antiespumante + AGUA DE LA LOCACION

TIEMPO DE BOMBEABILIDAD: 3 Hr 52 Min + 40 MINUTOS PRIMEZCLADO

REOLOGIA (VISCOSIMETRO CHANDLER)

	↓	↑	Prom.	Radio
500 rpm =	35	40	37,50	8,8750
200 rpm =	28	31	29,50	8,9032
100 rpm =	21	23	22,00	8,9130
5 rpm =	10	12	11,00	8,9333
3 rpm =	8	9	8,50	8,9500

Rendimiento: 1,15 ¹/_{haca}
 Agua Requerida: 5,0000 galones/saca

MODELO POWER LAW

Índice de Comportamiento (n): 0,2997
 Índice de Consistencia (K): 0,0560 lbf - seg. / ft²

MODELO BINGHAM PLASTIC

Viscosidad Plástica: 28,3 cP
 Punto Cedente: 10,85 lbf - seg. / ft²

Gel 10 seg. = 8,08 lbf / 100 ft²
 Gel 10 min. = 12,08 lbf / 100 ft²
 Gel 30 min. = 15,00 lbf / 100 ft²

MODELO SELECCIONADO: Ley de potencias

FLUIDO LIBRE: 0,80 c.o/2 hrs

FLUIDO LIBRE A 46%: NR c.o/2 hrs

PERDIDA DE FILTRADO: 98,0 c.o/ 30 min.

RESISTENCIA A LA COMPRESION

8 hrs = 489 psig
 12 hrs = 1027 psig
 24 hrs = 1943 psig


Lotes Nº
 DYCKERHOFF

Observaciones:

MARIA ALEJANDRA ESPAÑA CABRERA
 Laboratorista

JOSE DAVID DIAZ
 Técnicas y Ventas

Página 1

	REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P	Versión: 001
		Fecha: 01/06/11
		Código: PR-C-001

Open/Cased Hole Description

Hole Type	MD (ft)	TVD (ft)	Hole Diam (in)	Pore Pressure			Frac Pressure		
				(psi)	(psi/ft)	(ppg)	(psi)	(psi/ft)	(ppg)
Open	765.0	765.0	26.00	332.77	0.44	8.4	474.300	0.62	11.9
Open	775.0	775.0	26.00	337.13	0.44	8.4	480.500	0.62	11.9


Casing Description

Casing Type	OD (in)	ID (in)	Weight (lb/ft)	Grade	Length (ft)	Top MD (ft)	Bottom MD (ft)
Casing	20.00	18.73	133.00	L-80	762.00	0.00	762.00
Float Shoe	20.00	2.75	133.00	L-80	3.00	762.00	765.00
Drill Pipe	5.88	5.05	26.70	L-80	765.00	0.00	765.00

Casing Wt (in Air): 101745 lbs
 Casing Wt (w/Buoyancy): 87550 lbs

Pipe and Wellbore Volumes

Surface Line Length: 100.00 ft
 Surface Line ID: 1.85 in
 Surface Line Volume: 0.33 bbls
 Pipe Volume Above Collar: 15.45 bbls
 Pipe Volume Below Collar: 3.46 bbls
 Annulus Volume in Cased Hole: 0.00 bbls
 Annulus Volume in Drilled Hole: 410.21 bbls
 RatHole Volume: 13.13 bbls
 Total Wellbore Volume: 442.59 bbls

	REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P	Versión: 001
		Fecha: 01/06/11
		Código: PR-C-001

Fluid Description

Fluid Name	Rheol Type	Fluid Type	Density (ppg)	Visc (cp)	PV (cp)	YP (lbf/100 ft2)	n'	K' (lbf*s^n/ft2)
TAIL SLURRY	PL	C	15.80				0.16	0.33
AGUA	N	W	8.40	2.00				
9.0 PPG MUD	BP	M	9.00		8.00	16.50		

N - Newtonian, PL - Power Law, BP - Bingham Plastic

Fluid Quantities

Fluid Name	Stage Volume (bbls)	Mixed Volume	Water Volume (bbls)	Total Cement (sk)	Cement Yield (ft3/sk)	Excess Mixed (%)
TAIL SLURRY	426.81	426.81	233.68	1526.34	1.570	0.0
AGUA	65.79	65.79	0.00	---	---	0.0


100.0% excess annulus volume used in computing stage volumes.

