

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPUESTA TÉCNICA DE CEMENTACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO EN AGUAS ULTRA-PROFUNDAS EN EL GOLFO DE MÉXICO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Br. Rodríguez H, Raúl A.

C.I.: 17.577.035

Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, Mayo 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

PROPUESTA TÉCNICA DE CEMENTACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO EN AGUAS ULTRA-PROFUNDAS EN EL GOLFO DE MÉXICO

TUTOR ACADÉMICO: Ing. Jenny Graterol

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Alexander Báez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Br. Rodríguez H, Raúl A.

C.I.: 17.577.035

Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

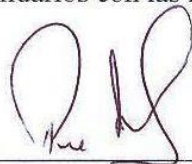
Caracas, Mayo 2012

Caracas, Mayo de 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Raúl A. Rodríguez H., titulado:

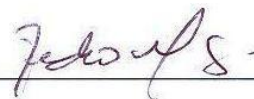
**“PROPUESTA TÉCNICA DE CEMENTACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN
DE UN POZO EXPLORATORIO EN AGUAS ULTRA-PROFUNDAS EN EL
GOLFO DE MÉXICO”**

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



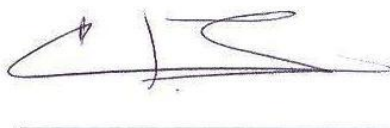
Prof. Pedro Martorano

Jurado



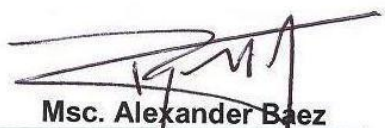
Prof. Pedro Díaz

Jurado



Ing. Jenny Graterol

Tutora Académica



Msc. Alexander Baez
Superintendente de Ingeniería
Gcia. Servicios Internacionales
PDVSA Servicios Petroleros S.A

Tutora Industrial

DEDICATORIA

A tres personas que fueron pilares fundamentales para mi desarrollo, no solo como profesional sino como ser humano. A mi Madre por darme todo lo que tengo y ser siempre esa persona que me orienta y me guía, hacia donde estoy en estos momentos. A mi padre por enseñarme a nunca rendirme y guerrear siempre en los momentos más adversos de la vida y a mi abuelo Cesario Hernández Luis que con sus lágrimas en su rostro al momento de regresar casa me demostraba todo el amor y afecto que siente hacia mi persona. Estoy muy orgulloso de ustedes, *LOS AMOS*.

Raúl Alexander Rodríguez Hernández

El Hombre Exitoso es aquel que elige su Camino y crea su propio Destino RR7

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecerle a **Dios** por brindarme la oportunidad de nacer y darme la familia que me has dado. Muchas gracias mi **Dios** por cuidarme, protegerme y nunca abandonarme. Y estar allí siempre conmigo acompañándome en los momentos buenos y en esos que uno llaman los malos, porque con esos me ayudaste a crecer internamente como persona y como ser humano.

A mi **Mamá** por ser esa persona que me siempre estuvo a mi lado acompañándome, cuidándome y aconsejándome. También quiero agradecerte por el gran esfuerzo que hiciste por salir adelante conmigo (Tú y Yo) y estar siempre cuando te necesitaba... Te Amo Mucho mami.

A mi **Papá** por estar en esos momentos clave de mi vida y por inyectarme esa fuerza, esas ganas de nunca rendirse y nunca darse por vencido, me ayudo a ser una persona más competitiva en todos los aspectos de la vida, contribuyendo a tener el corazón guerrero que llevo por dentro... Te Amo viejo. Y a toda mi familia **Abuelos, Tíos y Primos** por apoyarme siempre y por extenderme su mano cada vez que la necesitaba de una u otra manera, los quiero muchos.

A la U.C.V., a mi Ilustre y adorada **Universidad Central de Venezuela**, mi segunda patria. Por permitir desarrollarme no solo en el ámbito profesional sino también en la parte deportiva donde entregue mi cuerpo y mi alma en cada pista donde corría y en cada campo de softball donde jugaba. Es inexplicable el sentimiento que se tiene cada vez que tu escudo estaba en mi pecho, mil gracias de verdad por darme esa oportunidad.

A la U.C.V., Núcleo Cagua, por ser partícipe de la primera epata de mi carrera, donde pude realizar el ciclo básico, también a todos los profesores y miembros que lo conforman.

A mi tutora académica **Jenny Graterol** por su apoyo y consejos dados en clases, eres más que un profesora para mi, te considero mi amiga de verdad muchas gracias te quiero mucho. Así mismo a mi tutor académico **Alexander Báez** por darme la oportunidad para la elaboración de este Trabajo Especial de Grado.

A todos mis compañeros de PDVSA Servicios S.A. en especial a **Yabira Villamizar, Candelaria Moreno, Henry Solé, Gilberto Mata y Rafael Flores** por el apoyo que me brindaron durante mi estadía en el Estado Monagas.

A mis amigos de la universidad del Núcleo de Cagua **Diasis Yepes, Laionel Hernández, José M. Romero, Cesar Angelino, Freddy Goyo, Cesar Briseño, Gremily Meléndez, Nieves Francia, Robersy Hernández, José L. Romero Jr. y Francisco Delgado** por esos momentos de alegrías y tristeza que pudimos compartir juntos en nuestro primer ciclo de formación, los aprecio, los quiero y los amo amigos.

A mis amigos de Caracas **Keith Contreras, Lennies Guevara, Josmary Castro, Johanna Barreiro, Reina Pérez, Luisana Gómez, Efraín Aristimuño, Orlando Rodríguez, Oscar Centeno, Eduardo Morante, Jorge Jarohueh, Nael Abo Ras, Mariano Martin, Sergio Cabrales** y a amigo de clase y entrenamiento **Yorangel Tineo**. De corazón los quiero y los amo mucho, mil gracias y bendiciones para todos ustedes. En especial a **Keith, Diasis, Lennies, Johanna, Reina, Efraín, Orlando, Oscar y Tineo** por el apoyo incondicional que me brindaron y por cada una de sus palabras de aliento, gestos, abrazos que me hicieron crecer espiritualmente cada día más y así seguir mejorando como persona.

A mis amigos de la UDO, **Mariana Pandolfi y José Urbina** por brindarme el apoyo y recibirme con mucho afecto cuando llegue al Estado Monagas los quiero muchos, les deseo lo mejor del mundo suerte y éxito.

A mis amigos **Carlos Paz Alfredo, Luis Guillen, Mauricio Aponte, Jesús Montano y José A. Sequera** por compartir tantos momentos buenos y por extenderme su mano amiga siempre que los necesitaba, en especial a **Carlos** por su lealtad hacia mi persona. Los Quiero Muchos.

Y por último, pero no menos importante quiero agradecerla a la niña que con tan solo una sonrisa logró llenar mi corazón de sentimientos muy lindos. Quiero agradecerte profundamente por estar allí siempre cuando te necesitaba, por ser esa persona con la que pude vivir momentos inolvidables y aquella que convirtió mis lágrimas en sonrisas. De verdad GRACIAS **Floribel M. Burgos S.** Te Amaré siempre que viva.

Rodríguez H., Raúl A.

**PROPUESTA TÉCNICA DE CEMENTACIÓN PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO EN
AGUAS ULTRA-PROFUNDAS EN EL GOLFO DE MÉXICO.**

**Tutor Académico: Ing. Jenny Graterol. Tutor Industrial: Msc. Alexander Báez.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo.**

Año 2012, p 188.

Palabras Claves: Cementación, Lechadas de Cemento Antimigratorios, Propiedades Tixotrópicas, Aguas Ultra-profundas.

Resumen: Con la alta demanda energética a nivel mundial y la creciente necesidad de encontrar nuevos yacimientos de hidrocarburos debajo de los océanos, Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA) en conjunto a su filial PDVSA, Servicios S.A., se encuentran apuntando hacia este tipo de exploraciones, esta vez en zonas de aguas Ultra-profundas en el Golfo de México, donde existen estrictas normas ambientales, tras el accidente ocurrido en Abril de 2010 en el pozo Macondo, generado por una deficiente técnica de cementación para el *Liner* de producción. Es por esto que la cementación tiene una gran importancia durante toda la vida productiva del pozo. Debido a esto aspectos PDVSA Servicios S.A., inició la búsqueda de un programa de cementación y se planteó realizar el siguiente objetivo: “Propuesta técnica de cementación para la Construcción de un Pozo Exploratorio en aguas Ultra-profundas en el Golfo de México”. El presente estudio se basa en desarrollar y proponer una alternativa factible para la cementación primaria del pozo RR-1X, localizado en el Bloque 54, Básicamente se plantearon dos escenarios para la cementación del pozo, Sin *Riser* Marino y Con *Riser* Marino luego se realizó la evaluación de las posibles lechadas de cemento a través de matrices y se determinaron los volúmenes teóricos para cada una de las fases. En base a los resultados obtenidos se seleccionó la lechada de cemento y se aplicó el *Software* de Cementación (*OptiCem*), donde se evaluaron los parámetros operacionales imprescindibles para la optimización de las lechadas. Una vez realizadas las simulaciones se procedió a realizar la propuesta técnica de cementación, el cual se concluyó que las lechadas alivianadas antimigratorias y con propiedades tixotrópicas son las que mejor se adaptan para este tipo de ambientes. Finalmente se estimaron los costos totales asociados a la cementación del pozo en estudio.

ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
I.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	4
I.2.1. Objetivo General	4
I.2.2. Objetivos Específicos.....	4
I.3. ALCANCE, JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES	5
I.3.1. Alcance.....	5
I.3.2. Justificación.....	5
I.3.3. Limitaciones	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
II.1. CEMENTACIÓN	8
II.2. PRINCIPALES PROPÓSITOS DE LA CEMENTACIÓN	10
II.3. TIPOS DE CEMENTACIÓN	10
II.3.1. Cementación Primaria	11
II.3.2. Cementación Secundaria	12
II.3.2.1. Cementación Forzada	13
II.3.2.2. Colocación de Tapones de Cemento	14
II.4. TIPOS DE CEMENTOS	15
II.5. CEMENTOS ESPECIALES	17
II.5.1. Micro Cementos	18
II.5.2. Cementos Tixotrópicos	18
II.5.3. Cementos Espumantes	19
II.6. CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS DE CEMENTOS	19
II.6.1. Aceleradores	20

II.6.2. Retardadores	20
II.6.3. Entendedores	21
II.6.3.1. Entendedores acuosos	22
II.6.3.2. Entendedores con agregados de baja densidad	22
II.6.3.3. Entendedores gaseosos	22
II.6.4. Densificantes	22
II.6.5. Dispersantes	23
II.6.6. Controladores de Pérdida de Circulación	23
II.6.7. Controladores de Migración de Gas	24
II.6.8. Aditivos Especiales	24
II.6.8.1. Antiespumantes	25
II.6.8.2. Antimigratorios	25
II.6.8.3. Agentes que previenen la retrogresión a la resistencia	25
II.7. LECHADA DE CEMENTO	26
II.7.1. Tipos de Lechadas de Cementos	27
II.7.1.1. Lechada de cola	27
II.7.1.2. Lechada de relleno	27
II.8. PREPARACIÓN DEL POZO PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO	27
II.8.1. Diseño de Preflujos	29
II.8.1.1. Lavadores Químicos	30
II.8.1.2. Espaciadores	30
II.8.2. Movimiento de la Tubería de Revestimiento	31
II.8.3. Centralización de la Tubería de Revestimiento	32
II.9. IMPLEMENTOS USADOS PARA LA CEMENTACIÓN	34
II.9.1. Equipos y Accesorios	34
II.9.1.1. Zapata	35
II.9.1.2. Cuello Flotador	36
II.9.1.3. Centralizadores	37

II.9.1.4. Raspadores	39
II.9.1.5. Cestas de Cementación	40
II.9.2. Herramientas	40
II.9.2.1. Tapones de Cementación	40
II.9.2.2. Retenedores de Cemento	42
II.10. PROCESO DE CEMENTACIÓN	42
II.10.1. Cementación en Una Etapa	43
II.10.2. Cementación por Etapas	44
II.10.2.1. Cementación Primera Etapa	45
II.10.2.2. Cementación Segunda Etapa	46
II.10.2.3. Cementación con Sarta Interna (<i>Inner String</i>)	48
II.11. PROBLEMAS COMUNES DE CEMENTACIÓN	50
II.11.1. Condición pobre del hoyo	51
II.11.2. Condición pobre del fluido de perforación	51
II.11.3. Centralización pobre	51
II.11.4. Pérdida de Circulación	52
II.11.5. Presión de Formación Normal y Subnormal	52
II.11.6. Presión alta de bombeo	52
II.12. CÁLCULOS DE CEMENTACIÓN	52
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL ÁREA	54
III.1. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL GOLFO DE MÉXICO	54
III.1.1. Clasificación de las Profundidades del Aguas.....	55
III.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	58
III.3. DATOS GENERALES DE LA LOCALIZACIÓN	58
III.4. ESTUDIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA PETROLÍFERO	60
III.4.1. Roca madre	60
III.4.2. Sellos.....	61
III.4.3. Reservorios.....	62

III.5. ESTIMACIÓN DEL POES Y GOES	64
III.6. MODELADO 2D y 3D	64
III.7. LITOESTRATIGRAFÍA LOCAL	66
III.8. DISEÑO DEL POZO	73
III.8.1. Puntos de Asentamientos	74
III.9. ESTIMACIÓN DE PRESIÓN DE PORO Y FRACTURA	76
CAPÍTULO IV: MARCO MEDOLÓGICO	77
IV.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	77
IV.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	78
IV.2.1. Captura de Información.....	79
IV.2.2. Planteamiento de las Posibles Lechadas	81
IV.2.2.1. Sin <i>Riser</i> Marino	83
IV.2.2.1. Con <i>Riser</i> Marino	85
IV.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES.....	88
IV.3.1. Aplicación del Software de Cementación (<i>OptiCem</i>)	88
IV.3.1.1. Datos Generales.....	89
IV.3.1.2. Costa Afuera (<i>Offshore</i>)	90
IV.3.1.3. Editar el Pozo	90
IV.3.1.4. Esquema Mecánico del Pozo.....	91
IV.3.1.5. Editar los Fluidos.....	92
IV.3.1.6. Centralización de la Tubería.....	93
IV.3.1.7. Datos de Trabajo.....	94
IV.4. PROPUESTA DE CEMENTACIÓN	96
IV.4.1. Estimación de Costos	97
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	101
V.1. LECHADAS SELECCIONADAS	101
V.1.1. Fase I (Hoyo Conductor)	101

V.1.2. Fase II (Hoyo Superficial).....	103
V.1.3. Fase III (Hoyo Intermedio 1 <i>Liner</i>)	104
V.1.4. Fase IV (Hoyo Intermedio 2)	105
V.1.5. Fase V (Hoyo Productor 1).....	106
V.1.6. Fase VI (Hoyo Productor 2 <i>Liner</i>).....	106
V.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN	107
V.2.1. Fase I (Hoyo Conductor)	107
V.2.2. Fase II (Hoyo Superficial)	109
V.2.3. Fase III (Hoyo Intermedio 1 <i>Liner</i>)	112
V.2.4. Fase IV (Hoyo Intermedio 2)	114
V.2.5. Fase V (Hoyo Productor 1).....	117
V.2.6. Fase VI (Hoyo Productor 2 <i>Liner</i>).....	120
V.3. PROPUESTA DE CEMENTACIÓN.....	123
V.3.1. Lechada de Cemento para el Revestidor de 36 pulg (Fase I)	123
V.3.2. Lechada de Cemento para el Revestidor de 20 pulg (Fase II).....	124
V.3.3. Lechada de Cemento para el Revestidor de 16 pulg (Fase III)	125
V.3.4. Lechada de Cemento para el Revestidor de 13 ^{3/8} pulg (Fase IV).....	126
V.3.5. Lechada de Cemento para el Revestidor de 9 ^{5/8} pulg (Fase V)	127
V.3.6. Lechada de Cemento para el Revestidor de 7 pulg (Fase VI)	128
V.4. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LAS LECHADAS PROPUESTAS	129
CAPÍTULO VI: PROPUESTA TÉCNICO-ECONÓMICA.....	131
VI.1. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 36 PULG	131
VI.1.1. Objetivos	131
VI.1.2. Diseño de la Operación	132
VI.1.2.1. Sistema de Fluido	132
VI.1.2.2. Tren de Pre-Flujo	133
VI.1.3. Volumetría a Utilizar	133

VI.1.4. Análisis de Tiempo de la Lechada	134
VI.1.5. Centralizadores	135
VI.1.6. Estimación de los Costos	135
VI.2. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 20 PULG	136
VI.2.1. Objetivos	136
VI.2.2. Diseño de la Operación	136
VI.2.2.1. Sistema de Fluido	137
VI.2.2.2. Tren de Pre-Flujo	137
VI.2.3. Volumetría a Utilizar	138
VI.2.4. Análisis de Tiempo de la Lechada	138
VI.2.5. Centralizadores	139
VI.2.6. Estimación de los Costos	139
VI.3. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 16 PULG	140
VI.3.1. Objetivos	140
VI.3.2. Diseño de la Operación	141
VI.3.2.1. Sistema de Fluido	141
VI.3.2.2. Tren de Pre-Flujo	142
VI.3.3. Volumetría a Utilizar	142
VI.3.4. Análisis de Tiempo de la Lechada	143
VI.3.5. Centralizadores	144
VI.3.6. Estimación de los Costos	144
VI.4. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 13 ^{3/8} PULG	145
VI.4.1. Objetivos	145
VI.4.2. Diseño de la Operación	145
VI.4.2.1. Sistema de Fluido	146
VI.4.2.2. Tren de Pre-Flujo	146
VI.4.3. Volumetría a Utilizar	146
VI.4.4. Análisis de Tiempo de la Lechada	147

VI.4.5. Centralizadores.....	148
VI.4.6. Estimación de los Costos	148
VI.5. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 9 ^{5/8} PULG.....	149
VI.5.1. Objetivos	149
VI.5.2. Diseño de la Operación	150
VI.5.2.1. Sistema de Fluido	150
VI.5.2.2. Tren de Pre-Flujo	151
VI.5.3. Volumetría a Utilizar.....	151
VI.5.4. Análisis de Tiempo de la Lechada	152
VI.5.5. Centralizadores.....	153
VI.5.6. Estimación de los Costos	153
VI.6. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 7 PULG	154
VI.6.1. Objetivos	154
VI.6.2. Diseño de la Operación	155
VI.6.2.1. Sistema de Fluido	155
VI.6.2.2. Tren de Pre-Flujo	155
VI.6.3. Volumetría a Utilizar.....	156
VI.6.4. Análisis de Tiempo de la Lechada	157
VI.6.5. Centralizadores.....	157
VI.6.6. Estimación de los Costos	158
CONCLUSIONES.....	159
RECOMENDACIONES.....	161
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	163
APÉNDICES.....	167
GLOSARIO	178
NOMENCLATURA.....	187

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Formulación Química del Cemento	9
Tabla II.2. Clasificación API del Cemento	17
Tabla III.1. Clasificación de las Aguas	56
Tabla III.2. Datos Básicos de la Localización	59
Tabla III.3. Niveles de rocas madres consideradas en la columna sedimentaria	60
Tabla III.4. Factor de Diseño	73
Tabla IV.1. Característica de los Revestidores	81
Tabla IV.2. Modelo de la Matriz de Evaluación	82
Tabla IV.3. Valores para la evaluación de matrices.....	82
Tabla IV.4. Resumen de Evaluación de las Matrices para las fases Sin <i>Riser</i> Marino	84
Tabla IV.5. Resumen de Evaluación de las Matrices para las fases Con <i>Riser</i> Marino (Hoyos Intermedios).....	86
Tabla IV.6. Resumen de Evaluación de las Matrices para las fases Con <i>Riser</i> Marino (Hoyos Productores).....	87
Tabla IV.7. Costos referenciales del personal y equipos para la cementación en costa afuera	98
Tabla IV.8. Costos referenciales de los aditivos para la cementación en costa afuera.....	99
Tabla IV.9. Costos referenciales de herramientas y accesorios implementados para la cementación en costa afuera.....	100

Tabla V.1.a. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase I: Hoyo Conductor	102
Tabla V.1.b. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase I: Hoyo Conductor	102
Tabla V.2. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase II: Hoyo Superficial	103
Tabla V.3.a. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase III: Hoyo Intermedio 1	104
Tabla V.3.a. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase III: Hoyo Intermedio 1	104
Tabla V.4. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase IV: Hoyo Intermedio 2..	105
Tabla V.5. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase V: Hoyo Productor 1	106
Tabla V.6. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase VI: Hoyo Productor 2 ...	107
Tabla V.7. Volúmenes de Lechadas Fase I	107
Tabla V.8. Volúmenes de Lechadas Fase II	110
Tabla V.9. Volúmenes de Lechadas Fase III	112
Tabla V.10. Volúmenes de Lechadas Fase IV	115
Tabla V.11. Volúmenes de Lechadas Fase V	117
Tabla V.12. Volúmenes de Lechadas Fase VI	120
Tabla V.13. Propiedades de la Lechada Única Alivianada Revestidor 36 pulg	123
Tabla V.14. Propiedades de la Lechada Única Alivianada Revestidor 20 pulg	124
Tabla V.15. Propiedades de la Lechada Única Alivianada Revestidor 16 pulg	125
Tabla V.16. Propiedades de la Lechada Única Antimigratoria Revestidor 13 ^{3/8} pulg	126
Tabla V.17. Propiedades de la Lechada Única Antimigratoria 9 ^{5/8} pulg	127
Tabla V.18. Propiedades de la Lechada Única Antimigratoria 7 pulg	128
Tabla VI.1. Volumetría del Espaciador para el Hoyo 42 pulg	133
Tabla VI.2. Volumetría de la Lechada de Cemento para el Hoyo 42 pulg	134
Tabla VI.3. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 42 pulg	134
Tabla VI.4. Volumetría del Espaciador para el Hoyo 26 pulg	138
Tabla VI.5. Volumetría de la Lechada de Cemento para el Hoyo 26 pulg	138