Fluid Pumping and Mixing Schedule

#	Fluid Name/Stage	Fluid Volume (bbls)	Pumping Rate (bpm)	Mixing Rate (sk/min)	Stage Time (min)	Time with Cement (min)	Cumul Time (min:sec)
1	AGUA	50.00	5.00	0.00	10.00	0.00	10:00
2	TAIL SLURRY	426.81	5.03	18.00	84.81	84.81	94:48
3	AGUA	15.79	2.00	0.00	7.89	92.70	102:42

Rigid Top Plug Before Stage # 3

Wiper Plug Before Stage # -1

 CPVEN SERVICIOS A POZOS Sucursal Colombia	REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P	Versión: 001
		Fecha: 01/06/11
		Código: PR-C-001

Pressures at Critical Depths for Final Placement

Critical Depth	Meas. Depth (ft)	Vert. Depth (ft)	Pore Pressure		Hydrostatic Pressure		Frac Pressure	
			(psi)	(ppg)	(psi)	(ppg)	(psi)	(ppg)
Well Bottom	775.0	775.0	337	8.36	637	15.80	481	11.92
User Spec. MD 1	1000.0	1000.0	435	8.36	822	15.80	620	11.92

Critical Pumping Rates

Fluid	Hole Diam. (in)	Pipe OD (in)	Pump Rate (bpm)	Fluid Velocity (ft/min)	Reynolds numbers	Qmin turb (bpm)	Qmax plug (bpm)
TAIL SLURRY	26.00	20.00	2.00	7.460	1	179.89	28.21
AGUA	26.00	20.00	2.00	7.460	2376	2.53	0.08
9.0 PPG MUD	26.00	20.00	2.00	7.460	2	83.85	14.58
TAIL SLURRY	26.00	20.00	5.03	18.770	7	179.89	28.21
AGUA	26.00	20.00	5.03	18.770	5979	2.53	0.08
9.0 PPG MUD	26.00	20.00	5.03	18.770	12	83.85	14.58
TAIL SLURRY	26.00	20.00	5.00	18.649	6	179.89	28.21
AGUA	26.00	20.00	5.00	18.649	5940	2.53	0.08
9.0 PPG MUD	26.00	20.00	5.00	18.649	12	83.85	14.58