Tabla VI.6. Volumetría de desplazamiento para el Hoyo 26 pulg.....	138
Tabla VI.7. Volumetría de Espaciador para el Hoyo 20 pulg.....	142
Tabla VI.8. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 20 pulg.....	142
Tabla VI.9. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 20 pulg.....	143
Tabla VI.10. Volumetría de Espaciador para el Hoyo 17 ^{1/2} pulg.....	146
Tabla VI.11. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 17 ^{1/2} pulg.....	147
Tabla VI.12. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 17 ^{1/2} pulg.....	147
Tabla VI.13. Volumetría de Espaciador para el Hoyo 12 ^{1/4} pulg	151
Tabla VI.14. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 12 ^{1/4} pulg	151
Tabla VI.15. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 12 ^{1/4} pulg	152
Tabla VI.16. Volumetría de Lavador y Espaciador para el Hoyo 8 ½ pulg.....	156
Tabla VI.17. Volumetría de Lechada de cemento para el Hoyo 8 ½ pulg.....	156
Tabla VI.18. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 8 ½ pulg.....	156

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1. Cementación Primaria	12
Figura II.2. Cementación Forzada	14
Figura II.3. Régimen de Flujo	28
Figura II.4. Descentralización de la tubería	33
Figura II.5. Centralización de la tubería.....	33
Figura II.6. Zapata Guía y Flotadora.....	36
Figura II.7. Cuello Flotador	36
Figura II.8. Centralizadores	39
Figura II.9. Tapones de Cementación	41
Figura II.10. Proceso de Cementación	43
Figura II.11. Primera Etapa de Cementación	46
Figura II.12. Cuello de Etapas	47
Figura II.13. Segunda Etapa de Cementación	48
Figura II.14. Cementación con Sarta Interna	49
Figura III.1. Ubicación Geográfica del Golfo de México	54
Figura III.2. Ubicación Geográfica de la localización del pozo RR-1X	58
Fig. III.3. Principales tipos de reservorios pronosticados para el Bloque 54	63
Figura III.4. Características de los Reservorios para el Bloque 54	63
Figura III.5. Columna Estratigráfica del Pozo Exploratorio RR-1X	72
Figura III.6. Esquema de Completación del Pozo Exploratorio RR-1X.....	75
Figura III.7. Curva de Presión de Poro y Gradiente de Fractura con el Esquema Final del Pozo Exploratorio RR-1X	76
Figura IV.1. Esquema de la Metodología	79
Figura IV.2. Datos Generales	89
Figura IV.3. Costa Afuera.....	90

Figura IV.4. Editar el Pozo	91
Figura IV.5. Esquema Mecánico del Pozo	91
Figura IV.6. Editar los Fluidos (Lechada de Cemento)	93
Figura IV.7. Centralización de la Tubería.....	94
Figura IV.8. Datos de Trabajo	95
Figura IV.9. Sistema de Circulación del Cemento.....	99
Figura V.1. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 36 pulg)	108
Figura V.2. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 36 pulg)	109
Figura V.3. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 20 pulg)	110
Figura V.4. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 20 pulg)	111
Figura V.5. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 16 pulg)	113
Figura V.6. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 16 pulg).....	114
Figura V.7. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 13 ^{3/8} pulg)	115
Figura V.8. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 13 ^{3/8} pulg)	116
Figura V.9. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 9 ^{5/8} pulg)	118
Figura V.10. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 9 ^{5/8} pulg)	119
Figura V.11. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 7 pulg)	121
Figura V.12. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 7 pulg)	122
Figura V.13. Estimación total de los costos equivalentes para cada fase del pozo RR-1X	129
Figura VI.1. Estimación de Costos para la Fase I	135
Figura VI.2. Estimación de Costos para la Fase II.....	140
Figura VI.3. Estimación de Costos para la Fase III	143
Figura VI.4. Estimación de Costos para la Fase IV	149
Figura VI.5. Estimación de Costos para la Fase V	154
Figura VI.6. Estimación de Costos para la Fase VI	158

INTRODUCCIÓN

La actividad petrolera en aguas profundas se inicia aproximadamente hace cuatro décadas, la cual ha ido evolucionando e incrementando los niveles de complejidad, no solo por las condiciones hostiles, sino también por las extensas columnas de aguas, permitiendo a la industria petrolera un notable crecimiento tecnológico en ambientes de aguas Ultra-profundas, debido a que gran parte de las futuras reservas de petróleo del mundo se encuentran debajo de los océanos. Por esto, las compañías de servicios crean grandes proyectos de exploración y producción, donde equipos multidisciplinarios comprendidos por; Geocientíficos e Ingenieros cumplen una ardua tarea de investigación, con la finalidad de extraer los potenciales recursos de hidrocarburos y de esta manera abastecer el mercado mundial.

La principal empresa estatal de país Petróleos de Venezuela S.A., se encuentra actualmente apuntando hacia este tipo de exploración. En esta ocasión realizará la primera perforación de un pozo exploratorio “*WildCat*” en aguas Ultra-profundas localizado en una zona remota en el Golfo de México, este proyecto se logró por medio de acuerdos internacionales con países aliados y su debida licitación para la exploración del campo.

La perforación y construcción del pozo exploratorio va a depender de muchos parámetros, uno de ellos y de vital importancia es la cementación, por tal motivo al momento de diseñar y cementar el pozo se debe tomar en cuenta las nuevas técnicas, así como las mejores prácticas operacionales dirigidas al proceso de cementación. Esto permitirá una excelente base y soporte de las fuerzas axiales ejercidas por las columnas de fluido y el peso de las tuberías de revestimiento, a su vez proporcionará un aislamiento zonal entre la formación y la tubería, no solo al momento de la perforación y producción sino más allá del fin de la vida productiva del pozo.

Sin embargo la capacidad para hacerlo dependerá de la selección y colocación correcta de la lechada de cemento, su comportamiento mecánico y de las condiciones de esfuerzo presentes en el pozo.

De acuerdo a lo planteado anteriormente este Trabajo Especial de Grado reviste fundamental importancia teniendo como propósito principal, crear una propuesta técnica de cementación para la construcción del pozo exploratorio en aguas Ultra-profunda en el Golfo de México, tomando en cuenta todos los niveles de complejidad que se pueden presentar durante la cementación.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Petróleos de Venezuela S.A., en conjunto a su filial PDVSA Servicios Petroleros S.A., se encuentran planificando la perforación de un pozo exploratorio, localizado en aguas Ultra-profundas en el Golfo de México. Proyecto que iniciara para el 2do semestre del 2012.

PDVSA comprende los grandes retos que significa este tipo de exploración, no solo por los niveles de complejidad, sino también por la estrictas norman ambientales existentes en la zona del Golfo de México, debido al accidente ocurrido en el pozo Macondo, que produjo el hundimiento de la plataforma *Deepwater Horizon* y el derrame de millones de hidrocarburos a la costas de Luisiana, EUA, ocasionando unos de los desastres ecológicos y derrames de petróleo más grandes en la historia del mundo; donde una de las posibles causas del accidente, según la empresa operadora de la plataforma *British Petroleum* (BP), fue una deficiente técnica de cementación en el *liner* de producción.

Es por ello, que la cementación es un trabajo de suma importancia, durante las actividades de construcción de pozos en aguas Ultra-profundas, donde se presentan diversos problemas operacionales asociados a las grandes columnas de aguas, altas presiones, bajas temperatura, arenas poco consolidadas, influjo de gas o agua en zonas poco profundas, adicionalmente las estrechas presiones de poro y facturas que son propensas a encontrarse en este tipo de ambientes. Una excelente cementación es

fundamental, ya que permitirá crear un aislamiento zonal durante toda la vida productiva del pozo hasta el fin de la misma.

De acuerdo a las circunstancias antes expuestas, y debido a que es el primer pozo en ambientes de aguas Ultra-profundas internacionales, surge la necesidad de conocer entre otros aspectos el proceso de cementación para esta tipo de pozos, desde la metodología para la aplicación del mismo hasta los materiales y recursos necesarios, para de esta manera contribuir a la culminación exitosa del pozo.

I.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.2.1. Objetivo General

Formular una propuesta técnica de cementación para la construcción de un pozo exploratorio en aguas Ultra-profundas en el Golfo de México.

I.2.2. Objetivos Específicos

1. Recopilar y revisar la información necesaria para respaldar las bases teóricas de la investigación que concierne a la cementación de pozos en aguas Ultra-profundas en el Golfo de México.
2. Plantear las posibles lechadas de cemento y calcular los respectivos volúmenes que van a ser implementado para cada sección del pozo exploratorio.

3. Evaluar los parámetros operacionales y requerimientos del pozo exploratorio para una eficiente cementación, por medio de la aplicación de un software de cementación (*OptiCem*).
4. Formular y Evaluar propuesta de cementación para la construcción del pozo exploratorio en aguas Ultra-profundas en el Golfo de México.
5. Estimar los costos operacionales para la cementación del pozo exploratorios en aguas Ultra-profundas.

I.3. ALCANCE, JUSTIFICACIÓN Y LIMITACIONES

I.3.1. Alcance

Con el desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado se podrá formular una propuesta técnica de cementación, para la construcción de un pozo exploratorio “*WildCat*”, en aguas Ultra-profundas en el Golfo de México, para lograr, la formulación de la misma se tomaran en cuenta las posibles características litoestratigráficas de las formaciones, presión de poro, gradiente de fractura, temperatura y la arquitectura del pozo.

I.3.2. Justificación

Para Petróleos de Venezuela S.A., todo proyecto y acuerdos bilaterales con países hermanos, son de suma importancia, permitiendo a ambos países mejorar en ámbitos sociales y económicos. Por esto, PDVSA y su filial PDVSA Servicios Petroleros

S.A., cumplen una ardua tarea de encontrar yacimientos de hidrocarburos más allá de nuestras fronteras. Donde por primera vez PDVSA perforará un pozo exploratorio “*WildCat*”, en aguas Ultra-profunda en el Golfo de México.

Durante la construcción de un pozo de petróleo en este tipo de ambientes los procesos de revestimiento y cementación son de vital importancia para el mismo, dado que, una deficiente selección de la lechada y fallas en los cálculos de las mismas traerían drásticas consecuencias. Para evitarlo, se debe realizar una excelente cementación, y de esta manera asegurar las tuberías de revestimiento en el hoyo para proporcionar un aislamiento zonal durante toda la vida productiva del pozo, minimizando problemas operacionales; tales como incremento de los costos, riesgos hacia el ambiente y la posible pérdida total del pozo.

En vista a lo planteado anteriormente este trabajo de investigación tiene como propósito fundamental, crear una propuesta técnica de cementación para la construcción de un pozo exploratorio en el Golfo de México. Es importante destacar que por ser el primer pozo exploratorio en la zona, no se cuenta con información de pozos vecinos, aunque el presente estudio puede servir de aporte a futuras investigaciones referidas a este tema.

I.3.3. Limitaciones

1. Restricción de información debido a la confidencialidad del proyecto.
2. Por ser el primer pozo exploratorio “*WildCat*” en la zona no se cuenta con la suficiente información y antecedentes de pozos vecinos.

3. Los aditivos y cementos de última generación no serán utilizados en la cementación, debido a que el acceso de los mismos está restringido a la localización donde se realizara la perforación del pozo exploratorio.
4. Diseño y evaluación de las lechadas de cemento, debido a que las pruebas de laboratorio no serán realizadas en Venezuela.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. CEMENTACIÓN [1, 2, 3, 4]

La cementación es un proceso que consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua, para formar una lechada que es bombeada al pozo, a través de la sarta de revestimiento y colocarlo en el espacio anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor.

El volumen a bombear es predeterminado para alcanzar las zonas críticas (alrededor del fondo de la zapata, espacio anular, formación permeable, hoyo desnudo, entre otros). Luego se deja fraguar y endurecer, formando una barrera permanente e impermeable que impide el movimiento de los fluidos detrás del revestidor. La realización de un trabajo de cementación satisfactorio es la fase más importante en la vida de un pozo, ya sea para completarlo o abandonarlo; es por ello que deben conocerse los requerimientos técnicos y operacionales para lograr los objetivos, para los cuales ha sido diseñado el cemento.

El primer tipo de cemento usado en un pozo petrolero fue llamado cemento Portland, creado por los constructores ingleses Joseph Aspdin y James Parker, para el año de 1824. El cemento Portland, es una mezcla de caliza u otros materiales con alto contenidos de carbonato de calcio, hierro, sílice y arcilla, que al entrar en contacto con el agua forman un cuerpo solidó, siendo un material cementante disponible universalmente.

El cemento Portland es, además, el ejemplo típico de un cemento hidráulico; fragua y desarrolla resistencia a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento.

Por definición, el cemento Portland es el que proviene de la pulverización del clinker obtenido por fusión incipiente de materiales arcillosos y calizos, que contengan óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro en cantidades convenientemente dosificadas y sin más adición posterior que yeso sin calcinar, así como otros materiales que no excedan del 1% del peso total y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento.

Los principales constituyentes del clinker del cemento Pórtland, pueden ser observados en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Formulación Química del Cemento ^[3]. (Modificado por Rodríguez)

Formulación Química de los Cementos Portland			
Fase Componente	Fórmula	Designación	[%]
Silicato Tri-cálcico (Alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_3$	C_3S	50
Silicato Di-cálcico (Belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	25
Aluminato Tri-cálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	10
Ferro aluminato Tetra-cálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_2 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	10
Otros Óxidos	-	-	5

II.2. PRINCIPALES PROPÓSITOS DE LA CEMENTACIÓN ^[2, 5]

La cementación tiene gran importancia durante toda la vida productiva del pozo, ya que los trabajos de una buena completación dependen directamente de una buena cementación. El diseño de la misma cuenta con características físicas y químicas que permitirá el adecuado cumplimiento de sus funciones, las cuales serán mencionadas a continuación:

- Proteger y asegurar la tubería de revestimiento en el hoyo.
- Aislar zonas de diferentes fluidos.
- Aislar zonas de agua superficial y evitar la contaminación de la misma por el fluido de perforación o por los fluidos del pozo.
- Evitar o resolver problemas de pérdida de circulación y pega de tubería.
- Reparar pozos por problemas de canalización de fluidos.
- Reparar fugas en el revestidor.
- Proteger la tubería de revestimiento de la corrosión.
- Soportar el revestidor y todo el peso de los equipos.

II.3. TIPOS DE CEMENTACIÓN ^[2, 6]

Existen dos tipos de cementación de pozos; la cementación primaria que se utiliza principalmente para formar un sello hidráulico entre la formación y la tubería de revestimiento y la cementación secundaria que se utiliza básicamente para reparar cualquier deficiencia en la cementación primaria.

II.3.1. Cementación Primaria

Es el proceso que consiste en colocar el cemento en el espacio anular, entre las tuberías de revestimiento y la formación expuesta del hoyo, asegurando un sello completo y permanente (ver Fig. II.1). Entre los objetivos principales de esta cementación se pueden mencionar los siguientes:

- Adherir y fijar las sartas de revestimiento.
- Soportar el peso de las tuberías de revestimiento.
- Proporcionar aislamiento entre las zonas del pozo que contiene gas, petróleo y agua.
- Restringir el movimiento de los fluidos entre las formaciones productoras y el confinamiento de los estratos acuíferos.
- Reducir el proceso corrosivo de las tuberías de revestimiento con los fluidos del pozo.
- Reforzar las sartas contra el aplastamiento debido a las fuerzas externas.
- Reforzar la resistencia de las sartas a presiones de estallido.
- Proteger las sartas durante los trabajos de cañoneo (completación).
- Sellar la pérdida de circulación en zonas “ladronas”.

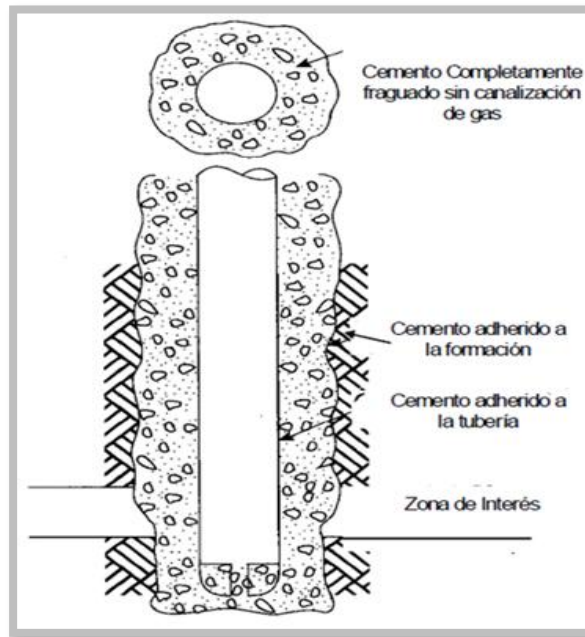


Fig. II.1. Cementación Primaria ^[6]. (Modificado por Rodríguez)

II.3.2. Cementación Secundaria ^[6, 7]

Es el proceso que consiste en inyectar cemento a presiones a través de ranuras en la tubería de revestimiento al espacio anular. Este tipo de cementación se realiza principalmente en reparaciones, rehabilitaciones o en tareas de terminación de pozos.

Ésta es una medida correctiva a una cementación primaria defectuosa. Adicionalmente, se emplea en prácticas de abandono de pozos, con la finalidad de aislar permanentemente formaciones atravesadas ó realizar desviaciones en un hoyo.

Razones para la aplicación un trabajo de cementación secundaria:

- Reparar trabajo de cementación primaria deficiente, que falló debido a canalización del cemento detrás de la tubería de revestimiento o por la altura insuficiente del tope de cemento en el anular.
- Eliminar la entrada de agua por encima, por de bajo o en la zona de producción de hidrocarburos.
- Reducir la producción gas/petróleo (GOR), mediante el aislamiento de las zonas de gas de intervalos adyacentes de petróleo.
- Reparación de las fugas del revestidor debido a la corrosión y división de tuberías.
- Abandonar una zona no productiva o agotada.
- Conectar una o más zonas en una multi-zona de inyección con el fin de dirigir la inyección en los intervalos deseados.
- Sellar zonas de pérdida de circulación.
- Proteger contra la migración de fluidos en una zona de producción.

Existen dos tipos de cementación secundaria las cuales difieren en el diseño y propósito para los cuales fueron destinadas: la cementación forzada y la colocación de tapones de cemento.

II.3.2.1. Cementación Forzada ^[2]

Es una técnica que consiste en colocar la lechada de cemento frente a una formación permeable, a través de las perforaciones, aplicando un diferencial de presión capaz de forzar la mezcla y provocar la deshidratación de la misma, en consecuencia se genera un revoque de cemento impermeable capaz de bloquear las vías de flujo que permiten el acceso de los fluidos al pozo (ver Fig. II.2).

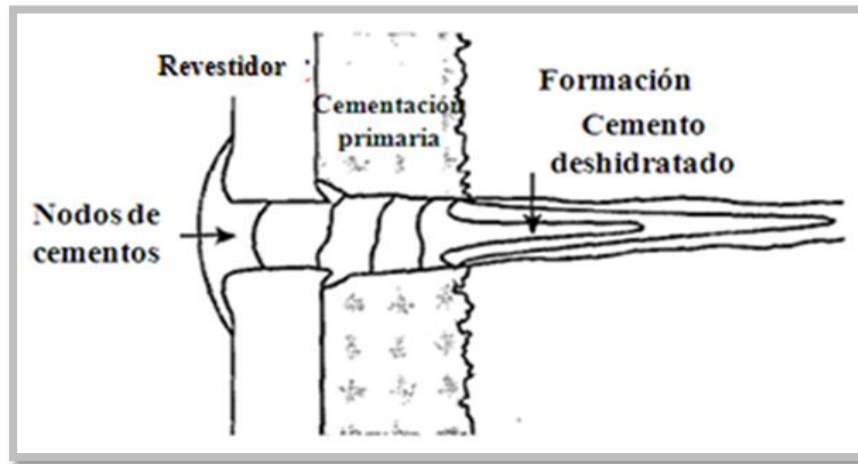


Fig. II.2. Cementación Forzada ^[7]. (Modificado por Rodríguez)

La lechada de cemento ideal para un trabajo de cementación forzada, debería ajustarse de tal manera que controle la tasa de formación del revoque, permita un recubrimiento uniforme a lo largo de la cara de la formación y sólo deje pequeños nodos de revoque dentro del revestidor.

II.3.2.2. Colocación de Tapones de Cemento

Es un técnica que consiste en colocar cierta volumen de lechada de cemento, en el agujero o el interior de la tubería de revestimiento, con la finalidad de taponar una zona del pozo, desviar trayectoria, resolver problemas de pérdida de circulación en la etapa de perforación, proporcionar un amarre en la prueba del pozo y para taponar el pozo en caso de abandono.

II.4. TIPOS DE CEMENTOS ^[2, 6]

El uso de cemento Portland en pozos de gas y de petróleo antes de los años 1.950 estuvo dirigido principalmente a tres tipos de cemento, estos cementos fueron clasificados por el API como A, B y C, exclusivamente para pozos someros con temperaturas y presiones de bajas a moderadas. Sin embargo, existían otros tipos de cemento Portland manufacturados con retardadores que estuvieron disponibles para pozos más profundos con temperaturas y presiones más altas. Estos últimos son conocidos como cementos de fraguado lento y fueron clasificados por API como cementos clase D, E y F.

Particularmente los cementos de fraguado lento presentaron problemas de incompatibilidad con algunos aditivos químicos y adicionalmente no estaban siempre disponibles para las compañías de servicio, por lo que el Instituto Americano del Petróleo se vio en la necesidad de incorporar al mercado de cementación de pozos dos tipos básicos de cemento los cuales pudieran ser manufacturados sin aditivos a excepción del yeso y estos serían compatibles con muchos de los aditivos de las compañías de servicio. Estos cementos son conocidos como cementos clase G y H.

Las Normas API se refieren a clase de cemento; las Normas ASTM a tipo de cemento:

Cemento Clase A o tipo I: Diseñado para emplearse a 6.000 pies de profundidad como máximo, donde no se requiere de propiedades especiales. Disponible únicamente en el tipo ordinario el cemento clase A es similar al ASTM C 150, Tipo I ^[7].

Cemento Clase B o tipo II: Diseñado para ser usado desde superficie hasta una profundidad de 6.000 pies, cuando las condiciones requieren de moderada a alta

resistencia a los sulfatos. Se encuentra disponible en ambos tipos, moderada y alta resistencia a los sulfatos. El cemento clase B es similar al ASTM C150, Tipo II ^[7].

Cemento Clase C o tipo III: Diseñado para ser usado desde superficie hasta una profundidad de 6.000 pies, cuando las condiciones requieren alta resistencia inicial. Se encuentra disponible en el tipo ordinario, moderada y alta resistencia a los sulfatos. El cemento clase C es similar al ASTM C 150, Tipo III ^[7].

Cemento Clase D: Diseñado para ser usado desde una profundidad de 6.000 pies hasta 10.000 pies, en condiciones moderadamente alta de presión y temperatura. Se encuentra disponible en los tipos de resistencia a los sulfatos de moderada a alta ^[7].

Cemento Clase E: Diseñado para ser usado desde una profundidad de 10.000 pies hasta 14.000 pies, para condiciones de alta presión y temperatura. Se encuentra disponible en los tipos de resistencia a los sulfatos moderada y alta ^[7].

Cemento Clase F: Diseñado para ser usado desde una profundidad de 10.000 pies hasta 16.000 pies, para condiciones extremadamente alta de presión y temperatura. Se encuentra disponible en los tipos de resistencia a los sulfatos moderada y alta ^[7].

Cemento Clase G: Es usado como un cemento básico desde la superficie hasta 8.000 pies de profundidad, puede ser usado con químicos aceleradores o retardadores para cubrir una amplia gama de temperaturas o profundidades. Durante la fabricación del cemento no se debe mezclar o agregar ningún aditivo al cemento crudo (clinker) a excepción del sulfato de calcio (CaSO_4) o agua ó una combinación de ambos. Se encuentra disponible en los tipos de resistencia a los sulfatos moderada y alta ^[2].

Cemento Clase H: Es usado como un cemento básico desde la superficie hasta 8.000 pies de profundidad, puede ser usado con químicos aceleradores y retardadores

para cubrir una amplia gama de temperaturas y profundidades. Generalmente no se agrega ningún aditivo al cemento crudo durante su fabricación, a excepción del sulfato de calcio o agua, o una combinación de ambos. Se encuentra disponible en los tipos de resistencia a los sulfatos moderada y alta ^[2].

Tabla II.2. Clasificación API del Cemento ^[9]. (Modificado por Rodríguez)

Clase API	Mezcla de Agua [gal/sc]	Densidad de Lechada [lb/gal]	Profundidad [pies]	Temperatura [°F]
A	5,2	15,6	0 – 6.000	80 – 170
B	5,2	15,6	0 – 6.000	80 – 170
C	6,3	14,8	0 – 6.000	80 – 170
D	4,3	16,4	6.000 – 10.000	170 – 230
E	4,3	16,4	6.000 – 14.000	170 -290
F	4,3	16,4	10.000 – 16.000	230 – 320
G	5,0	15,8	0 – 8.000	80 – 200
H	4,3	16,4	0 – 8.000	80 – 200

II.5. CEMENTOS ESPECIALES ^[8]

Son aquellas tecnologías de cementación utilizadas para resolver los problemas de pérdida de circulación, micro anillos, cementación en ambiente corrosivo, altas temperaturas y migración de gas, entre ellos tenemos: micro cementos, cementos tixotrópicos y cemento espumado.

II.5.1. Micro Cementos

Es una tecnología desarrollada para resolver los problemas de cementación primaria, donde se requiere alta resistencia con baja densidad, para taponar zonas de pérdida de circulación o micro anillos por donde el cemento normal no puede circular. La composición de este cemento es igual a la del cemento Portland y se diferencia en el tamaño de partículas, el cual es de 10 milésima de milímetro en promedio, siendo éste 10 veces menor que el cemento clase “A” API.

II.5.2. Cementos Tixotrópicos

En términos prácticos, las lechadas de cemento tixotrópico son dispersas y fluidas durante el mezclado, bombeo y desplazamiento; pero forma una estructura rígida cuando el bombeo se detiene. Una vez que la agitación continua, la estructura se rompe y la lechada adquiere nuevamente las propiedades de fluidez. Al igual que los micro cementos, los tixotrópicos son usados para cementar formaciones con problemas de pérdida de circulación, sin embargo por su propiedad gelificante son ideales para zonas cavernosas y formaciones de fácil fracturas.

Otro uso de los cementos tixotrópicos incluyen: reparación y corrección de revestidores; en zonas donde se requiere que la lechada sea inmóvil rápidamente y para prevenir migraciones de gas. Una de las posibles desventajas de los cementos tixotrópicos se basa en los cambios de sus propiedades de bombeabilidad. Después de cada periodo estático, la resistencia y el punto cedente tienden a incrementar.

II.5.3. Cementos Espumantes

Son empleados para aislar las formaciones con bajo gradiente de fractura. Especialmente, aquellos donde se requieren densidades menores de 11 lb/gal. Estos cementos se caracterizan por su alta resistencia a la compresión, lo cual causa menor daño a la formación sensible al agua, pueden reducir los cambios de flujo en el espacio anular, y permite la cementación en zona de pérdida total de circulación.

II.6. CLASIFICACIÓN DE LOS ADITIVOS DE CEMENTOS ^[2, 3, 9]

La mayoría de las lechadas de cemento que contienen aditivos, van a modificar sus propiedades físicas y químicas con la finalidad de producir un trabajo de cementación óptimo de acuerdo a las necesidades de trabajo. Muchos de los aditivos son conocidos por ciertos nombres comerciales utilizados por diversas empresas de servicios.

Los aditivos son utilizados para cumplir las siguientes funciones:

- Variar la densidad de la lechada de cemento.
- Cambiar la resistencia a la compresión.
- Acelerar o Retardar el tiempo de fraguado.
- Reducir la viscosidad de suspensión.

La selección de los aditivos se realiza de acuerdo a su funcionalidad química y física, temperatura de trabajo y presiones a las cuales estará expuesto el cemento durante la vida útil del pozo. Actualmente se disponen una amplia gama de aditivos en el mercado que se utilizan con el cemento API, para conseguir las características

óptimas de una lechada de cemento a cualquier condición del pozo. Estos aditivos pueden ser adquiridos en forma sólida o líquida, y pueden ser distinguidos en las siguientes categorías:

II.6.1. Aceleradores ^[2, 7, 9]

Son productos químicos que reducen el tiempo de fraguado de un sistema de cemento, y aumentar la tasa de desarrollo de resistencia a la compresión. Ellos son comúnmente utilizados para proporcionar una mayor resistencia a bajas temperaturas y para contrarrestar los efectos de retardo de otros aditivos. Los aceleradores también acortar el tiempo de espesamiento.

Los más utilizados para los cementos Portland son las sales orgánicas, entre ellas los cloruros son los más conocidos, especialmente, el cloruro de calcio (CaCl_2). Otras sales utilizadas son el silicato de sodio (Na_2SiO_3), el cloruro de sodio (NaCl), el ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$), los aluminatos, los nitratos, los sulfatos, las bases alcalinas y los hidróxidos de amonio.

II.6.2. Retardadores ^[10]

Son aditivos que se utilizan para aumentar el tiempo de espesamiento de las lechadas de cemento, prolongando el tiempo de bombeabilidad de la misma. Estos aditivos no reducen el valor máximo de resistencia a la compresión que puede desarrollar el cemento, pero disminuyen la velocidad de desarrollo de ella.

Los retardadores más comúnmente usados son los lignosulfonatos y los azúcares. Los lignosulfonatos son normalmente utilizados cuando se trabaja con temperaturas

superiores a 200°F. Los compuestos azucarados se usan con temperaturas más elevadas, que varían entre 200 y 350°F.

II.6.3. Extendedores ^[2, 7, 11]

Son materiales que reducen la densidad de un sistema de cemento, es decir, reduce la cantidad de cemento por unidad de volumen del producto. Una lechada más liviana, permite disminuir la presión hidrostática y ayuda a evitar daños a la formación por pérdidas, previniendo pérdidas de circulación causadas por zonas permeables y fracturas.

Los extensores son utilizados para los siguientes usos:

1. Reducir la densidad de la suspensión.
2. Aumentar el rendimiento lechada.
3. Extensiones de agua.
4. Baja densidad de los agregados.
5. Extensores gaseosos.

Cuando son agregados en la mezcla pueden llegar a generar densidades entre 11,9 y 13,7 lb/gal, e incluso de 10,8 lb/gal lo cuales se consideran valores bajos. Adicionalmente aumentan el rendimiento de la lechada al reducir la cantidad de cemento necesaria para producir un volumen específico de mezcla, disminuyendo los costos asociados con las operaciones de cementación del pozo. Entre los más usados se tienen: bentonita, silicato de sodio (Na_2SiO_3), materiales pozzolámicos, entre otros. De acuerdo a las características de la lechada que se desee emplear en la cementación del pozo, se pueden utilizar los siguientes extendedores:

II.6.3.1. Extendedores acuosos

Estos permiten añadir excesos de agua para alcanzar grandes volúmenes de mezcla manteniendo una lechada homogénea y evitando el desarrollo excesivo del fluido libre. Las arcillas son un ejemplo de este tipo de aditivos.

II.6.3.2. Extendedores con agregados de baja densidad

Se encargan de reducir la densidad de la lechada de cemento cuando son añadidos en grandes cantidades a la mezcla.

II.6.3.3. Extendedores gaseosos

Se usan para obtener densidades considerablemente bajas en la lechada y aún así permitir que se desarrolle una buena resistencia a la compresión del cemento. El nitrógeno y el aire son los más usados específicamente en cementos espumantes y cementos livianos.

II.6.4. Densificantes ^[2, 12]

Se usan para aumentar la densidad de la lechada de cemento cuando se requieren altas presiones hidrostáticas que controlen las presiones anormales en la formación y los hoyos inestables. En estos casos, generalmente se requieren lechadas de densidad igual o superior a 18 lb/gal. La barita es uno de los densificantes más usados debido a su bajo requerimiento de agua. También se usa la ilmenita, la hematita, los óxidos y las sales.

II.6.5. Dispersantes ^[2, 5]

Son materiales que reducen la viscosidad de la lechada de cemento y ajustan las propiedades reológicas hasta valores aceptables para el desplazamiento de la mezcla. El mecanismo de acción de este aditivo se basa en reducir la repulsión electrostática entre los granos de cemento, es decir, alteración de las cargas superficiales de las partículas para evitar la asociación entre ellas; permitiendo obtener las propiedades reológicas deseadas en la lechada.

Se agregan al cemento para proveer propiedades de flujo y permitir el bombeo de la lechada de cemento en flujo turbulento a menor caudal, minimizando así los requerimientos de potencia hidráulica. Disminuyen la viscosidad, bajan el punto cedente y la resistencia de gel, entre ellos se tienen: Polímeros de cadena larga, Lignosulfonato de Calcio y Cloruro de Sodio, Hidoxalatos Polisacáridos

II.6.6. Controladores de Pérdida de Circulación ^[2, 12]

La pérdida de circulación durante los trabajos de cementación primaria es un problema serio que generalmente, sino se trata a tiempo podría ocasionar severos daños durante la construcción de pozo e incluso la pérdida total del mismo.

Los aditivos controladores de pérdida de circulación son agentes que permiten minimizar la pérdida de la lechada hacia formaciones débiles reduciendo de una u otra forma la permeabilidad de las zonas al actuar como un tapón capaz de bloquear los espacios intersticiales que se encuentran en las zonas altamente fracturadas (donde ocurre generalmente la pérdida) y en las formaciones cavernosas. Estos aditivos prevén la deshidratación prematura de la lechada de cemento donde los principales

agentes controladores de pérdida de circulación son: polímeros orgánicos, reductores de fricción entre otros y su uso dependerá de la severidad del problema.

II.6.7. Controladores de Migración de Gas ^[13]

Los aditivos antimigratorios de gas se basan en impartir a la lechada propiedades reológicas, especialmente alta resistencia de gel, control de pérdida de filtrado, cero agua libre y tiempo de transición corto en la etapa plástica de fraguado. Los problemas de migración del gas en el cemento son causados por:

- Bajo tiempo de transición.
- Excesivo fluido libre en la lechada.
- Segregación de las partículas.
- Pobre remoción del lodo.

Para contrarrestar estos percances, se utilizan los siguientes aditivos: polímero de alto peso molecular, polvo de sílice combinado con polímero, mezcla de polímeros, látex, carbón molido vegetal, entre otros.

II.6.8. Aditivos Especiales ^[2]

Existen muchos aditivos especiales que se pueden agregar a la lechada de cemento para controlar propiedades especiales. Entre los más usados se tienen; antiespumantes, antimigratorios y agentes que previenen la retrogresión de la resistencia.

II.6.8.1. Antiespumantes

Algunos aditivos pueden causar la formación de espuma en la lechada durante el proceso de mezclado ocasionando consecuencias indeseables. La presencia excesiva de espuma puede causar algunas consecuencias indeseables como disminución de la densidad de la lechada y cavitaciones en el equipo de bombeo. Para evitar que esto suceda se agregan materiales antiespumantes que se encargan de reducir el atrapamiento de aire mediante un cambio en la tensión superficial, eliminando así las condiciones en la mezcla que pudiesen generar la formación de espuma en el sistema.

II.6.8.2. Antimigratorios

Evitan la entrada de agua y gas a la lechada de cemento al actuar como una barrera protectora que impide el paso de cualquier fluido presente en la formación. Generalmente se utilizan cuando se sospecha la presencia de gases en la formación, ya que estos fluidos pueden invadir la mezcla y entrar al espacio anular creando canales en la matriz del cemento que le permiten migrar hacia la superficie u otra formación. Los más usados son los aditivos poliméricos.

II.6.8.3. Agentes que previenen la retrogresión a la resistencia

Estos aditivos evitan que el cemento pierda la resistencia a la compresión una vez colocado en el pozo y transcurridos varios días; permitiendo que sus propiedades se mantengan inalteradas, es decir, evitando su retrogresión.

El fenómeno de retrogresión puede llegar al punto de debilitar la dureza del cemento especialmente si la temperatura se incrementa. La debilidad en la fuerza del cemento se debe a que el componente principal encargado de la dureza (silicato cálcico hidratado), se convierte en silicato di cálcico hidratado. Este nuevo compuesto aumenta el volumen poroso del cemento por lo que es más propenso a ser atacado por los fluidos corrosivos.

II.7. LECHADA DE CEMENTO ^[2]

Es un fluido que resulta de mezclar agua y aditivos químicos al cemento seco o a mezclas de cementos en diferentes proporciones con el objetivo de ser bombeada al espacio anular entre la formación y el revestidor. Después que se ha desplazado el volumen de mezcla necesario para cubrir el espacio anular, la lechada de cemento tiene la propiedad de endurecer o fraguar formando una matriz de cemento sólida y resistente a las condiciones de presión y temperatura a las cuales está expuesta.

Una buena lechada de cemento debe reunir las siguientes características:

- Baja pérdida de fluido durante el proceso de colocación en el espacio anular y después del fraguado.
- Reología adecuada a las características de cada pozo en particular.
- Corto tiempo de transición, para evitar la migración de fluidos a través de la ella, ya que durante este período la mezcla pierde presión hidrostática para convertirse en sólida.
- Densidad adecuada para cada tipo de pozo.
- Estabilidad para conocer las condiciones de presión y temperatura una vez que ha sido colocada en el espacio anular.

II.7.1. Tipos de Lechadas de Cementos

En la cementación de pozos puede surgir la necesidad de colocar distintas lechadas de cemento para cubrir la formación; sin embargo en algunos casos es posible colocar un solo tipo de lechada ya que las características de la formación así lo permiten. En general se distinguen dos tipos de lechada de cemento; lechada de cola y lechada de relleno o llenado.

II.7.1.1. Lechada de cola

Es la última lechada que se bombeará en el hoyo. Esto es recomendable puesto que se podrá colocar una lechada de cemento de alta calidad a través del intervalo productor.

II.7.1.2. Lechada de relleno

Se usa para llenar el espacio anular por encima de la lechada de cola. Como este tipo de lechada es de menor densidad, se usa también para reducir la presión hidrostática en una formación débil, ya que una de mayor peso podría fracturarla.

II.8. PREPARACIÓN DEL POZO PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA LECHADA DE CEMENTO ^[2, 14]

Durante los pasos previos a la cementación de una tubería de revestimiento, se bombea una serie de fluidos por el diámetro interno del revestidor para desplazar el fluido de perforación del interior de la misma y del espacio anular existente entre la tubería de revestimiento y la formación.

El desplazamiento de la lechada de cemento hacia el pozo es un procedimiento que involucra algunas técnicas especiales que al ser usadas en combinación, generando efectos positivos en la cementación del pozo. El objetivo de este procedimiento es desplazar todo el fluido de perforación que se encuentra en el pozo para permitir un efectivo aislamiento zonal, obteniendo un sello hidráulico entre revestidor-cemento y cemento-formación mientras se eliminan canales de gas o fluido de perforación en la matriz del cemento.

El régimen de flujo utilizado en el desplazamiento de la lechada de cemento es controlado para permitir la máxima eficiencia de remoción del fluido de perforación en el pozo. Esto se logra mejor, con flujo turbulento a una velocidad máxima en el anular de 300 pies/min si es posible, o con flujo tapón a una velocidad menor a 30 pies/min, sino se logra el flujo turbulento. También se puede emplear flujo laminar, donde las partículas de lodo tienden acumularse cerca de las paredes del pozo, lo cual dificultaría la limpieza del mismo (ver Fig. II.3).

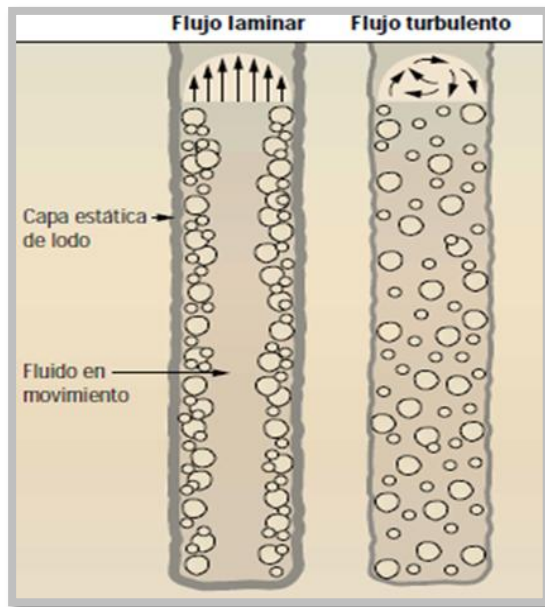


Fig. II.3. Régimen de Flujo ^[14].

Para lograr una buena cementación es necesario que el cemento tenga una buena adherencia con el revestimiento y la formación. Por ello, se deben reducir al mínimo las fallas durante el desplazamiento de la lechada hacia el pozo realizando algunos trabajos que permitirán acondicionar el hoyo:

II.8.1. Diseño de Pre-flujos

El primer paso en la preparación del pozo es lograr la remoción del fluido de perforación que se encuentra en el hoyo y dejar las paredes de la formación receptivas al contacto con el cemento.

En muchas ocasiones el fluido de perforación y la lechada de cemento son incompatibles. Cuando esta situación ocurre la mezcla de cemento, tiende a canalizar a través de una masa viscosa formada en la interface de los fluidos, dejando parches de fluido contaminado en las paredes de la formación y el revestidor. Generalmente la lechada de cemento y el fluido de perforación son mezclas muy viscosas que pueden generar grandes caídas de presión por fricción, poniendo en riesgo la integridad del trabajo al existir la posibilidad de fracturar la formación o taponar por completo el espacio anular.

Para evitar tales problemas se deben diseñar fluidos compatibles con la lechada de cemento y el fluido de perforación, cuyas propiedades físicas y químicas permitan desplazar la lechada de cemento hacia el espacio anular y la circulación del fluido de perforación. Estos fluidos se conocen como Pre-flujos y son bombeados al pozo antes de introducir la lechada de cemento para eliminar el fluido de perforación del revestidor y la formación. Los Pre-flujos se clasifican según su formulación en lavadores químicos y espaciadores.

II.8.1.1. Lavadores Químicos

Los lavadores son adelgazadores del fluido de perforación de fácil dispersión en el agua, los cuales permiten remover el fluido de perforación de las paredes del hoyo. En la mayoría de los casos están compuestos por surfactantes, los cuales modifican la tensión interfacial entre los sólidos y el agua o aceite, dejando las paredes de la formación humectadas permitiendo que el cemento no se contamine con el fluido de perforación al llegar a dichas superficies. De esta manera se logra una mejor adherencia del cemento a la formación, evitando problemas futuros de canalización de fluidos.

Los lavadores químicos son fabricados para diluir cualquier tipo de fluido de perforación que se encuentre en el pozo, bien sea fluido base agua o base aceite. Se recomienda utilizar un mínimo de 500 pies, de columna en el anular ó 10 minutos de tiempo de contacto con la formación para obtener una aceptable remoción del revoque.

Debido a su viscosidad relativamente baja el régimen de flujo turbulento permite desplazarlos de manera eficiente, lo que permite obtener mayor limpieza y barrido en las paredes del revestidor.

II.8.1.2. Espaciadores

Son fluidos que se encargan de separar la lechada de cemento y el fluido de perforación con la finalidad de evitar la contaminación entre ambos y facilitar el proceso de desplazamiento de la lechada de cemento hacia el espacio anular. Para lograr los objetivos, para los cuales han sido diseñados, es necesario que exista compatibilidad química del espaciador con el fluido de perforación y la lechada, ya

que estos serán bombeados en el siguiente orden: fluido de perforación/espaciador/lechada de cemento.

El diseño más simple de un espaciador es una mezcla con baja densidad y pérdida de filtrado que puede ser bombeada en flujo turbulento; sin embargo, el principal problema de estos espaciadores es que pueden ser incompatibles con el fluido de perforación. Es por ello, que es generalmente aceptado, que el mejor espaciador es aquel que posee una densidad mayor a la del fluido de perforación y menor a la densidad de la lechada. Para ajustar estas densidades es necesario implementar agentes densificantes. Adicionalmente se incluyen viscosificantes para lograr la suspensión efectiva de estos agentes.

II.8.2. Movimiento de la Tubería de Revestimiento

Después acondicionar el fluido de perforación mediante lavadores y espaciadores, es necesario mover, hacer girar y reciprocarse la tubería de revestimiento, durante la cementación del pozo. El movimiento de la tubería durante la colocación de la lechada de cemento ayuda a remover el fluido de perforación que posiblemente se encuentra atrapado en las zonas más angostas del espacio anular. Existen dos tipos de movimiento de tubería, el de rotación y el reciprocante.

El movimiento de rotación es aparentemente más efectivo cuando la tubería está seriamente descentralizada y se realiza a una velocidad de 15 a 20 RPM. Durante este proceso las fuerzas de arrastre entre tubería/fluido de perforación y tubería/cemento actúan empujando la lechada de cemento a través del fluido de perforación gelificado.

Las desventajas más importantes de este movimiento son las siguientes:

- La tubería de revestimiento requiere un cabezal de cementación especial.
- Para pozos profundos con largas tuberías de revestimiento se requiere aplicar una cantidad de torque adicional a la tubería lo cual puede llegar a torcerla considerablemente.