Reynolds Number for Turbulent Flow: 3000
 Reynolds Number for Plug Flow: 100

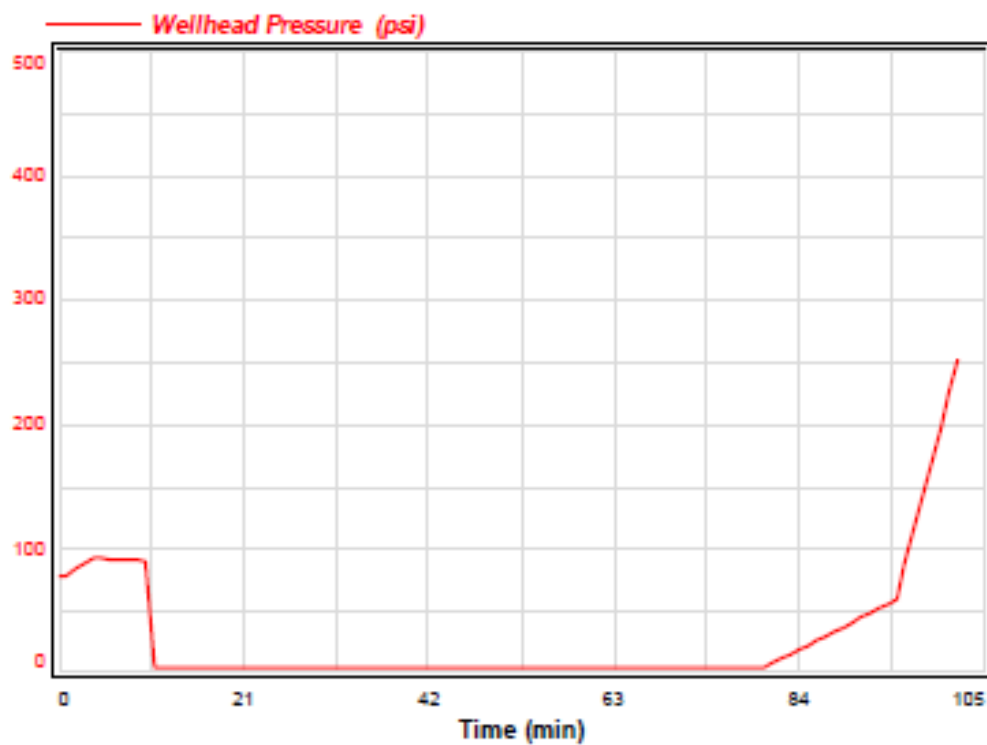
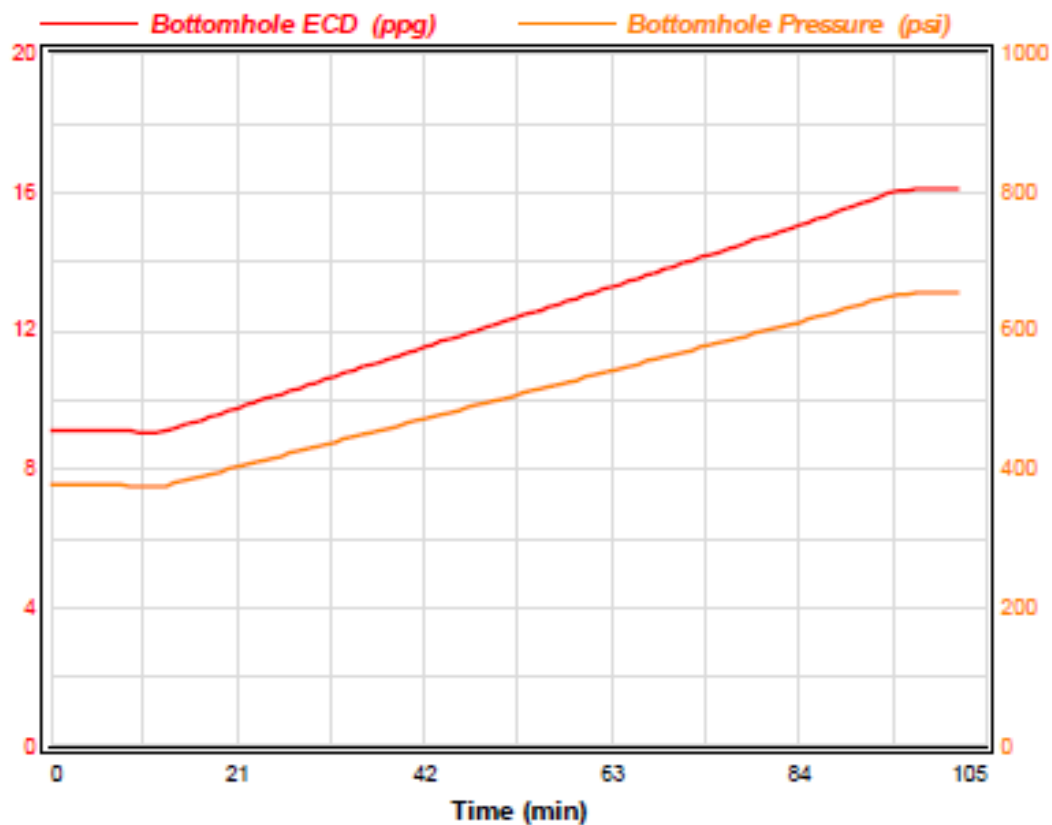


REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION
REV. 20"
POZO ANH PATIA 1 ST P