El movimiento reciprocante por su parte, es mejor cuando la tubería está centralizada y debe realizarse de 15 a 20 pies por cada minuto. Este movimiento provee fuerzas de arrastre lineal debido al efecto de empujar y halar la tubería de revestimiento que ayudan a romper los esfuerzos de gel del fluido de perforación.

II.8.3. Centralización de la Tubería de Revestimiento ^[2, 3, 15]

Es el proceso mediante el cual se mantiene la tubería de revestimiento alejada de las paredes del hoyo de manera que el eje de la tubería coincida lo mejor posible con el eje del agujero ^[5].

Existen diversas formas en las que puede posicionarse la tubería de revestimiento en el hoyo, cada una de ellas depende principalmente de la geometría y trayectoria del pozo perforado. En la Fig. II.4, se muestran algunos ejemplos de descentralización de la tubería vistos desde una sección transversal.

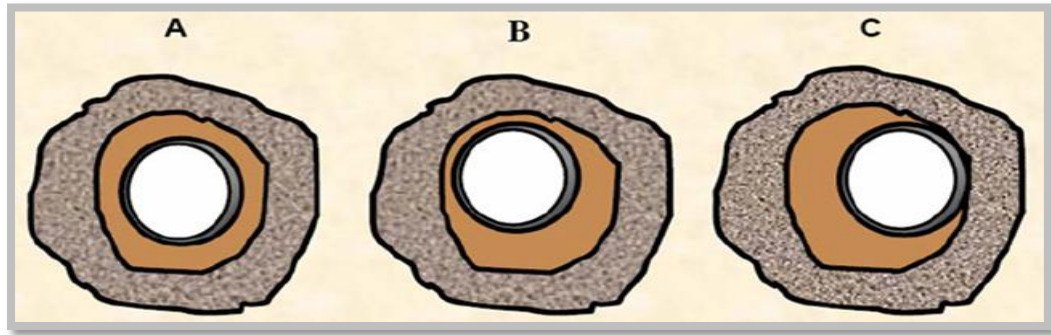


Fig. II.4. Descentralización de la tubería: A) Centrada. B) Descentralizada. C) Recostada a la pared del hoyo ^[2].

Para evitar la descentralización de la tubería y que está entre en contacto con la formación, es necesario realizar las medidas pertinentes de la centralización. La cual consiste en la medida absoluta o relativa de la posición de la tubería de revestimiento respecto al hoyo, (ver Fig. II.5) ^[14].

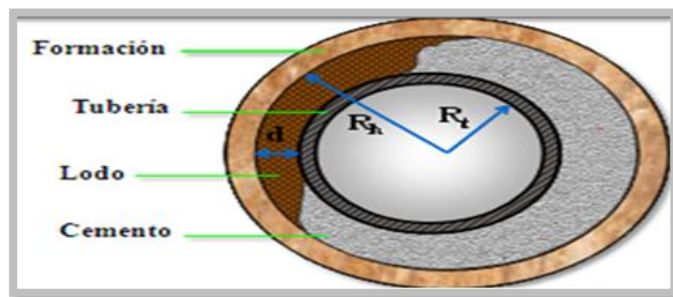


Fig. II.5. Centralización de la tubería ^[15]. (Modificado por Rodríguez)

A continuación, se muestra la ecuación que permite calcular el valor de la medida de centralización.

Dónde:

R_h = Radio del Hoyo [pulg].

R_t = Radio externo del revestidor [pulg].

d = Mínima separación entre la pared del hoyo y el revestido [pulg].

Stand Off = Medida de Centralización [%].

Cuando el valor de centralización es mayor que cero implica que no hay contacto con las paredes del hoyo, pero sí el valor es igual a cero indica que la tubería de revestimiento se encuentra en contacto con las paredes del hoyo. Es importante conocer que si el *Stand Off* es mayor de 70% implica la existencia de una buena centralización entre la tubería de revestimiento y el agujero del hoyo.

II.9. IMPLEMENTOS USADOS PARA LA CEMENTACIÓN ^[2]

Para lograr una cementación exitosa, es necesario instalar equipos, herramientas y accesorios en la tubería de revestimiento antes de correrla en el hoyo. Cada uno de estos provee la asistencia mecánica necesaria para desplazar eficientemente el fluido de perforación y controlar el pozo. Adicionalmente reúnen una serie de características en cuanto al diseño, principio de operación y ubicación en la tubería de revestimiento que en conjunto permiten que el proceso de cementación del pozo pueda realizarse sin problemas.

II.9.1. Equipos y Accesorios

Son aparatos mecánicos colocados permanentemente en la tubería de revestimiento para permitir las operaciones de cementación primaria. Entre ellos se encuentran:

- Zapata; Guía y Flotadora.
- Cuello Flotador.
- Centralizadores
- Raspadores.
- Cestas de Cementación.

II.9.1.1. Zapata

Es una herramienta mecánica generalmente fabricada con acero resistente en la parte externa y bordeada con cemento en su interior. Se coloca en la primera junta de la tubería de revestimiento y su perfil redondeado ayuda a dirigir la tubería en su descenso hasta la profundidad total donde será cementada. Puede ser: guía o flotadora.

- Zapata Guía

Es una válvula de un sólo paso, diseñada para permitir el paso de los fluidos a través del fondo de la herramienta, e impidiendo a su vez el retorno de los mismos a la sarta.

- Zapata Flotadora

Es similar a una zapata guía, excepto en que a esta se le incluye una válvula de retropresión para prevenir que el cemento vuelva a entrar a la tubería de revestimiento después de haberse completado el trabajo. Esto permite la liberación de la presión en superficie del revestimiento y del equipo de cementación una vez que se asienta el tapón superior (ver Fig. II.6).



Fig. II.6. Zapata Guía y Flotadora ^[16]. (Modificado por Rodríguez)

II.9.1.2. Cuello Flotador

El equipo flotador permite que la tubería de revestimiento sea introducida en el hoyo, impidiendo el paso de los fluidos hacia el interior del revestimiento. Esto reduce las cargas y permite que la tubería flote en un ambiente de menor resistencia. Esta fuerza de flotación ayuda a reducir las cargas del gancho (ver Fig.II.7).



Fig. II.7. Cuello Flotador ^[16]. (Modificado por Rodríguez)

Se coloca entre el segundo y tercer tubo desde el fondo hacia arriba. Está compuesto por: un cuello y una válvula mecánica de retención. El cuello tiene como función servir de asiento para que el tapón superior (colocado después de bombear la lechada de cemento), al llegar a ese nivel no pueda pasar. Cuando aumenta la presión en esta zona, significa que el cemento ha pasado por completo hacia el espacio anular.

En caso de no se utiliza el cuello flotador, es necesario que la tubería de revestimiento sea llenada periódicamente a medida que se introduce en el hoyo, a fin de evitar que las cargas de colapso afecten las condiciones mecánicas de la tubería.

II.9.1.3. Centralizadores

Son dispositivos mecánicos que se encargan de mantener la tubería de revestimiento alejada de las paredes del hoyo. El uso de centralizadores permite que el fluido de perforación pueda ser removido eficientemente del hoyo, disminuye la posibilidad de atascamiento diferencial de la tubería y proporciona un área de flujo uniforme en el espacio anular, que ofrece menor resistencia al paso de la lechada de cemento.

Generalmente, se colocan en pozos verticales de la siguiente manera: uno entre la zapata guía y el cuello flotador, otro en la primera unión libre después del cuello flotador, de allí en adelante cada 80 pies (2 tubos) hasta 40 pies, por debajo del tope del cemento.

El Instituto Americano del Petróleo, define tres tipos de centralizadores; flexibles, rígidos y sólidos.

- Centralizadores Flexibles

Son los más utilizados en la industria. Están formados por un conjunto de flejes fijos a un par de aros de acero. Se caracterizan por permitir una buena centralización en pozos verticales o poco inclinados (hasta 30°) y por generar mayor fuerza de arrastre contra la pared del hoyo o la tubería de revestimiento que los centralizadores rígidos y sólidos (ver Fig. II.8.A).

- Centralizadores Rígidos

Están formados por láminas de acero rectas, sujetas a un par de aros, condición que les permite proporcionar un diámetro exterior fijo a lo largo de todo el centralizador. Su función principal es asegurar una centralización mínima, ya que el principio de funcionamiento de las láminas de acero no es la flexibilidad. Esto no siempre es posible ya que al no poseer láminas sólidas, existe el riesgo de que la herramienta se deforme (ver Fig. II.8.B).

- Centralizadores Sólidos

Al contrario que de los centralizadores flexibles y rígidos, los centralizadores sólidos son contruidos en una pieza única. Sin embargo, poseen aletas que proporcionan una separación entre el exterior de la tubería de revestimiento y la pared del hoyo, tal como en el caso de los centralizadores rígidos. Pueden ser tanto rectas como curvas; estas últimas tienen la finalidad de inducir un movimiento de rotación al fluido para generar turbulencia (ver Fig. II.8.C).



Fig. II.8. Centralizadores ^[3]. (Modificado por Rodríguez)

II.9.1.4. Raspadores

Son dispositivos mecánicos, que se utilizan para remover mecánicamente el revoque de fluido de perforación que se forma en las paredes del hoyo, mejorando así la adherencia entre el cemento y la formación. Existen dos tipos de raspadores: raspadores rotatorios y raspadores reciprocantes.

- Raspadores rotatorios

Son barras rectas que contienen alambres o cables unidos longitudinalmente a la tubería de revestimiento mediante tornillos especiales o tachuelas soldadas. Su función es remover el fluido de perforación mientras la tubería de revestimiento es sometida a rotación.

- Raspadores reciprocantes

Son collares que contienen alambres radiales o cables; y su función es remover el fluido de perforación cuando la tubería es sometida a un movimiento reciprocante o de vaivén. En general, se prefieren los raspadores tipo cable o reciprocantes sobre los

raspadores de alambre, tipo araña o rotatorios, ya que estos proveen mayor fuerza para remover el fluido de perforación; sin embargo el operador debe estar seguro de cuál es el tipo apropiado a seleccionar durante las operaciones.

II.9.1.5. Cestas de Cementación

Son dispositivos que se corren sobre la tubería de revestimiento cuando existe la posibilidad de pérdidas de circulación en el hoyo. Actúan como una especie de empaadura en el espacio anular para separar los fluidos y soportar la presión hidrostática del cemento en cualquier punto donde sean colocadas.

II.9.2. Herramientas

Las herramientas más comunes son los tapones de cementación (superior e inferior) y los retenedores.

II.9.2.1. Tapones de Cementación

Son contruidos de elastómeros moldeados sobre aluminio y se usan para evitar la contaminación de la lechada de cemento con los espaciadores y el fluido de perforación, limpiar las paredes de la tubería de revestimiento e indicar cuando el desplazamiento del cemento ha finalizado.

- Tapón Inferior

Es desplazado delante de la lechada con la finalidad de limpiar la tubería de revestimiento durante su descenso a la profundidad del cuello flotador y separar la mezcla de cemento del fluido de perforación. Cuando éste llega al cuello flotador, se crea un diferencial de presión capaz de romper un diafragma en el centro del tapón, permitiendo que la lechada pase a través de él. Después que todo el cemento se encuentre en el espacio anular, se libera el tapón superior hasta golpear el tapón inferior, lo cual indica que el desplazamiento de la lechada hacia el espacio anular ha finalizado (ver Fig. II.9.B).

- Tapón Superior

Es desplazado detrás de la lechada de cemento con el propósito de impedir que el fluido de desplazamiento canalice a través del cemento y contamine la lechada. Cuando éste alcanza al cuello flotador, se genera un incremento de presión en la superficie, indicando que el proceso desplazamiento ha finalizado. A pesar de que ambos tapones son similares en su apariencia, el diseño y operación de los mismos varía significativamente. El tapón inferior, utiliza un diafragma que se rompe entre 200 y 400 lpc de presión. El tapón superior por su parte, contienen un núcleo sólido y construido a prueba de roturas (ver Fig. II.9.A).

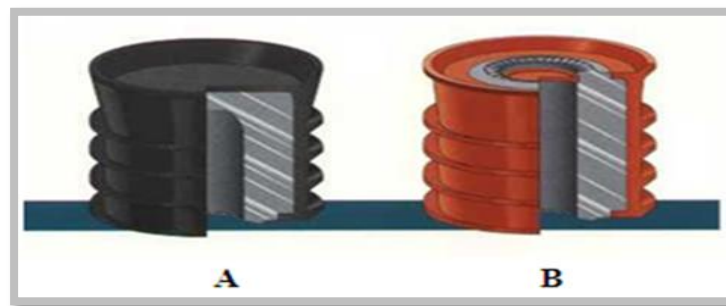


Fig. II.9. Tapones de Cementación ^[3]. (Modificado por Rodríguez)

II.9.2.2. Retenedores de Cemento

Son herramientas que se colocan en la tubería de revestimiento con la finalidad de prevenir el regreso del flujo cuando no se espera la deshidratación de la lechada de cemento; también se encargan de aislar una sección del anular para efectuar trabajos de cementación forzada o tratamientos similares.

II.10. PROCESO DE CEMENTACIÓN ^[9, 17]

Se corre el revestidor a través del hoyo hasta que la zapata se encuentre a unos pocos pies del fondo del pozo. La circulación del lodo permite limpiar el revestidor antes de la operación de cementación. Es esencial que los tapones estén correctamente colocados en el cabezal de cementación. Primero se bombea el tapón blando (Inferior), antes de la lechada de cemento, esto para limpiar el lodo de perforación que se encuentra en el diámetro interno del revestidor. Segundo el tapón duro (Superior), después de haber bombeado el cemento y el espaciador, como se muestra en la Fig. II.10.

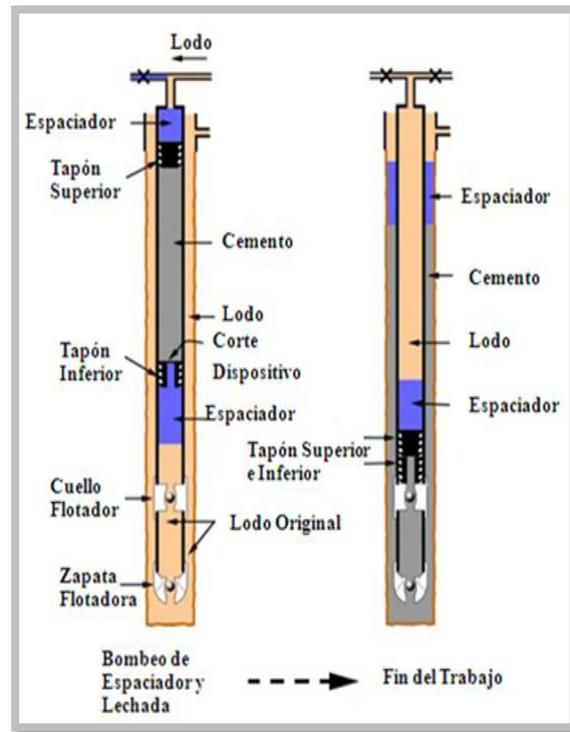


Fig. II.10. Proceso de Cementación ^[9]. (Modificado por Rodríguez)

II.10.1. Cementación en Una Etapa ^[13, 17]

La mayoría de los procedimientos de cementación son trabajos en los cuales se bombea la lechada de cemento a través del revestidor y colocado en el anular. Existen también otras técnicas para solucionar problemas en la completación de pozo. Cuando se tienen revestidores de diámetro muy grande, los procesos de cementación tradicionales son inadecuados, consecuentemente, se cementa a través de la tubería de perforación o otra técnica de cementación, donde el cemento es circulado por unas tuberías de diámetros más pequeños y bombeado entre las grietas del anular.

Cuando se cementan los revestidores de superficie y de producción, las condiciones del pozo y el largo del intervalo a cementar nos ayuda a decidir cual proceso de

cementación se debe implementar. Usualmente, la máxima presión de fondo permisible determinara cual será el mejor trabajo de cementación a utilizar, como por ejemplo de una etapa o multietapas.

En esta sección, se describe el procedimiento básico de una cementación primaria en una etapa (ver Fig. II.10). El proceso incluye los siguientes pasos:

- Corrida de tubería de revestimiento.
- Circulación de lodo mediante la bomba del equipo de perforación.
- Prueba de presión.
- Bombeo de lavador y espaciador.
- Liberación del tapón inferior.
- Mezcla de lechada.
- Bombeo de la lechada inicial o de llenado.
- Bombeo de la lechada de cola.
- Liberación del tapón superior.
- Desplazamiento de las lechadas y tapones con fluido.
- Comprobación de retorno de fluido.

II.10.2. Cementación por Etapas^[9, 17]

La cementación de etapas múltiples se utiliza con los siguientes fines: reducir la presión hidrostática en las formaciones que no pueden soportar la presión hidrostática ejercida por una columna larga de cemento, aislar dos zonas con problemas en una misma sección del agujero del pozo, en la cementación hasta superficie o en largos intervalos de tubería intermedia que llegan a superficie, pueden encontrarse diversos problemas: tales como;

- Largos tiempos de bombeos.
- Alta presión de bombeo.
- Excesiva presión hidrostática de cemento.

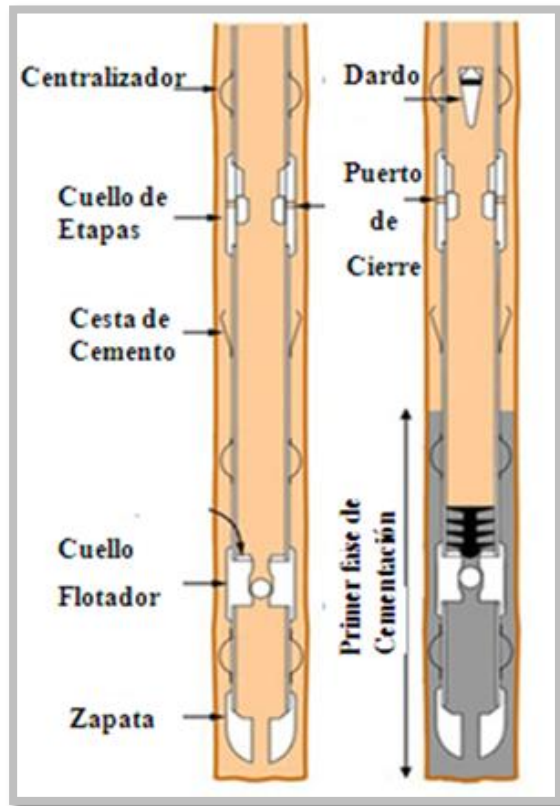
Por estas razones, una operación alternativa de cemento se lleva cabo en dos etapas (ver Fig. II.11):

II.10.2.1. Cementación Primera Etapa

El proceso es similar al explicado anteriormente, con excepción de un menor volumen de lechada, de manera que solo quede la parte inferior del anular cementado. La altura cementada en esta parte del anular dependerá del gradiente de fractura de la formación (altura común de 3.000 - 4.000 pies).

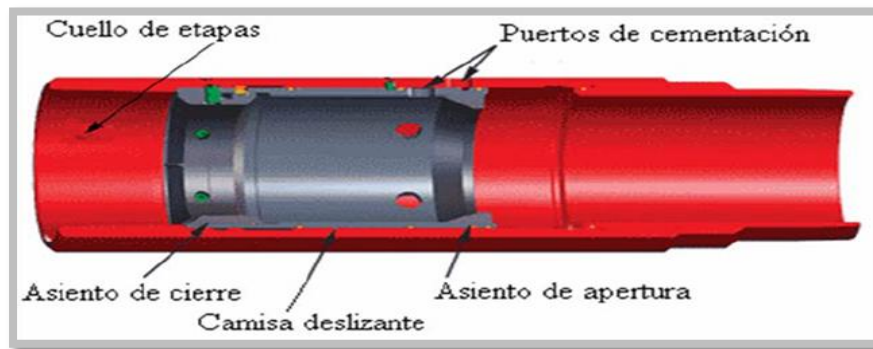
Paso para realizar la primera etapa de una cementación múltiple:

- Circulación y acondicionamiento del lodo.
- Pruebas de presión de las líneas.
- Bombeo del lavador y/o espaciador.
- Bombeo de la lechada de cementación inicial y/o de cola (cementación de la primera etapa).
- Lanzamiento del tapón de la primera etapa.
- Desplazamiento de la lechada de cementación de la primera etapa hasta la zapata (profundidad total).
- Bombeo del tapón de la primera etapa para verificar que ha llegado al collar de flotación.
- Purga y comprobación de los retornos.

Fig. II.11. Primera Etapa de Cementación ^[9]

II.10.2.2. Cementación Segunda Etapa

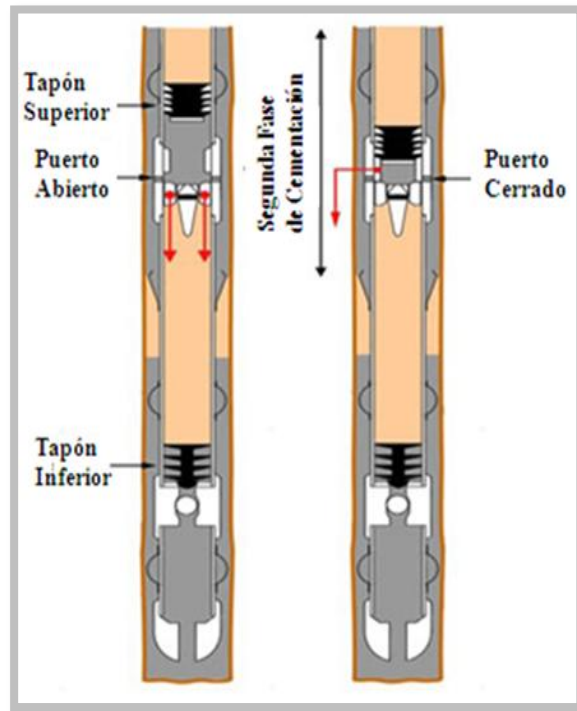
Esto implica el uso de una herramienta especial conocida como un cuello de etapas (ver Fig. II.12), que se conecta en el revestidor a una posición predeterminada, (la posición puede ser usado por la profundidad de la zapata anterior). Hay puntos del cuello de fase, que inicialmente se cierra por una manga interna, por medio de pasadores. Después de la primera etapa se libera desde superficie un dardo, lo que permitirá abrir las puertas del cuello de etapas, permitiendo la comunicación directa del revestidor y el espacio anular.

Fig. II.12. Cuello de Etapas ^[2]

(A la presión de 1.000 - 1.500 lpc se aplica la liberación del dardo que permitirá cortar los pernos de fijación y moverá la manga hacia abajo para de esta manera abrir los puertos). La circulación se establece a través del cuello de etapas antes el bombeo de la segunda lechada (ver Fig. II.13).

El procedimiento es el siguiente:

- Liberación del dardo de apertura (hasta que caiga al cuello de etapa).
- Presurización de la bomba de apertura instalada en el collar de etapa; apertura de los puertos en el collar de etapa.
- Circular a través de cuello de etapa.
- Bombeo del lavador o espaciador antes de la inyección de la lechada de cemento de la segunda etapa.
- Bombeo de la lechada de cemento inicial y/o de cola (cementación de la segunda etapa).
- Liberación del tapón duro.
- Desplazamiento del tapón de cierre hasta el collar de etapa.
- La presión de bombeo activa el cierre de los puertos del cuello de etapa.
- Liberación y comprobación de los retornos.

Fig. II.13. Segunda Etapa de Cementación ^[9]

Para evitar que el cemento caiga en el anular se debe colocar una cesta de cemento que debe estar ubicado de bajo del cuello de etapas. Si es necesario, más de un cuello de etapa se puede ejecutar, por lo que implicaría que varias secciones del revestidor se puedan cementar. Una de las desventajas de esta cementación, es que el revestidor no puede moverse después que el cemento de la primera etapa ha fraguado en la parte inferior del anular.

II.10.2.3. Cementación con Sarta Interna (*Inner String*) ^[2, 9]

Es una técnica que se aplica en tierra como en costa afuera, principalmente cuando se necesita realizar operaciones de cementación para revestidores de gran diámetro (conductor y superficial), también cuando:

- Se requieren largos periodos de tiempo para la colocación del cemento y,
- Se necesita trabajar con grandes volúmenes de cemento

En tales casos, la cementación puede ser hecha a través de una tubería de perforación que se baja dentro del revestidor hasta una distancia prudencial de (+/- 30 pies), de la zapata esto para evitar que esta quede cementada.

Es una alternativa el cementar el revestidor con la sarta interna, es decir, a través de la propia tubería de revestimiento. El revestidor se corre hasta la profundidad de asentamiento y luego se ejecuta la corrida de la sarta interna hasta una distancia prudencial de la zapata (ver figura II.). Una vez que este proceso se haya realizado comienza el trabajo de cementación. Después de que el cemento ha sido desplazado, y se ha comprobado que el pre-flujo está alcanzando la superficie o suelo marino en caso que la operación sea en costa afuera, se sigue bombeando a menor tasa hasta que el cemento llegue al tope esperado, para luego recuperar la sarta interna. Este método es adecuado para el revestimiento de diámetro 13^{3/8} pulg y mayores.

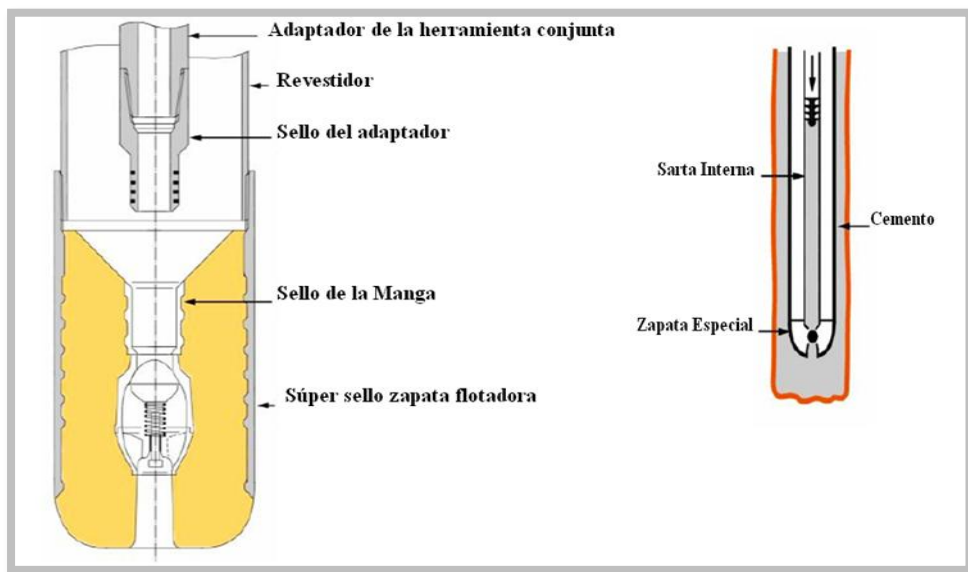


Fig. II.14. Cementación con Sarta Interna ^[9]

La principal desventaja es que para largo revestidores, se pierde mucho tiempo en la corrida y recuperación de la sarta interna. También se debe tener cuidado para evitar el colapso de la tubería de revestimiento entre el anular que forma con la sarta interna.

La cementación a través de la tubería de perforación tiene varias ventajas:

- No se requiere conocer el volumen exacto del hoyo, ya que la lechada de cemento se mezcla y se bombea hasta que el retorno se observe en la superficie ó lecho marino. Este procedimiento optimiza el volumen total de cemento a mezclarse y bombearse, ya que el volumen de desplazamiento de la tubería de la tubería de perforación es despreciable e insignificante.
- Elimina la necesidad de utilizar cabezales de cementación y tapones de desplazamiento.

II.11. PROBLEMAS COMUNES DE CEMENTACIÓN ^[18, 19]

Existen una serie de problemas que pueden afectar los trabajos de Cementación y los cuales deben ser considerados y discutidos al momento de realizar las reuniones previas a la ejecución del Proceso de Cementación

A continuación, se mencionan algunos de ellos a fin de ser entender de manera general la naturaleza de los mismos y visualizar las distintas soluciones posibles:

II.11.1. Condición pobre del hoyo

Este tipo de problemas está relacionado en forma directa con lo que se conoce como geometría del hoyo y el mismo puede tener varias razones tales como: patas de perro, estabilidad del hoyo descubierto, cavernas del hoyo, llenado del hoyo, formación de sólidos en la parte baja del hoyo, generalmente en hoyos desviados conocido como cama de recorte.

II.11.2. Condición pobre del fluido de perforación

Este tipo de problemas es muy común si no se tiene condiciones reológicas del fluido que cumplan las funciones principales dentro del hoyo y que son claves al momento de realizar la cementación. Dentro de ellos podemos mencionar: altas fuerza de gel y de resistencia, alta pérdida de fluido o filtrado, revoque grueso, alto contenido de sólido, pérdida de material de circulación, incompatibilidad de fluido con el cemento.

II.11.3. Centralización pobre

Muchos de los especialistas se refieren al concepto de centralización como el segundo elemento en importancia para garantizar una cementación exitosa, de allí la necesidad de un acertado programa de centralizadores acorde con el diámetro del hoyo existente, Esto debido a que el cemento no se coloca uniformemente alrededor de la tubería de revestimiento, dejado lodo en el sitio en dicho espacio.

II.11.4. Pérdida de Circulación

Este tipo de problema se presenta durante el proceso de colocación de la lechada de cemento y que pudiese presentarse de acuerdo al manejo de altas densidades de las mismas o valores de presión de bombeo altos, estas pérdidas pueden ser consideraras como: parcial, severa, total.

II.11.5. Presión de Formación Normal y Subnormal

Valores de gradiente de presiones igual al gradiente del agua salada con 80 a 100 mil ppm de salinidad y valor de gradiente de presión igual o menor que el gradiente del agua dulce.

II.11.6. Presión alta de bombeo

Referida a la presión de bombeo de la lechada de Cemento y/o a la presión manifiesta de desplazamiento.

II.12. CÁLCULOS DE CEMENTACIÓN

Los cálculos principales requeridos para un trabajo de cementación son:

- La cantidad de lechada requerida para llenar el espacio anular fuera de la tubería de revestimiento, hasta la altura programada.

- La cantidad de lodo ó agua de mar necesaria de bombear para desplazar el cemento, es decir, golpear el tapón de superficie.

Los esquemas son invaluable para clarificar los volúmenes requeridos incluyendo detalles con respecto a las capacidades anulares (hoyo desnudo, hoyo desnudo con tubería de revestimiento), diferentes grados de tubería de revestimiento, longitud de la sección, entre otros.

Donde:

C = Capacidad [Bls/pies]

D = Diámetro Mayor [pies]

d = Diámetro Menor [pies]

Donde:

V = Volumen de Lechada [Bls]

C =Capacidad [Bls/pies]

h = Profundidad [pies]

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

III.1. UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL GOLFO DE MÉXICO ^[20]

El golfo de México (GOM), es una cuenca marítima del océano Atlántico, que posee un extensión de agua aproximadamente de 1.550.000 km², y una profundidad máxima de 4.384 metros (14.383 pies), ubicado en América del Norte y delimitado por los litorales de; México, Estados Unidos y Cuba; donde la península de Yucatán permite separar al Golfo del mar Caribe, observar Fig. III.1.



Fig.III.1. Ubicación Geográfica del Golfo de México ^[20] (Modificado por Rodríguez)

Estudios sismológicos realizados en el Golfo de México, muestran datos estratigráficos y estructurales de rocas del Jurásico Superior, de pozos petroleros en las regiones costeras de México, Texas y Luisiana, según métodos geofísicos se infiere que las rocas de esa edad también, se localizan a grandes profundidades en el

GOM, donde están cubiertas por potentes cuerpos de estratos del Cretácico y del Cenozoico.

Las rocas del Jurásico Superior son productoras de petróleo en algunos sectores de México como; Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y en el sur de Estados Unidos. Geológicamente son los yacimientos petroleros más viejos y más profundos en esas regiones. Los estratos de esa edad son potencialmente almacenadores de petróleo en el Golfo de México. Allí su importancia petrolera, por explorar e inducir que esta enorme cuenca marina, existan grandes reservas de hidrocarburos alrededor de todos sus litorales ^[21].

III.1.1. Clasificación de las Profundidades del Aguas ^[22, 23, 24]

En general se ha descrito que la actividad en la perforación costa afuera está altamente influenciada por características climatológicas, geográficas y geológicas que predominan en cada zona geográfica, por lo que dependiendo de las predicciones de estos parámetros se decide cómo y cuándo se puede llevar a cabo esta actividad.

Dos de los parámetros que pueden evaluarse son los niveles de profundidad de la columna de agua y los parámetros geológicos, ya que estos parámetros están relacionados entre sí, durante el desarrollo de los estudios y operaciones de perforación costa afuera, planteándose como desafío la perforación de pozos con un hoyo estable a medida que se alcanza nuevos toques de profundidad.

En la actualidad la industria petrolera maneja diversos conceptos de profundidad marina y ambientes sedimentarios que varían según la actividad considerada. Por lo general, con respecto a la construcción de pozo, se consideran de la siguiente manera

(ver tabla III.1), que muestra las clasificaciones de las aguas con sus respectivas profundidades y parámetros que esta puedan presentar.

Tabla III.1. Clasificación de las Aguas. (Modificado por Rodríguez)

Clasificación de las Aguas	Profundidad [ft]	Temperatura [°F]	Presión [lpc]
Somera	< 1.640	> 54	< 733
Profundas	1.640 – 6.562	54 - 39	733 – 2.934
Ultra-profundas	> 6.562	< 39	> 2.934

Mientras que Betancourt (2007), estableció rangos de profundidad con sus características geológicas correspondientes a esa profundidad, estos rangos son los siguientes:

- Aguas costeras o someras: La profundidad del lecho marino no es mayor a 100 mts. (328 pies). En estos yacimientos someros se puede encontrar una sedimentación geológica referida a la zona de transición entre el límite externo de la playa (*shore-face*), en sentido amplio (medio de transición) y la plataforma continental en sí, depositándose gran cantidad de material detrítico transportados por los ríos y sedimentados en el mar dando paso a las formas deltaicas. Dominan la presencia de limos y lutitas, pudiendo existir capas intercaladas arenosas.
- Aguas semi-profundas: La profundidad del lecho marino está entre los [100-500] mts. [328-1.640] pies de profundidad. Se caracterizan por presentar un ambiente geológico del tipo precontinental, que va desde la línea más distal

de la plataforma continental hasta alcanzar profundidades abisales; depositándose material formado en la parte externa de la plataforma continental que deslizó por el talud. La sedimentación es predominantemente arcillosa sin intercalaciones.

- Aguas profundas: La profundidad del lecho marino supera los 500 mts. (1.640 pies) llegando a los 2.000 mts. (6.151 pies). Cuando las profundidades están en este rango se requiere mayor tecnología para llegar a estos niveles. Este escenario se caracteriza por describir un ambiente sedimentológico marino del tipo llanura abisal, donde los sedimentos están restringidos a los de grano fino por su lejanía a las zonas de origen.
- Aguas Ultra-profundas: Las profundidades del lecho marino son superiores a los 2.000 mts. (6.151 pies) de profundidad. Aquí se presentan unas características geológicas descritas por la presencia de un fenómeno de transporte de sedimentos hacia el fondo del lecho marino, como lo es la corriente turbidítica, principal mecanismo para el transporte de masas de sedimentos pendiente abajo a partir del borde continental.

Cuando de perforación costa afuera se trata, se deben manejar los factores nombrados, ya que sobre todo a aguas ultra profundas, se generan múltiples complicaciones para llegar a las profundidades requeridas, teniéndose la necesidad de que existan soluciones concretas para llevar a cabo los requerimientos de la operación.

III.2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA ^[25]

La localización del pozo RR-1X se encuentra ubicada en el Bloque 54, a unos 300 Km de Cancún en la Península de Yucatán, en aguas Ultra-profundas del Golfo de México. Observa en la Fig. III.2.

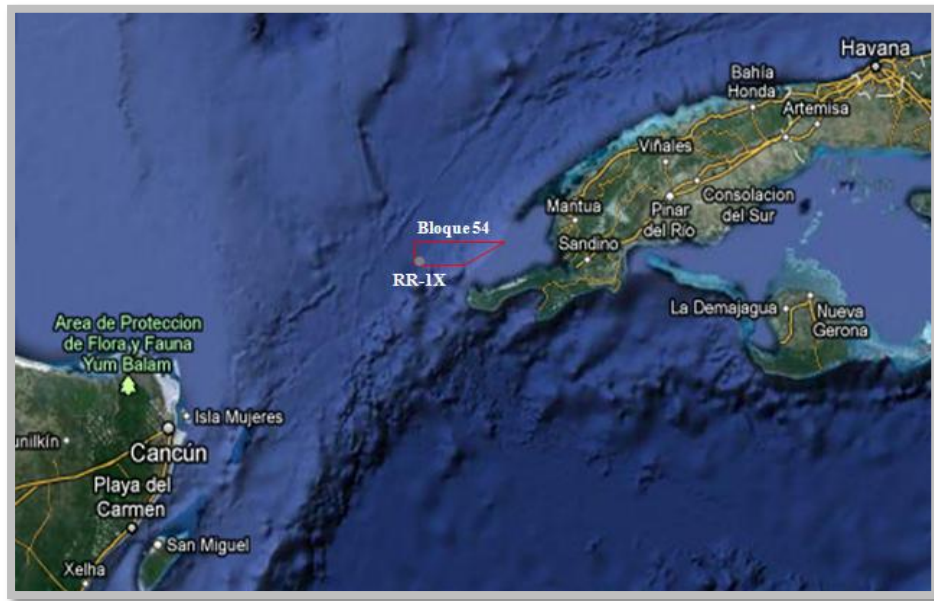


Fig. III.2. Ubicación Geográfica de la localización del pozo RR-1X ^[20]

III.3. DATOS GENERALES DE LA LOCALIZACIÓN ^[25]

En el Bloque 54, como se ha mencionado anteriormente aun no se ha perforado ningún pozo, es decir, no se cuenta con información suficiente o casos históricos practicados en la zona de estudio, pero se dispone de un conjunto de datos pertinentes que permiten reflejar información relevante acerca del pozo exploratorio RR-1X.

Tabla III.2. Datos Básicos de la Localización ^[25] (Modificado por Rodríguez)

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

Nombre de la localización		RR-1X
Coordenadas de superficie [ccl]	x	xx.xx7
	y	yy.y10
Coordenadas de fondo [ccl]	x	xx.x7
	y	yy.y10
Ubicación	Línea Sísmica	Inline 1.528
		Crossline 3.959
Fondo marino [pies]		-7.086
Profundidad final [pies por debajo del nivel del mar]		-16.732
Objetivo Primario		Cretáceo Superior Cretáceo Inferior
Objetivo Secundario		
Gravedad [°API]		30-35 °API
POES [Petróleo <i>In Situ</i>]	Petróleo [MMBlS]	1.778,28
Tiempo de perforación*	Días	90
	T/A	1
* Incluye 30 días de Evaluación		

III.4. ESTUDIO DEL SISTEMA PETROLÍFERO ^[25]

III.4.1. Roca madre

En toda la columna sedimentaria se han considerado seis niveles de rocas madres (ver Tabla III.3) que muestran un gran potencial de generación por debajo de los corrimientos y una generación muy reciente de los intervalos más profundos. La roca madre del Tithoniano (Jurásico Tardío) es considerada como la principal en este estudio. El tipo de hidrocarburo esperado es principalmente líquido, debido a que los intervalos de roca madre considerados son querógenos tipo II, Marinos, a excepción del Jurasico Inferior (roca madre Bajocian) el cual se considera como querógeno tipo III (Terrestre, *Gas Prone*).

Tabla III.3. Niveles de rocas madres consideradas en la columna sedimentaria ^[25].

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

EDAD	Ma.	Litología [%]	Batimetría [mts]	Espesor [pies]	Materia Orgánica [Tipo]	COT [%]
Jurasico Medio	165-170	Lutitas Limonita	Deltáico	656	III	6,0
Oxfordiano Superior	155-157	Caliza 90%	328-492	164	II	3,0
		Lutita 10%				
Tithoniano	144,2-148	Caliza 90%	656	328	IIs	5,0
		Lutita 10%				
Berriasiano-Valanginiano Medio	135-144,2	Caliza 80%	1.640	394	IIs	3,5
		Lutita 20%				
Albiano Superior	98,9-102	Caliza 90%	3.281	197	IIs	4,0
		Lutita 10%				
Cenomaniano Superior	93,5-95	Caliza 90%	3.281	197	IIs	4,0
		Lutita 10%				

III.4.2. Sellos

Respecto a la sedimentación y depósito de rocas impermeables consideradas como posibles sellos, describen tres fases de eventos tectono - sedimentarios mayores en la geología del Bloque 54, que influyen en el desarrollo de este tipo de rocas:

Jurásico-Cretácico: Fase pre-orogénica; Evolución sedimentaria de la parte norte del margen pasivo Proto-Caribe del Jurásico al Santoniano (~ 205 - 85 Ma). Durante el Cretácico, cubriendo la plataforma externa (Márgen sureste de Yucatán), se desarrollan facies marinas de tipo margoso-arcilloso, localizadas en las partes bajas de paleocanales. Posiblemente la máxima inundación ocurrió durante el Berriasiano (~ 144 - 137 Ma.), sellando los reservorios carbonatados del Jurásico.

Terciario (Paleoceno-Eoceno Medio): Fase orogénica; desplazamiento hacia el norte del Gran Arco Volcánico de las Antillas, subducción de la placa del Proto-Caribe y colisión con el margen sur de la placa de Norte América, bloque Yucatán, durante el Paleoceno? al Eoceno Medio (~ 83 - 41 Ma). Sedimentación pelágica de margas y arcillas de carácter regional, derivadas de la erosión del arco volcánico con espesores en ocasiones mayores a los 50 mts, con volúmenes arcillosos mayores al 70%, efectivos en áreas sin deformación tectónica.

Terciario (Eoceno Tardío?-Reciente): Fase post-orogénica; ocurrió después de la colisión debido a la migración Este de la placa del Caribe a lo largo de fallas transformantes mayores (Eoceno Tardío al Reciente ~ 33 - 0 Ma). Presencia de secuencias calcáreo-margosas y arcillosas cubriendo los desarrollos arrecifales y parcialmente las zonas de la plataforma carbonatada.

III.4.3. Reservorios

El reservorio representa la mayor incertidumbre, debido a que la única información en la zona de costa afuera que se posee hasta la actualidad, son los sondeos del programa “*Deep Sea Drilling Project*” (DSDP). No obstante, para la evaluación se han revisados diferentes aspectos:

- Datos geológicos costa afuera y su extrapolación hacia áreas adyacentes del Golfo de México, integrados en el contexto geológico regional.
- Los datos suministrados por los sondeos del DSDP.
- El estudio sismo-estratigráfico de las secuencias disponibles para reconocer geometrías depositacionales, diagnósticos de los tipos de sistemas sedimentarios presentes, con énfasis en los depósitos de brechas de talud del Cenomaniano y del Maestrichtiano Tardío? - Paleoceno Inferior.

En términos generales, los tipos de reservorios pronosticados para la zona de estudio, el Bloque 54 vienen dados por la figura III.3:

- Construcciones Arrecífales
- Brechas de Talud
- Plataforma carbonatada marina somera *Karstificada*
- Naturalmente fracturados

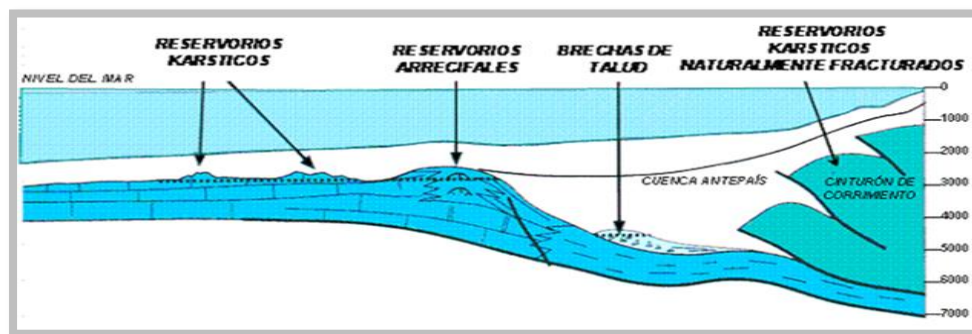


Fig. III.3. Principales tipos de reservorios pronosticados para el Bloque 54

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

No obstante, cada uno de estos tipos de reservorios posee facies, características y porosidades diferentes de acuerdo a la edad del mismo. Adicionalmente, se realizó un análisis con la finalidad de buscar ciertas analogías de la evolución de los reservorios, tal y como se muestra en la figura III.4.