Versión: 001

Fecha: 01/06/11

Código: PR-C-001



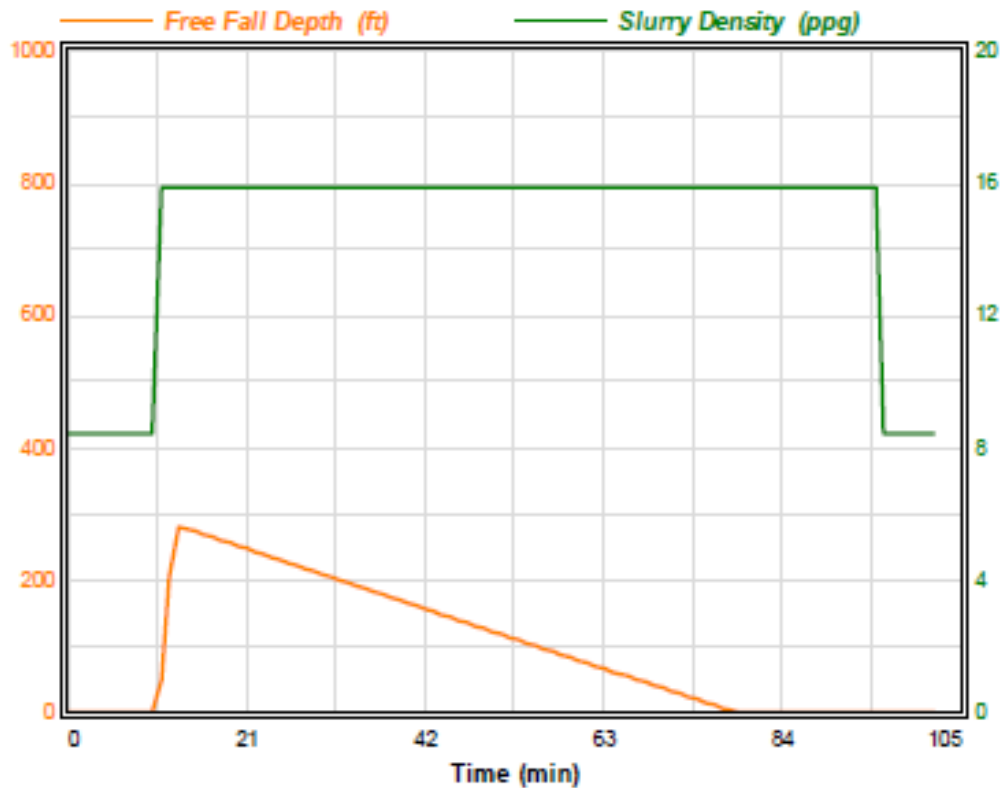
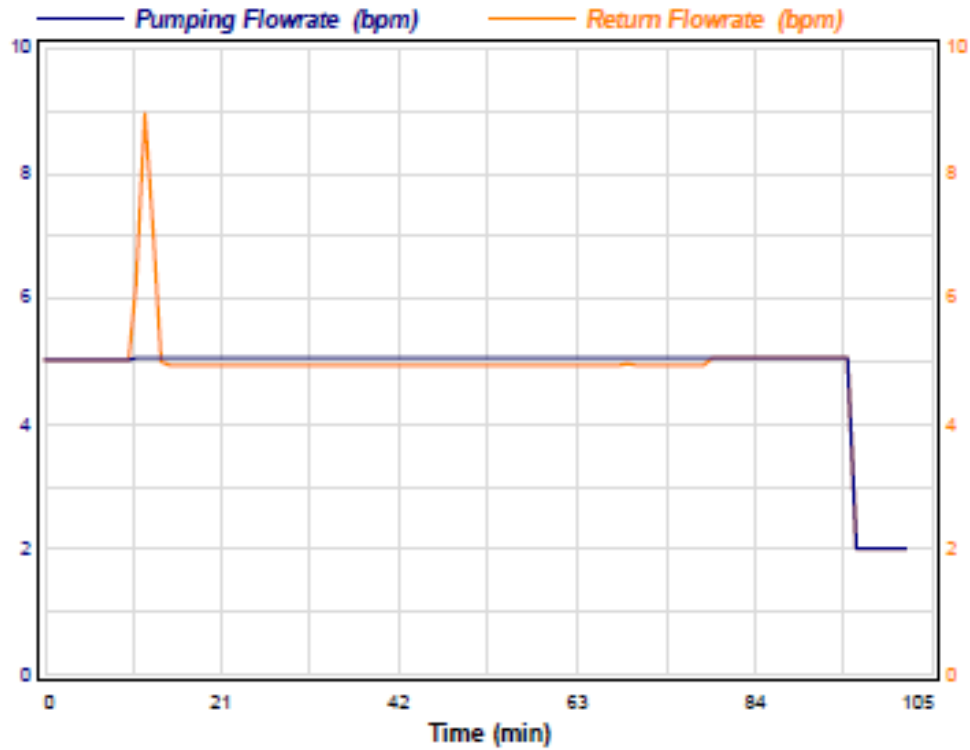