EDAD	FACIES	CARACTERÍSTICAS	POROSIDAD	ANALOGOS
PALEOCENO INFERIOR, MAASTRICH, TARDIO	PELÁGICAS OUSTÓSTROMICAS	Fujos gravitacionales, deslizamientos de masas de sedimentos contorneados y turbidíticos de alta energía (calizas, dolomitas, cretas)	Microcristalina, vugular, interbrecha, moldica, intergranular	REFORMA CANTARELL DSDP 536
CENOZOICO ALBIANO	PLATAFORMA SOMERA	Dolomitas, arrecifes	Vugular, esquelética, moldica, intercristalina, interbrechas	GOLDEN LANE LIKE-EL ABRA
	PLATAFORMA EXTERNA	Turbiditas proximales y deslizamientos	Discordancia del Cretácico Medio (MCU) Preservación de la porosidad primaria localmente	
NEOCENO	TALUD	Brechas		GOLDEN LANE- EL ABRA POZA RICA-TAMABRA
	CARBONATOS DE CUENCA Y DE TALUD	Calizas de plataforma	Esquelética, moldica intercristalina	
CUATERNARIO		Brechas		FAJA PLEGADA CUBANA
	RAMPA DISTAL PELÁGICA	Ambiente Somero Calizas Ambiente Profundo	Intragranular primaria poca efectiva Diagénesis (fracturación y disolución) Primaria escasa de matriz Diagénesis mediante la fracturación	

Fig. III.4. Características de los Reservorios para el Bloque 54

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

III.5. ESTIMACIÓN DEL POES Y GOES ^[25]

Las expectativas iniciales calculadas para 10 oportunidades exploratorias, producto del estudio con la sísmica 2D fueron de 3.847,69 MMBls de crudo y 1.726,05 MMMPC de gas, una revisión posterior, enfocado en las tres mejores oportunidades exploratorias dio como resultado expectativas de 825,94 MMBls de petróleo y 1.306,29 MMMPC de gas, finalmente, utilizando la sísmica 3D, el volumen de petróleo “*In Situ*” para la localización exploratoria del Bloque 54 RR-1X se estimo en 1.778,28 MMBls, arrojando buenas expectativas, tomando un factor de recobro de 22 %, se obtendría 307,17 MMBls.

Por lo antes expuesto, se propone la perforación de la localización exploratoria Bloque 54 RR-1X, con una profundidad final estimada de 16.732 pies. De confirmarse la existencia de hidrocarburo con esta próxima perforación, se descubriría una nueva frontera exploratoria en La Cuenca sedimentaria de aguas Ultra-profundas del Golfo de México, lo que impactaría de manera extraordinaria en el desarrollo económico y acrecentaría los éxitos de PDVSA en materia de exploración de hidrocarburos a nivel internacional.

III.6. MODELADO 2D y 3D ^[25]

El Pozo que se perforará en la localización del Canal de Yucatán RR-1X tiene como objetivo principal la evaluación de trampas estructurales y estratigráficas, asociadas a crecimientos arrecifales que se ubican en el tope del Límite Cretácico-Terciario de la plataforma carbonatada de Yucatán. El estudio Geológico-Geofísico se ha realizado utilizando sísmica 2D y 3D, la primera tomada con fines regionales y la segunda

enfocada en la caracterización de las oportunidades exploratorias de mejor prospectividad hidrocarburífera.

La visualización con la sísmica 2D, se encuentra asociadas básicamente a altos estructurales contra fallas normales de vergencia opuesta que muestran cambios en el carácter sísmico de la estratificación. Por otra parte, cambios laterales bruscos en los depósitos bien estratificados, interpretados como de aguas profundas y relacionados con paleocanales, bien compactados, le conceden un carácter sellante a los depósitos arrecifales que le dan a los prospectos un entrampamiento con disminución de riesgo.

Es importante destacar, que el área presenta alta complejidad geológica, adicionalmente la información de pozos, perforados en tierra, representa una columna geológica afectada por la presencia de escamas sobrecorridas, que intercalan rocas principalmente Jurasicas con secuencias cretácicas, donde el tectonismo ha destruido prácticamente la totalidad de los yacimientos.

Sin embargo, dicha información, así como la disponible de los pozos perforados por el *Deep Sea Drilling Project*, al norte del área de estudio y la información de campos productores en las cercanías del Golfo de México y los Estados Unidos sirvió de análogo para inducir la presencia de hidrocarburos en la zona de estudio y de esta manera crear la propuesta estratigráfica del pozo.

III.7. LITOESTRATIGRAFÍA LOCAL ^[25]

En el área del Bloque 54, no se ha perforado ningún pozo, por lo que las características litológicas representativas, para cada edad de la columna estratigráfica esperadas en la propuesta de la localización RR-1X, provienen de:

- La información de los pozos del *Leg 77 Deep Sea Drilling Project* (DSDP) ubicados al oeste de los Estrechos de Florida en el sureste del Golfo de México, donde el pozo más cercano a la localización es el Site 536, a una distancia aproximada de 165 km.
- Las características de la información sísmica utilizada en el estudio.
- Conocimiento geológico de expertos en la estratigrafía de las cuencas del Golfo de México.

En ese sentido durante la perforación de la localización RR-1X se espera atravesar, según los análogos de los pozos del *Leg 77 Deep Sea Drilling Project* (DSDP), las siguientes formaciones:

Plioceno: Está constituido por lodo, creta y escasos intervalos de marga de composición biogénica, principalmente nanofósiles. Puntualmente pueden presentarse litotipos carbonatados porosos fracturados o arenas progradantes, con litología de calizas bioclásticas, crestas y margas, poco consolidadas o pobres cementadas. Cuenta con un espesor de aproximadamente 459 pies.

Mioceno: Presenta las siguiente características litología: turbiditas calcáreas, hemipelagitas y crestas de nanofósiles, calizas organógenas, crestas margosas gris verdoso a blanco, calizas margosas y cenizas volcánicas. Cuenta con un espesor total

aproximado de 1.148 pies. Desde el punto de vista sísmico, esta unidad presenta tres subunidades de rocas, agrupadas por su edad, como se detalla a continuación:

La subunidad Mioceno Superior: Se caracteriza por presentar reflectores paralelos a semiparalelos, distorsiones, túmulos y valles rellenos simulando sedimentos arenosos, porosos más continuos hacia la base. La litología presente en esta subunidad es; turbiditas calcáreas de alta energía con fragmentos de lutitas y arenas gruesas, abundantes fósiles, calcarenitas y margas. Su espesor aproximadamente es de 164 pies.

La subunidad Mioceno Medio: Presenta reflectores paralelos extensos, bien definidos, poco distorsionados por procesos secundarios, discordancias internas y/o superficies de erosión. La litología presente en esta subunidad es; calizas dolomitas a limosa, margas, cresta, y areniscas de granos finos. Su espesor aproximadamente es de 328 pies.

La subunidad Mioceno Inferior: Presenta reflectores similares, amplitud media, con picos de frecuencia, distorsiones en algunos tramos, se alternan zonas transparentes con otras, con reflectores bien definidos, superficies de erosión dentro del intervalo. La litología presente en esta subunidad es; turbiditas calcáreas, calizas bioclásticas microfósilíferas y crestas. Su espesor aproximadamente es de 656 pies.

Oligoceno: Presenta una litología constituida predominantemente de hemipelagitas de composición biogénica, nanofósiles y foraminíferos, marga, turbiditas calcáreas distales y arcilla. Se considera que las rocas que conforman estas unidades de edad Oligoceno son sello bastante homogéneo. Mientras que el carácter sísmico de dichas unidades consta de reflectores paralelos, buena expresividad, amplitud variable, las más altas frecuencias en la base del intervalo, muy pocos sectores distorsionados por

procesos secundarios, que se limitan a horizontes específicos. Cuenta con un espesor de 554 pies.

Eoceno: El Eoceno en esta área tuvo similar estilo depositacional al Neógeno, el Eoceno tienen el más alto contenido de sílice biogénico y muy importantes estructuras de colapso, posiblemente relacionadas a la actividad tectónica ocurrida durante este época. La litología predominante de esta unidad consiste de turbiditas distales, hemipelagitas y lutitas de la secuencia Bouma, margas, cretas, sedimentos lutíticos, arcillas, conglomerado calcáreo con matriz de creta, pedernal, brechas calcáreas y posible presencia local de dolomita. Cuenta con un espesor total aproximado de 2.575 pies.

Esta unidad puede considerarse excelente sello de naturaleza homogénea, principalmente en rocas de edad Eoceno Medio, mientras que la calidad de sello sigue siendo buena en rocas de edad Eoceno Inferior pero puede interrumpirse por clastos fracturados. Las rocas de edad Eoceno Superior se caracterizan por ser reservorio malo por los sedimentos pelíticos que no alcanzan buen sello por posibles cretas fracturadas. De acuerdo a la edad de las rocas, las características sísmicas de esta unidad pueden ser divididas de la siguiente manera:

La subunidad Eoceno Superior: Presenta algunos reflectores de gran amplitud hacia la base, disminuyendo hacia el tope, fuertes horizontes paralelos, transparentes en algunos tramos. La litología predominante en la zona está constituida por calizas hemipelágicas lodosas, margas y cretas con bioclastos deformes, granos finos con ripios bentónicos. Tiene un espesor aproximado de 640 pies.

La subunidad Eoceno Medio: Contiene un grueso paquete de reflectores de gran expresividad dinámica, amplitudes altas a medias hacia la base de la secuencia y altas frecuencias hacia la parte superior, intervalo muy bien preservado de distorsiones. La

litología que predomina en esta subunidad son de turbiditas distales calcáreas con lutitas, lodolitas, margas bioclitos y dolomitas. Tiene un espesor aproximado de 1.444 pies.

La subunidad Eoceno Inferior: Posee fuertes variaciones de amplitud, reflectores continuos interrumpidos por tramos, superficies internas de erosión y buena preservación de la acción de procesos secundarios. Cuenta con litología de capas de calizas hemipelágicas, lodolitas, lutitas calcáreas, intercalado de conglomerados y brechas. Tiene un espesor aproximado de 492 pies.

Paleoceno: En esta unidad subyace una secuencia compleja de sedimentos turbidíticos. Esta caracterizada por turbiditas calcáreas proximales, margas, lodolitas, conglomerados y brechas clastos calcáreo con matriz de cresta. Su espesor es de 886 pies aproximadamente. Desde el punto de vista sísmico, esta unidad muestra bajas a moderadas amplitudes, reflectores continuos, picos y valles de frecuencia que indican sedimentos bien estratificados, baja expresividad dinámica casi transparente, espesor variable de la secuencia, menor sobre los altos del Cretácico y mayor en los valles y sobre las zonas de paleocanal.

Cretácico: Esta unidad se encuentra dividida en superior e inferior; donde la unidad superior se subdivide en; Maestrichtiano, Campaniano y Cenomaniano, mientras que el nivel inferior se subdivide en Aptiano. Cuenta con un espesor total de 5.643 pies.

Cretácico Superior: Está constituido por delgadas capas de cretas turbidíticas de edad Maestrichtiano. Existe la ausencia del Cenomaniano superior al Campaniano, sección condensada de capas limitadas por discordancias de edad Campaniano y Santoniano. El espesor de esta unidad es de 3.248 pies.

Esta unidad muestra una alternancia rítmica de caliza de color claro masiva, homogénea y caliza arcillosa algo oscura, la fuerte bioturbación ha destruido gran parte de las estructuras sedimentarias primarias, calizas margosas, se presentan fragmentos de radiolarios, equinodermos, moluscos, peloides, foraminíferos y algas verdes. La unidad también está caracterizada por rasgos de deformación y pequeñas fallas.

Las rocas de edad Cretácico Superior se caracterizan por ser el principal y excelente reservorio de hidrocarburo de esta cuenca debido a sus diversos rasgos como lo es la porosidad móldica, intercrystalina, cavernosa, intergranular, vugular, fracturas y estololitos corroídos.

La expresión sísmica de las rocas de edad **Maestrichtiano** se resalta por un tope dado por fuerte discordancia angular formada por horizonte poco definido debido al alto grado de distorsión, donde se presentan microdifracciones y otros efectos que indican una superficie muy irregular. Se perciben capas de calizas dolomíticas compactas de texturas granular soportado por matriz de cresta y lodolitas intercaladas con calizas arrecifales. Su espesor es de 623 pies.

Las rocas de edad **Campaniano** poseen reflectores de fuerte amplitud, con picos y valles bien expresados, fuertemente distorsionados e interrumpidos por tramos, por la aparición de áreas transparentes. Cuenta con capas de calizas compactadas con intercalaciones de dolomitas y brechas de micras. Su espesor es de 1.280 pies aproximadamente.

Por último, el carácter sísmico de las rocas de edad **Cenomaniano** es similar al anterior, con picos y valles de amplitud moderada y reflectores ligeramente mejor organizados, aparición frecuente de zonas transparentes y una base con poca expresión dinámica. Su espesor es de 1.345 pies aproximadamente.

Cretácico Inferior: Se presentan secciones gruesas más o menos cíclicas de carbonatos: calcarenitas aloquímicas con intercalaciones de caliza pelágica, cantidades variables de fragmentos carbonáticos biogénicos derivados de plataforma, se caracteriza por capas de calizas dolomíticas arenosas, granos gruesos tipo dolosparita intercalada de calizas cretosa con laminaciones.

Además, esta unidad constituye buen reservorio de hidrocarburos por su porosidad vugular, cavernosa, fracturas y estilolitos corroídos. Las características sísmica de esta unidad son similares a las de las rocas de edad Cretácico Superior, con la esporádica aparición de reflectores internos fuertemente expresados, con similares parámetros de amplitud, y algunas geometrías contra el tope del Titoniano, además, cercanas estructuras en “V” favorecen migración de hidrocarburos.

Jurásico: la unidad se encuentra dividida en Jurásico Superior y a su vez esta se subdivide en **Tithoniano**. Su tope es a partir de 18.372 pies.

La columna estratigráfica que se espera perforar para el pozo exploratorio RR-1X, se muestra a continuación.

Columna Tipo				
SISTEMA	SERIE	PROF. (metros)	FACIES DE POSICIONAL	
NEOGENO	FONDO MARINO		2160	Calizas bioclásticas, cavernosas, Cretas, arenas gruesas.
	PLIOCENO		2300	Turbiditas calcáreas de alta energía
	MIOCENO	SUPERIOR	2350	
		MEDIO	2450	Mudstone-wackestone, margas, Calizas organogénicas, cretas, Areniscas de grano fino.
		INFERIOR	2650	Turbiditas calcáreas, Calizas organogénicas, cretas.
PALEOGENO	OLIGOCENO		2825	Turbiditas calcáreas distales, Margas, mudstones, sedimentos lutíticos.
	EOCENO	SUPERIOR	3020	Hemipelagitas, margas, cretas, debris de bioclastos
		MEDIO	3460	Turbiditas distales, sedimentos lutíticos (siltstones-shales), arcillas, margas, mudstones, debris de bioclastos. Posible presencia local de dolomita.
		INFERIOR	3610	Hemipelagitas y mudstones de la secuencia Bouma, lutitas, arcillas, conglomerado calcáreo con matriz de creta, pedernal, brechas calcáreas.
	PALEOCENO		3880	Turbiditas calcáreas proximales, cretas, arcillas, conglomerados cretosos.
CRETACICO	SUPERIOR	Maestrichtiano	4070	Creta, packstones y grainstones, dolomitas. Flujo de escombros de procedencia arrecifal (brechas, calcarenitas), floatstones de ruditas.
		Campaniano	4460	Creta, packstones y grainstones, intercalaciones de dolomita y brechas hacia la base. Clastos de micrita.
		MCU	4870	Creta con peloides, grainstones ooidales y oncooidales, packstones, dolomita sucrosa porosa hacia el tope.
	INFERIOR	Aptiano	5600	Dolosparita, localmente sucrosa, caliza cretosa laminada
		Titoniano		Carbonatos de plataforma inundada: Mudstones y wackeestones con intercalaciones de lutitas bituminosas y algún pedernal y dolomita.
JURASICO	SUPERIOR			

Fig. III.5. Columna Estratigráfica del Pozo Exploratorio RR-1X

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

III.8. DISEÑO DEL POZO ^[25, 26]

Para diseñar un pozo de petróleo o gas, se deben conocerse los esfuerzos a la cual estará sometida las tuberías de revestimiento y las diferentes características a usarse para cada una de ellas. Al introducir una tubería en el hoyo, estará sometida simultáneamente a tres esfuerzos principales, los cuales son:

- **Esfuerzo a la Tensión;** originado por el peso que ejerce la sarta.
- **Esfuerzo al Colapso;** originado por la presión de la columna hidrostática ejercida hacia la tubería.
- **Esfuerzo al Estallido;** originada por la presión del fluido en el interior de la tubería.

Habría que tomar en cuenta además los factores de diseño, conocidos como factores de seguridad, y que varían según el área y el criterio del diseñador. Lo que se debe tener siempre en mente es, que por lo menos el diseño sea seguro. El factor de diseño utilizado por PDVSA, se puede observar en la tabla III.4., que se muestra a continuación.

Tabla III.4. Factores de Diseño, PDVSA

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

Revestidores	Colapso	Estallido	Tensión	Compresión	VME
Conductor	1,0	-	-	-	-
Superficie	1,0	1,1	1,6	1,3	1,25
Intermedio	1,0	1,1	1,6	1,3	1,25
Productor	1,1	1,1	1,6	1,3	1,25
Tubería de Producción	1,1	1,1	1,6	1,3	1,25

III.8.1. Puntos de Asentamientos

Fase I: Se estima perforar un hoyo de 42 pulg y asentar el revestidor conductor de 36 pulg aproximadamente 329 pies, por debajo del lecho marino (Zapata de 36 pulg a 7.415 pies), en esta zona se estima encontrar una formación poco consolidada con posible presencia de calizas bioclásticas, cretas y arena de grano grueso correspondiente al Plioceno.

Fase II: Luego se perforará un hoyo de 26 pulg hasta 9.293 pies (profundidad de asentamiento del próximo revestidor 20 pulg), para proteger el pozo de influjo de gas o agua presurizada en esas formaciones someras, en esta sección se estima atravesar el Mioceno y el Oligoceno, el cual está conformado principalmente por turbiditas calcáreas, cresta de nanofósiles y calizas organogénicas.

Fase III: Para la siguiente etapa se estima perforar con una mecha Bycenter de 17 pulg, que formará un hoyo de 20 pulg hasta una profundidad de 11.025 pies y posteriormente bajar un *liner* de 16 pulg, que será colgado a 7.268 pies y asentado a una profundidad de 11.000 pies, en esta etapa se estimara atravesar las formaciones del Eoceno Superior y Medio.

Fase IV: Luego se perforará un hoyo de $17^{1/2}$ pulg, con mecha *Bycenter* de 14 pulg formando un hoyo de $17^{1/2}$ pulg, como se menciono anteriormente hasta la profundidad de 12.325 pies, para bajar un revestidor de $13^{3/8}$ pulg, atravesando las formaciones del Eoceno Superior y Paleoceno, es importante destacar que la profundidad de asentamiento de este revestidor intermedio es de suma importancia ya que será asentado en el tope de la formación Cretácico Superior ó formación de interés.

Fase V: Se perforará hasta una profundidad de 14.657 pies con un hoyo de 12^{1/4} pulg, y luego asentar un revestidor de 9^{5/8} pulg en el marcador MCU colocando la zapata a 14.632 pies, con el cual se estaría aislando el objetivo de interés (Cretácico Superior).

Fase VI: Luego se perforará un hoyo de 8^{1/2} pulg hasta la profundidad final planificada de 16.757 pies, para finalmente colgar a 14.432 pies un liner de producción de 7 pulg, que se asentara a 16.732 pies atravesando parte del Cretácico Superior específicamente (Cenomaniano), y Cretácico Inferior.

A continuación se muestra el esquema de completación que presentara el pozo exploratorio RR-1X, con sus respectivos puntos de asentamiento y características de cada uno de los revestidores que conforman al pozo en estudio (ver Fig. III.6).

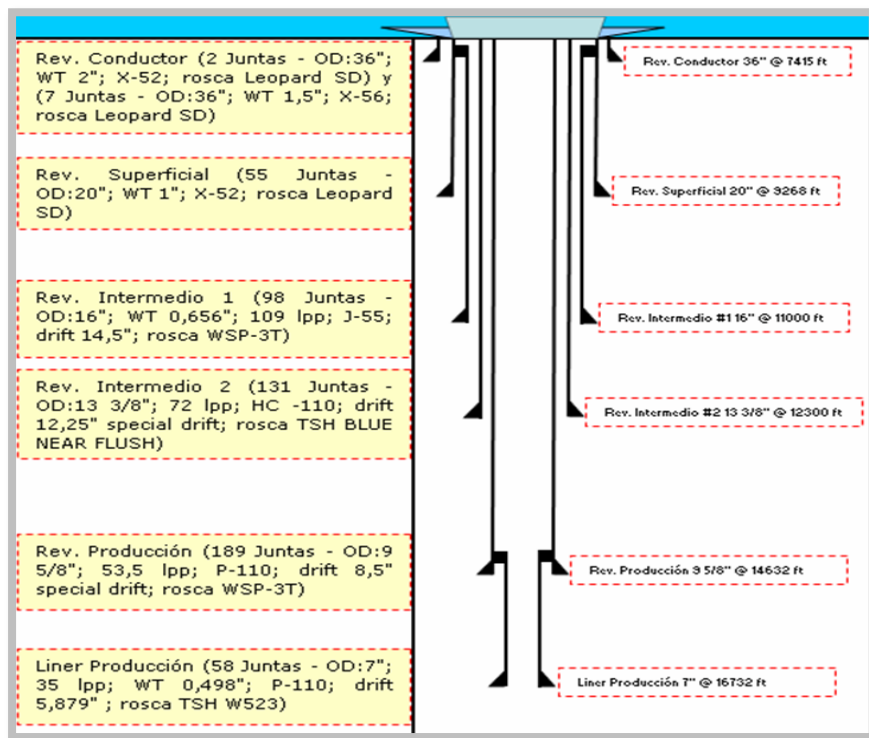


Fig. III.6. Esquema de Completación del Pozo Exploratorio RR-1X

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

III.9. ESTIMACIÓN DE GRADIENTE DE PORO Y FRACTURA

Para poder diseñar pozos seguro es necesario manejar las curvas de presión de poro y del gradiente de fractura, ya que para perforar un hoyo hidráulicamente estable, se debe mantener el peso del lodo de perforación entre la ventana operacional, que estas curvas reflejen. ^[22]

La estimación de las geopresiones para la localización RR-1X, perteneciente al Bloque 54, se realizó tomando en cuenta las velocidades interválicas provenientes de sísmica 3D corrida por PDVSA. Estos datos sirvieron de base para la determinación de los valores de Densidad, Presión de Sobrecarga, Presión de Poro y Gradiente de Fractura, que pueden presentar durante la perforación de cada una de las formaciones que se pretende atravesar, (ver Fig. III.7).

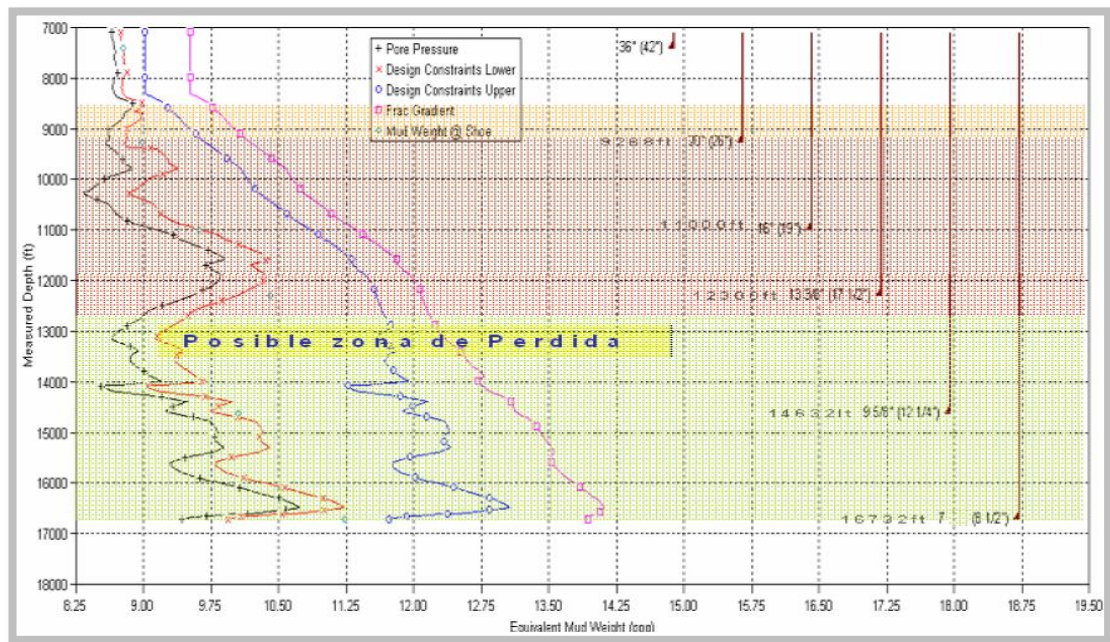


Fig. III.7. Curva de Presión de Poro y Gradiente de Fractura con el Esquema Final del Pozo Exploratorio RR-1X

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Ultra-Profundas PSPSA 2011.

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se dará a conocer cada una de las etapas que se efectuaron para cumplir con cada uno de los objetivos propuestos en el presente Trabajo Especial de Grado.

IV.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se desarrolló en el presente Trabajo Especial de Grado, según el diseño es de tipo documental informativa. La misma está caracterizada en la recopilar información relevante de diversas fuentes confiables sobre un tema en específico, sin tratar de aprobar u objetar alguna idea o postura toda la información presentada se basó en las fuentes bibliográficas encontradas.

Este tipo de investigación se obtuvo debido a que se seleccionó, organizó y analizó diferentes tipos de documentos escritos y digitales, tales como libros, revistas, reportes, artículos técnicos, entre otros; que permitió obtener temas de interés concerniente a la cementación de pozos petroleros en ambientes de aguas Someras, Profundas y Ultra-profundas.

Según Arias Fidias (2006, p.27): “la investigación documental es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, críticas e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas. Como en toda investigación, el propósito de este diseño es el aporte de nuevos conocimientos” ^[27].

A su vez, esta investigación puede ser de tipo aplicada, caracterizándose por la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos durante su elaboración. En esta ocasión se ejerció los fundamentos teóricos que permitieron llevar a cabo la propuesta y elaboración de un programa de cementación en ambiente costa afuera.

IV.2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la elaboración de este Trabajo Especial de Grado, se utilizó una metodología basada en el esquema que se presenta a continuación (ver Fig. IV.1), apoyándose en cuatro etapas fundamentales esto para cubrir exitosamente los objetivos del presente Trabajo de Investigación; estas etapas son: Captura de Información, Planteamiento de las Lechadas, Evaluación de Parámetros Operacionales y Propuesta de Cementación.

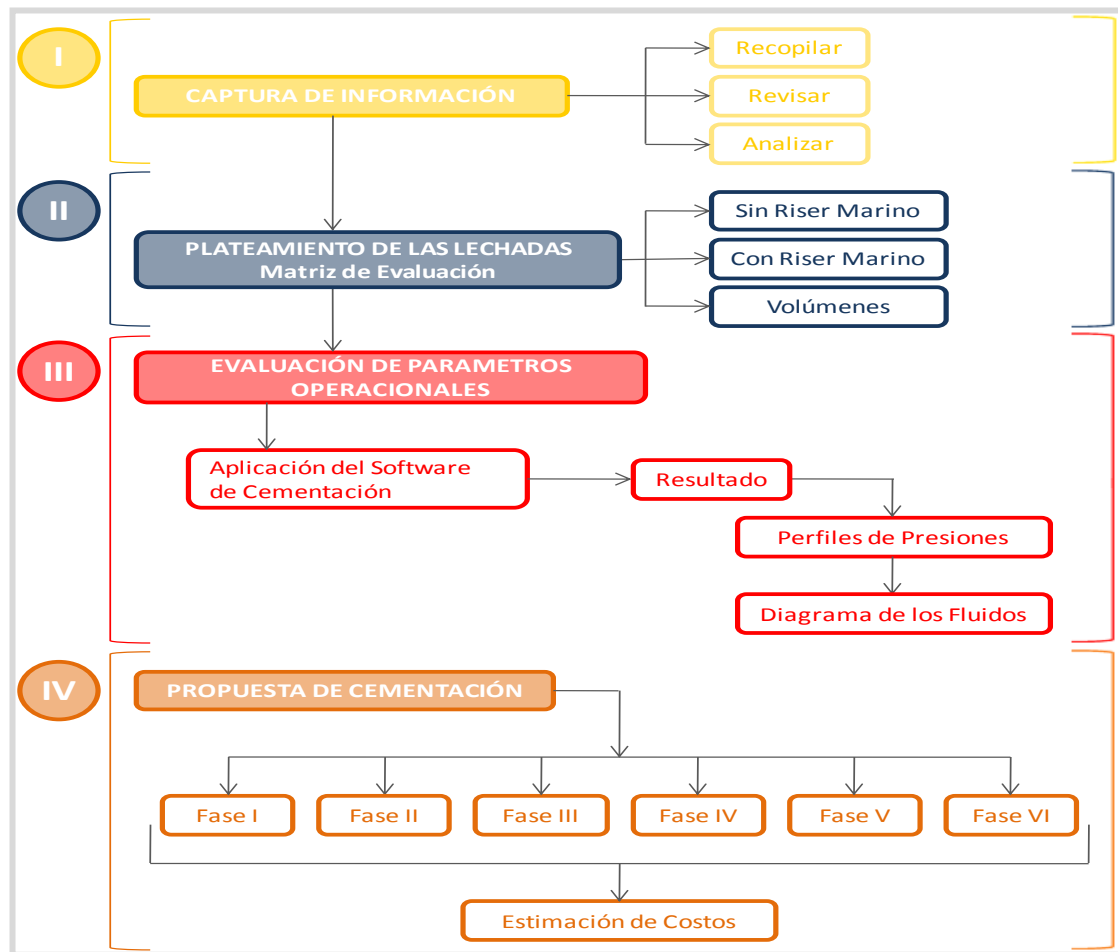


Fig. IV.1. Esquema de la Metodología

IV.2.1. Captura de Información

Para el desarrollo de cada uno de los objetivos planteados se hizo necesario realizar una revisión y recopilación de la bibliografía consultada acerca de todos los aspectos relacionados a terminación y cementación de pozo en aguas Someras, Profundas y Ultra-profundas, así como la data de los pozos perforados en zonas del Golfo de México, lo cual permitió comprender y entender los parámetros involucrados en el presente Trabajo Especial de Grado.

Esta primera etapa se desarrolló el análisis de toda la información relacionada con las posibles características litoestratigráficas de las fases, donde se suministra la descripción de cada una de las arenas incluyendo las arenas prospectivas (espesores, porosidad, permeabilidad, arcillosidad), además de los fluidos (agua, petróleo y gas), que allí se encuentren y otros datos geológicos de interés.

Este segmento es de suma importancia ya que ofreció una visión global de como es la formación, y de esta manera, poder obtener resultados confiables de cómo interactúan los fluidos de origen interno y externo al estar en contacto con ésta, para así lograr determinar un fluido de perforación óptimo que ofrezca un fácil lavado y remoción de lodo y ripios preparando al hoyo para una cementación más eficiente.

Adicionalmente se analizó la arquitectura del pozo exploratorio, que a través de ella se puede tener datos relacionado a las características de los revestidores (ver tabla IV.1), además de los diámetros; de los hoyos, externos e internos del revestidor, que permitirán realizar los cálculos pertinentes para determinar los volúmenes de las diferentes lechadas de cementos que serán bombeadas al pozo para la construcción y estabilidad del mismo.

Tabla IV.1. Característica de los Revestidores.

Fuente: Proyecto Exploratorio en Aguas Profundas PSPSA 2011

Diámetro [pulg]	Grado	Conexión	Presión de Colapso [psi]	Presión de Estallido [psi]	Diámetro Interno [pulg]	Diámetro de Drif [pulg]
36	X-56	Leopard SDEF	2.692,4	4.083	33,00	32,01
20	X-56	Leopard SD	2.144,8	3.675	18,50	18,31
16	J-55	WSP 3T	2.560	3.950	14,68	14,50
13 ^{3/8}	HC-110	TSH BKUE NEAR	3.890	7.400	12,35	12,25
9 ^{5/8}	P-110	WSP 3T	7.950	10.900	8,53	8,5
7	P-110	TSH W523	13.030	13.700	6,00	5,88

IV.2.2. Planteamiento de las Posibles Lechadas de Cemento

Una vez analizadas las características litoestratigráficas y el diseño del pozo se planteó para cada una de las secciones las posibles lechadas de cemento que mejor se adaptaran a las condiciones del pozo, donde por medio de evaluación de matrices se seleccionó aquella que arrojó mayor ponderación, para así continuar con el cumplimiento de los objetivos.

La matriz de evaluación se realizó tomando en cuenta los rangos de profundidad y temperaturas que se manejaban para cada fase, donde los parámetros fundamentales evaluados en las matrices fueron; tipo de lechada, tipo de cemento, densidad y aditivos, permitiendo determinar y seleccionar la lechada de cemento más óptima para cada sección del pozo.

A continuación se muestra el modelo de la matriz de evaluación que se empleó para cada una de las fases (ver tabla V.2), donde se seleccionó la matriz que arroje la mayor ponderación.

Tabla IV.2. Modelo de la Matriz de Evaluación

Propuesta de Cementación		
T: [°F]	Prof.: [ft]	Ponderación
Lechada	-	-
Cemento	-	-
ρ [lb/gal]	-	-
Aditivos	-	-

Mientras que los valores ponderados que permitieron evaluar y seleccionar el mejor escenario para el planteamiento de las lechadas, fue el siguiente (ver tabla V.3).

Tabla IV.3. Valores para la evaluación de lechadas

Excelente	3
Buena	2
Regular	1

Es importante destacar que las matrices de evaluación se realizaron basándose en experiencias y trabajos exitosos realizados en zonas costa afuera de aguas Someras, Profundas y Ultra-profundas, específicamente del Proyecto Gran Mariscal Sucre (Campos Dragón 4 – 5A – 6 – 7), Proyectos en el Golfo de México; *Green Canyon* (Campo Marco Polo, Bloques 243 – 593), *Mississippi Canyon* (Campo Matterhorn).

Luego de realizar un estudio acerca de los proyectos antes mencionados, relacionado a la práctica y técnica de cementación primaria en ambientes costa afuera tanto en campos venezolanos como en bloques del GOM, se plantearon dos escenarios que

servirán de modelo a seguir, permitiendo la innovación de una mejor técnica de cementación en zonas de aguas Ultra-profundas. El primero de ellos es para las fases que no contengan *Riser Marino* (Sin *Riser Marino*), mientras que el segundo es para aquellas fases las cuales tengan en su proceso de cementación *Riser Marino*.

IV.2.2.1. Sin *Riser Marino*

La cementación Sin *Riser Marino* se cumple para las dos primeras fases del pozo, en donde por medio de una sarta interna (*Inner String*), se realizará el proceso de cementación colocada a (+/- 30 pies) de la zapata para evitar que esta quede cementada, estas fases cuentan con formaciones poco consolidadas, temperaturas cercanas al punto de congelación con bajas presiones de poros y de gradiente de fracturas, sumado a peligrosas relaciones con el flujo de fluidos (Agua-Gas) provenientes de zonas someras que permiten dificultar la construcción del pozo.

Debido a estas condiciones hostiles y a las grandes fuerzas axiales que son ejercidas en estas fases, es de suma importancia tener un aislamiento zonal entre el revestidor-formación y de esta manera garantizar la estabilidad del hoyo creando una excelente base que permitirá soportar el peso del Cabezal Submarino, BOP y *Riser Marino* que serán conectados a partir de la tercera fase.

Posible Lechadas de Cemento: Para la primera fase (Hoyo Conductor), de acuerdo a sus características litoestratigráfica y a los trabajos de cementación realizados de manera exitosa no solo en aguas Ultra-profundas sino también en ambientes de aguas Someras y Profundas, se determinaron las posibles lechadas de cemento que podrían ser ajustadas y aplicadas para esta fase, (ver tabla IV.4).

La selección de esta lechada se realizó evaluando 4 matrices, donde la que arrojó la mayor puntuación fue la matriz seleccionada (ver Apéndices I).

Sin embargo, para la segunda fase (Hoyo Superficial) se han implementado lechadas de cemento de manera satisfactoria (ver Apéndices I), donde a través de ellas y la mezcla de algunos aditivos especiales se plantearon las posibles lechadas que permitirán soportar las complicadas condiciones de esta fase del pozo, al igual que la sección anterior se evaluaron cuatro matrices donde fueron seleccionadas la de mayor puntuación (ver tabla IV.4).

Tabla IV.4. Resumen de Evaluación de las Matrices para las fases Sin *Riser* Marino

Fases	Intervalo [pies]	Lechadas	Ponderación
		I.1	11
Hoyo Conductor	7.086 - 7.440	I.2	11
42 pulg		I.3	9
		I.4	9
		II.1	11
Hoyo Superficial	7.086 - 9.293	II.2	6
26 pulg		II.3	9
		II.4	9

Cálculos de Volúmenes Teóricos: Para el cálculo de volumen en barriles de las lechadas de cementos se implementaron las ecuaciones mostradas en el Capítulo II, Ecu. II.2 y Ecu. II.3. Estas ecuaciones fueron fundamentales para la realización de los cálculos; tanto de capacidades como de volúmenes para cada una de las respectivas fases que conforman la estructura del pozo, tomando en consideración 25 pies de bolsillo para cada fase del pozo en estudio (ver Apéndice II).

Para el Hoyo Conductor de 42 pulg, se calcularon dos volúmenes teóricos donde el volumen 2 fue calculado con un exceso de 300% del teórico debido a la complejidad de la fase y a experiencias exitosas obtenidas en ambientes de aguas Someras, Profundas y Ultra-profundas, lo cual resultó un volumen total para esta sección de 610 Bls de lechadas de cemento (ver Capítulo V, tabla 7).

Sin embargo, para la fase II Hoyo Superficial de 26 pulg, se calcularon tres volúmenes de lechada de cemento y se obtuvo un volumen total 1.714 Bls, es importante destacar que el volumen 2 fue calculado con un 200% del volumen teórico esto al igual que la primera fase debido a las condiciones de arenas poco consolidadas que se encuentran para estas dos primeras fases (ver Capítulo V, tabla 8). El alto porcentaje de exceso se tomó con la finalidad de tener retorno de cemento al lecho marino, ya que estas secciones están expuestas a tener alta pérdida de fluidos.

IV.2.2.1. Con *Riser* Marino

La cementación de las 4 fases restantes son Con *Riser* Marino, el cual servirá de conexión entre la plataforma y el pozo, donde su función primordial es transportar los fluidos de perforación desde el cabezal del pozo hasta la superficie marina atravesando la correspondiente columna de agua y evitando con esto el derrame del lodo al lecho marino.

Posibles Lechadas de Cemento: Para las fases III y IV, que comprenden los Hoyos Intermedios son zonas de buen sello, es decir, secciones muy bien compactadas. Donde por medio de estas características litológicas y por experiencias de campo para este tipo de hoyos en zonas costa afuera se obtuvo dos lechadas de cemento.

Donde por medio de los resultados arrojados por las dos matrices evaluadas se obtuvo la lechada de cemento que mejor se adaptó a las condiciones de esta fase (ver tablas IV.5.).

Mientras que, para el Hoyo Intermedio 2 se evaluaron cuatro matrices cuyas ponderaciones muestran que las lechadas de cementos pueden adaptarse de manera satisfactoria a esta sección del pozo (ver Apéndices I).

Tabla IV.5. Resumen de Evaluación de las Matrices para las fases Con *Riser* Marino
(Hoyos Intermedios)

Fases	Intervalo [pies]	Lechadas	Ponderación
		III.1	12
Hoyo Intermedio 1	9.293 - 11.025	III.2	12
20 pulg		-	-
		-	-
		IV.1	11
Hoyo Intermedio 2	11.025 - 12.325	IV.2	11
17 1/2 pulg		IV.3	10
		IV.4	10

Para la fase V (Hoyo Productor 1) que cuenta con condiciones de temperaturas moderadas, posibles zonas de pérdida de circulación asociadas a cavernas arrecífales y fracturada, se evaluaron cuatro matrices que permitió la escogencia de la posible lechada de cemento para esta sección (ver Apéndice I).

Para la fase finalizar Hoyo Productor 2, a diferencia de la anterior se espera atravesar arenas con una rápida penetración y pérdida momentánea de circulación asociada a zonas cavernosas, para esto se planteó tres matrices de evaluación (ver tabla IV.6) y se determinó la lechada de cemento más optima para esta sección.

Tabla IV.6. Resumen de Evaluación de las Matrices para las fases Con Riser Marino
(Hoyos Productores)

Fases	Intervalo [pies]	Lechadas	Ponderación
		V.1	11
Hoyo Productor 1	12.325 - 14.657	V.2	10
12 1/4 pulg		V.3	7
		V.4	7
		VI.1	11
Hoyo Productor 2	14.657 - 16.757	VI.2	10
8 1/2 pulg		VI.3	7

Cálculos de Volúmenes Teóricos: Para la fase de 20 pulg, al igual que la sección anterior se calcularon tres volúmenes de lechada de cemento con un total de volumen de 362 Bls. Sin embargo para la fase de 17^{1/2} pulg el volumen total fue de 231 Bls. Donde se destaca para ambas fases que el volumen 2, fue calculado con un incremento del 25% del volumen teórico (ver Capítulo V, tablas V.9 y V.10).

Para la fase de 12^{1/4} pulg se obtuvo un volumen total de 204 Bls. Mientras que, para la fase final de 8^{1/2} pulg su volumen teórico fue de 69 Bls, destacando que el volumen 2, para ambos casos fue calculado con un incremento del 30% del volumen geométrico calculado (ver Capítulo V, tablas V.11 y V.12).

IV.3. EVALUACIÓN DE PARÁMETROS OPERACIONALES

Esta etapa consistió en recibir las instrucciones y adiestramiento por parte de los especialistas del software de simulación, para así obtener un mayor entendimiento y comprensión del mismo, con la finalidad de ajustar los parámetros operacionales que permitió proponer la lechada de cemento más óptima para el pozo en estudio RR-1X.

IV.3.1. Aplicación del Software de Cementación (*OptiCem*)

Por medio de la aplicación del software se pudo determinar en tiempo real la densidad equivalente de circulación (ECD) con volúmenes reales y velocidades de empleo, tasa de desplazamiento, densidad de los fluidos y la centralización de tuberías de revestimiento para cada una de las fases que conforman el pozo exploratorio RR-1X. Finalmente se realizó la evaluación técnica de los resultados obtenidos y con esta, la propuesta de las lechadas de cemento para cada una de las fases que conforman el pozo RR-1X.

Para la simulación del proceso de desplazamiento de los fluidos (lodo, espaciador, cemento, agua de mar) y el esquema de centralización se utilizó el módulo de cementación *OptiCem*, empleado por PDVSA Servicios. Esta herramienta computacional se encuentra estructurada de manera secuencial permitiendo la facilidad su aplicación.

La misma consta de varias secciones, de las cuales se describirán a continuación:

IV.3.1.1. Datos Generales

En esta sección se define la información sobre el pozo a cementar, a demás permitió definir las condiciones para la operación de cementación. En estas ventanas se dividen las secciones: Opciones, Información del trabajo y Comentarios (Ver Figura IV.2).

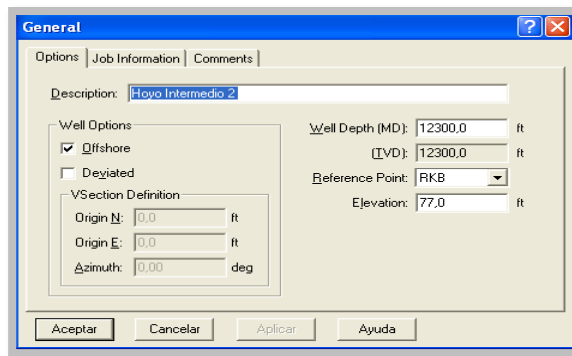


Figura IV.2. Datos Generales

1. Para la subdivisión Opciones: se suministró la descripción del pozo que se va a cementar, aunado a las opciones del pozo, profundidad de asentamiento del revestidor, distancia que existe desde la plataforma hasta el nivel del mar. En este caso se aplicó en costa afuera (*offshore*) y se asumió un pozo totalmente vertical.
2. Para la subdivisión Información del trabajo: se suministró información sobre el diámetro de la tubería a cementar, tipo de trabajo, descripción y fecha de aplicación.

IV.3.1.2. Costa Afuera (*Offshore*)

Esta sección reflejó el tipo de pozo y la columna de agua que debería cubrir el *riser* marino. Para este caso en presencia de aguas Ultra-profundas donde la columna de agua es aproximadamente 7.086 pies (ver figura IV.3).