REPORTE POST
OPERACIONAL
CEMENTACION
REV. 20"
POZO ANH PATIA 1 ST P

Versión: 001

Fecha: 01/06/11

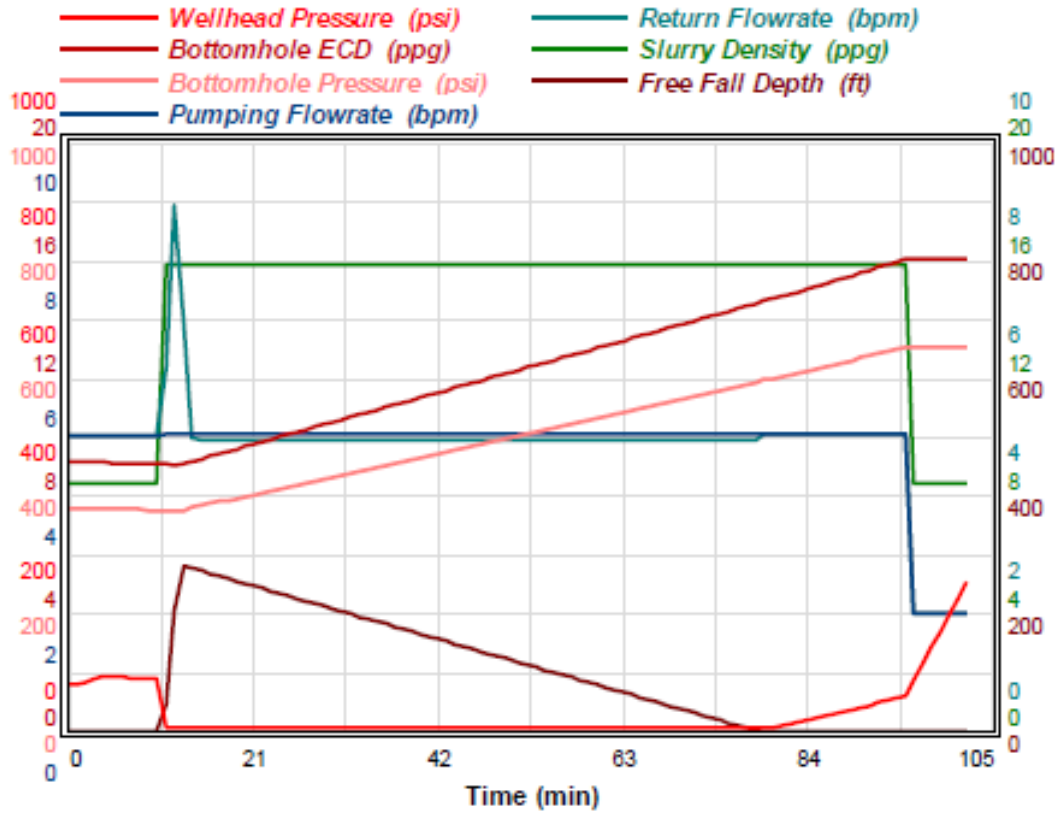
Código: PR-C-001






REPORTE POST
 OPERACIONAL
 CEMENTACION
 REV. 20"
 POZO ANH PATIA 1 ST P

Versión: 001
 Fecha: 01/06/11
 Código: PR-C-001



	REPORTE POST OPERACIONAL CEMENTACION REV. 20" POZO ANH PATIA 1 ST P	Versión: 001
		Fecha: 01/06/11
		Código: PR-C-001

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El trabajo de cementación fue realizado de acuerdo a lo planeado y discutido previamente con el Representante del Cliente.
2. Durante la operación no se presentó ningún tipo de problema operativo, ni accidentes que pudieran afectar el desarrollo del mismo.
3. De acuerdo al volumen de cemento bombeado, el cual fue de 434 bbl y al volumen de cemento retornado, se estima un diámetro promedio del hueco de 30.93", equivalente a un hueco en calibre con un exceso del 101%. Valor muy aproximado al asumido para el cálculo inicial.
4. La presión final de desplazamiento estuvo acorde a la esperada de acuerdo al programa hidráulico (Simulada). Presión Final de Desplazamiento Esperada = 250 psi. Presión Final de Desplazamiento Real = 250 psi, con lo que se concluye que NO se presentó canalización de cemento en el Anular.
5. La comunicación y la planeación del trabajo permitieron asegurar el desarrollo del mismo.
6. El equipo de flotación utilizado funcionó correctamente, es importante tener en cuenta que se utilizó un Zapato Flotado Stab-in Doble Válvula.