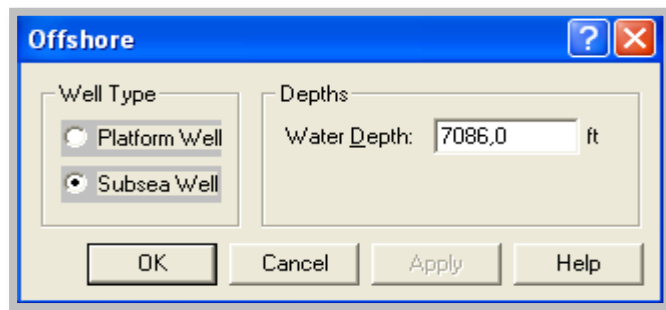


Figura IV.3. Costa Afuera

IV.3.1.3. Editar el Pozo

En esta sección se suministraron datos referentes al diámetro externo e interno del *riser* marino, revestidor anterior y sobre el hoyo que será cementado, especificando las características que presenta el revestidor. Es importante acotar la secuencia a la cual se suministraron los datos, así como se muestra en la figura IV.4.

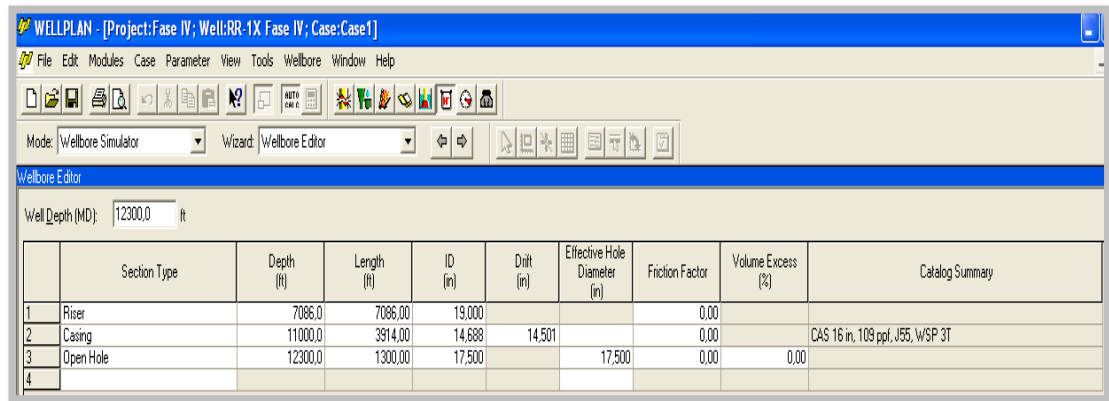


Figura IV.4. Editar el Pozo

IV.3.1.4. Esquema Mecánico del Pozo

Para esta sección se suministraron los datos referentes al tipo de revestidor a cementar. Tomando en cuenta de manera similar a la sección anterior la secuencia a la cual se suministraron los datos de las tuberías (*Top of Bottom*). (Ver figura IV.5)

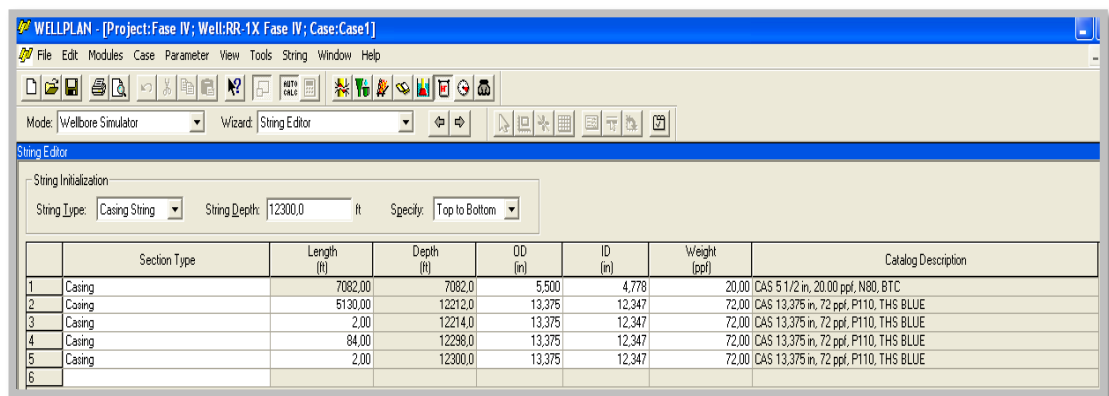


Figura IV.5. Esquema Mecánico del Pozo

IV.3.1.5. Editar los Fluidos

La sección se encuentra dividida en dos ventanas operacionales: Fluidos y Cementos. Para ambos casos se debió suministrar los datos reológicos pertinentes o esperados de cada fluido, bien sea lodo, espaciador o lechada. Es importante reflejar que los datos del lodo de perforación fueron suministrados por el departamento de fluido (ver figura IV.6).

Datos que cargados en esta sección:

- Compañía operadora.
- Campo ó Bloque.
- Tipo de Fluido (Lodo, Espaciador, Lechada, Agua de Mar).
- Densidad de la lechada [lb/gal].
- Datos Reológicos.
- Temperatura Estática BHST [°F].
- Agua requerida [gal/sc].*
- Rendimiento [pies³/sc].*

* Solo para la ventana de Cemento

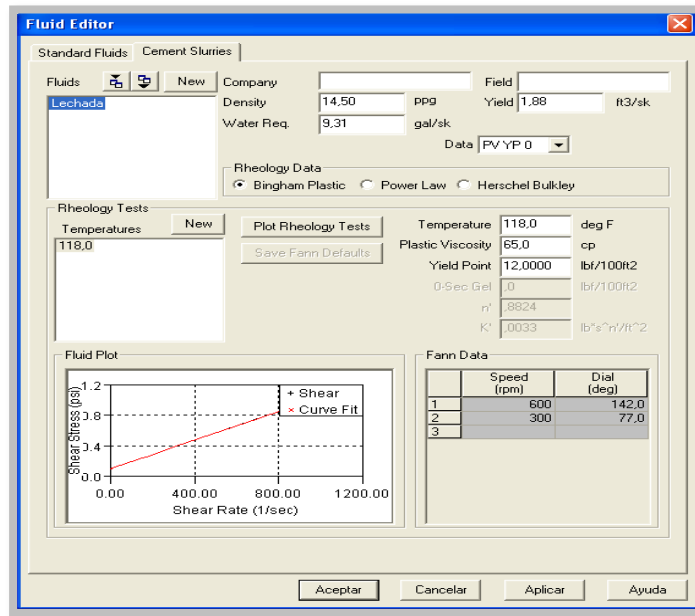


Figura IV.6. Editar los Fluidos (Lechada de Cemento)

IV.3.1.6. Centralización de la Tubería

En esta sección del programa se suministraron los datos referentes a los tipos de centralizadores, diámetros u otras característica adicional que presente el centralizador a implementar, con la finalidad que adquirir el mayor porcentaje de *Stand Off* de la tubería, para que esta quede bien centralizada en el hoyo. Produciendo una mejor cementación del pozo (ver figura V.10).

Datos suministrados en esta sección:

- El *Stand Off* ó da la opción de ser calculado.
- Perfil de los Fluidos: fluidos en el hoyo, densidad del lodo de perforación.
- Distancia límite entre cada centralizador: máxima y mínima distancia.
- Tope del Cemento.

- Tipos de Centralizadores.

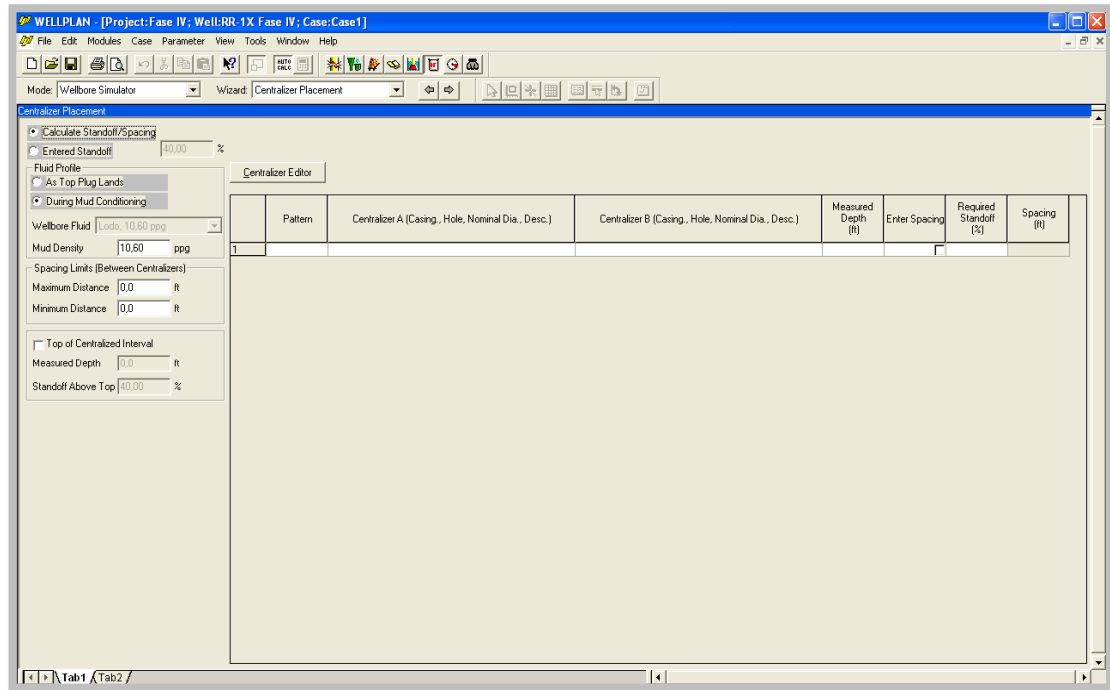


Figura IV.7. Centralización de la Tubería

IV.3.1.7. Datos de Trabajo

En esta sección se suministró de manera secuencial cada una de las operaciones para la cementación de la fase.

Datos cargados en esta sección:

- Tipo de Trabajo.
- Tipo de Fluido (Lodo, Espaciador, Cemento, Fluido de Desplazamiento).
- Tasa de Bombeo [Bls/min].
- Tiempo de asentamiento de los tapones (Inferior-Superior) [min].

- Volumen [Bls].
- Tope del Fluido [pies].
- Longitud del Trabajo [pies].

WELLPLAN - [Project: Fase IV; Well: RR-1X Fase IV; Case: Case1]

File Edit Modules Case Parameter View Tools Window Help

Mode: Wellbore Simulator Wizard Job Data

Job Data

☐ Automatic Rate Adjustment Safety Factor 0.0 psi Mud Erodibility None

Tracer Fluid ☐ Use Foam Schedule ☒ Disable Auto-Displacement Calculation Fluid Editor

	Type	Fluid	Rate (bbl/min)	*Stroke Rate (spm)	Shutdown Time (min)	Placement Method	Volume (bbl)	*Strokes	Top of Fluid (ft)	Length (ft)	Bulk Cement (94lb sacks)
1	Wellbore	Lodo, 10.60 ppg	5.0	42.00		Volume	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
2	Shutdown		0.0	0.00	5.00		0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
3	Spacer/Flush	Espaciador, 11.60 ppg	5.0	42.00		Volume	70.0	588.0	8265.0	1955.6	0.00
4	Cement	Lechada, 14.50 ppg	2.0	16.80		Volume	10.0	84.0	10220.6	279.4	30.00
5	Cement	Lechada, 14.50 ppg	4.0	33.60		Top of Fluid	178.7	1501.3	10500.0	1800.0	534.00
6	Shutdown		0.0	0.00	5.00		0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
7	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	2.0	16.80		Volume	10.0	84.0	12232.5	67.5	0.00
8	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	12.0	100.80		Volume	439.0	3687.6	9268.1	2964.4	0.00
9	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	10.0	84.00		Volume	228.0	1915.2	7728.5	1539.6	0.00
10	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	8.0	67.20		Volume	137.0	1150.8	5221.8	2506.7	0.00
11	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	6.0	50.40		Volume	70.0	588.0	2065.4	3156.4	0.00
12	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	4.0	33.60		Volume	35.0	294.0	487.1	1578.3	0.00
13	Displacement	Agua de Mar, 8.60 ppg	2.0	16.80		Volume	10.8	90.7	0.0	487.1	0.00
14											

Figura IV.8. Datos de Trabajo

IV.4. PROPUESTA DE CEMENTACIÓN

Para esta etapa se planteó la propuesta final de cementación para el pozo RR-1X, siendo este el objetivo general del presente Trabajo de Investigación. Dicha propuesta fue desarrollada tomando en cuenta las características litoestratigráficas y parámetros importancia como:

- Presión de Poro.
- Gradiente de Fractura.
- Temperatura estática de fondo de hoyo (BHST).
- Temperatura de circulación de fondo de hoyo (BHCT).

A través de estos parámetros se seleccionaran los aditivos necesarios para la elaboración de las lechadas de cemento, ya que cada fase cuenta con litologías que varía significativamente.

La propuesta de cementación para todas las fases del pozo fueron elaboradas utilizando un esquema que permita tener una mejor comprensión y entendimiento en cuanto a la cementación primaria de pozos en ambientes de aguas Ultra-profundas, donde dicha propuesta será complementada con el diseño de la operación, el sistema de flujo, tren de pre-flujo, volumetría, y análisis del tiempo de las lechadas, con las centralizaciones respectivas de las fases que lo requieran, adicionalmente la aplicación del simulación *OptiCem* permitió ajustar todos estos parámetros y así obtener las lechadas de cemento más optimas y eficientes para cada una de las fases que conforma el pozo RR-1X.

IV.4.1. Estimación de Costos

En orden de estimar los costos de las lechadas de cemento se realizó una evaluación previa donde se mostraron los diferentes aditivos, materiales y equipos, que tienen el libre acceso a la zona donde se perforara el pozo, una vez conocidos se seleccionaron aquellos que mejor se adapten a las condiciones de cada fase, teniendo como referencia todos los componentes que serán implementados durante la cementación del pozo (ver tabla V.7, V.8 y V.9).

El costo utilizado para cada aditivo, material y equipo fue el resultado del promediado de los costos manejados en años anteriores por compañías de servicios. Para determinar el costo en bolívares se uso como precio de referencia dólar a 4,3 Bs ya que este es el valor que le asigna PDVSA a las divisa en este período.

Luego de manejar todo la información mencionada anteriormente, se procedió a realizar la estimación total de los costos para la cementación de cada una de las fases, donde se incluyen el personal, equipos, materiales y accesorios que serán implementados durante las operaciones de cementación (ver tablas IV.7, IV.8 y IV.9).

Tabla IV.7. Costos referenciales del personal y equipos para la cementación en costa afuera

Partidas	Unidad	Cant.	Balance Inicial de los Costos		
			Costo Unitario (2012)		Total
			Bs.	UU\$	Bs. Equiv.
Operador de Equipos de Cementación	Hora	1	296	0	296
Técnico de Cementación	Hora	1	205	0	205
Unidad de Cementación (Tasa de Operación)	Hora	1	5.511	4.543	25.046
Unidad de Cementación (Tasa de Espera)	Hora	1	235	194	1.069
Cabezal de Cementación (Tasa de Operación)	Hora	1	4.706	3.881	21.393
Cabezal de Cementación (Tasa de Espera)	Hora	1	48	42	227
Unidad de Aditivos Líquidos (Tasa de Operación)	Hora	1	1.984	1.552	8.659
Unidad de Aditivos Líquidos (Tasa de Espera)	Hora	1	14	11	62
Silo de Cemento a Granel (Unidad)	Hora	1	40	33	183

Tabla IV.8. Costos referenciales de los aditivos para la cementación en costa afuera

Partidas	Unidad	Cant.	Balance Inicial de los Costos		
			Costo Unitario (2012)		Total
			Bs.	UU\$	Bs. Equiv.
Cemento "H"	Sacos	1	37	32	175
Cemento Micro fino	Sacos	1	110	91	501
Silicato de Sodio (Líquido)	Galón	1	17	15	81
Cloruro de Calcio (Líquido)	Galón	1	15	13	70
Dispersante (Líquido) hasta 300°F BHCT	Galón	1	29	24	133
Retardador (Líquido) hasta 225°F BHCT	Galón	1	26	22	121
Antiespumante (Líquido)	Galón	1	78	64	351
Antimigratorio liquido hasta 225°F BHCT	Galón	1	43	36	199
Material para Perdida de Circulación hasta 300°F BHCT	Libra	1	9	8	41
Espaciador Base Agua	Barril	1	205	169	933

Tabla IV.9. Costos referenciales de herramientas y accesorios implementados para la cementación en costa afuera

Partidas	Unidad	Cant.	Balance Inicial de los Costos		
			Costo Unitario (2012)		Total
			Bs.	UU\$	Bs. Equiv.
Zapata Flotadora 36 pulg con Doble Válvula	Pieza	1	20.638	17.017	93.811
Zapata Flotadora 20 pulg con Doble Válvula	Pieza	1	19.052	15.708	86.596
Centralizadores Flexibles 20x26 pulg	Pieza	1	738	610	3.361
Stop Collar 20 pulg Integral	Pieza	1	255	211	1161
Zapata Flotadora 16 pulg	Pieza	1	6.338	5.226	28.808
Cuello Flotador 16 pulg	Pieza	1	7.193	5.930	32.691
Equipos de Flotación. REV, 13-3/8 pulg	Pieza	1	19.052	15.708	86.596
Centralizadores Flexibles 13 3/8 pulg	Pieza	1	235	194	1.068
Stop Collar 13 3/8 pulg Integral	Pieza	1	112	94	517
Equipos de Flotación. REV, 9-5/8 pulg	Pieza	1	12.390	10.215	56.317
Centralizadores Sólidos 9-5/8x12-1/4x10 pulg	Pieza	1	640	529	2.914
Stop Collar 9 5/8 pulg	Pieza	1	103	86	475
Equipos de Flotación. REV, 7 pulg	Pieza	1	11.180	9.252	50.963
Centralizadores Sólido 7x8-1/2x8 pulg	Pieza	1	596	492	2.713
Stop Collar 7 pulg Integral	Pieza	1	98	81	447

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta un análisis detallado de las Lechadas de Cemento propuestas para cada una de las fases del pozo exploratorio RR-1X. Es importante destacar que las lechadas propuestas deben ser llevadas a pruebas de laboratorio, para evaluar las propiedades reológicas y diseñar la lechada de cemento más optima para el pozo de estudio.

V.1. LECHADAS SELECCIONADAS

La selección de la lechada de cemento se realizó evaluando varios escenarios, a través de matrices de evaluación, donde la matriz que arrojó la mayor puntuación fue la lechada de cemento con la cual se trabajó durante el desarrollo del trabajo.

V.1.1. Fase I (Hoyo Conductor)

Para esta fase, de acuerdo a la los resultados que arrojaron las matrices de evaluación, se tiene que las Lechadas I.1 y I.2 (ver Apéndices I), son las lechada de cemento que poseen mayor ponderación siendo ambas lechadas ideales para esta sección con la diferencia que la Lechada I.1 contiene un aditivo antimigratorio que permite prevenir y resguardar la zona en caso que se presencia un influjo de gas (ver tablas V.1.a y V.1.b).

Tabla V.1.a. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase I: Hoyo Conductor

Propuesta Técnica		
T: [°F] [39-44]	Prof.: [ft] [7.086-7.415]	Ponderación
Lechada	Única Alivianada	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	12,5	2
Aditivos	Acelerador, Antimigratorio, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	11

Tabla V.1.b. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase I: Hoyo Conductor

Otra Propuesta Técnica		
T: [°F] [39-44]	Prof.: [ft] [7.086-7.415]	Ponderación
Lechada	Única Alivianada	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	12,5	2
Aditivos	Acelerador, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	11

Para el Hoyo Conductor se propuso utilizar una Lechada Única Alivianada (Propiedades Tixotrópicas), con una densidad de 12,5 lb/gal.

V.1.2. Fase II (Hoyo Superficial)

De acuerdo a los resultados arrojados por las matrices de evaluación se tiene que la Lechada II.1 (ver Apéndices I), es la lechada de cemento que resultó con mayor ponderación, a pesar que las Lechadas II.3 y II.4 se pueden aplicar para esta fase, pero se consideró la estrecha ventana operacional que se tiene para esta sección y no fueron seleccionadas. Adicionalmente es importante destacar que la Lechada II.4 es una lechada de cemento espumante y este es uno de los aditivos que no puede ingresar a la zona de construcción del pozo.

Tabla V.2. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase II: Hoyo Superficial

Propuesta Técnica		
T: [°F] [44-72]	Prof.: [ft] [7.086-9.268]	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H + Micro cemento	3
ρ [lb/gal]	12,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	11

Se propuso para el Hoyo Superficial la aplicación de una Lechada Única Alivianada (Antimigratoria Altamente Impermeable), con una densidad de 12,5 lb/gal.

V.1.3. Fase III (Hoyo Intermedio 1 *Liner*)

Para esta fase, las matrices evaluadas resultaron ideales y con la misma ponderación (ver Apéndices I), pero se seleccionó la propuesta técnica ya que esta presentó un aditivo adicional (extendedor), que permite reducir la densidad de la lechada, debido que a esta sección se propuso una lechada alivianada (ver tablas V.3.a y V.3.b).

Tabla V.3.a. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase III: Hoyo Intermedio 1

Propuesta Técnica		
T: [°F] [72-98]	Prof.: [ft] [9.268-11.000]	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	13,5	3
Aditivos	Retardador, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	12

Tabla V.3.b. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase III: Hoyo Intermedio 1

Otra Propuesta Técnica		
T: [°F] [72-98]	Prof.: [ft] [9.268-11.000]	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	13,5	3
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	12

Para el Hoyo Intermedio 1 se propuso utilizar una Lechada Única Alivianada Antimigratoria, con una densidad de 13,5 lb/gal.

V.1.4. Fase IV (Hoyo Intermedio 2)

De acuerdo a los resultados que arrojaron las matrices de esta fase, se obtuvo lechadas con ponderaciones similares (ver Apéndices I), seleccionando la Lechada IV.1, por su densidad ya que por medio de esta se minimizaran los daños operacionales durante la cementación de esta sección (ver tabla V.4).

Tabla V.4. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase IV: Hoyo Intermedio 2

Propuesta Técnica / Otra Propuesta Técnica		
T: [°F] [98-118]	Prof.: [ft] [11.000-12.300]	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	11

Para esta fase del Hoyo Intermedio 2 se propuso la implementación de una Lechada Única Antimigratoria, con una densidad de 14,5 lb/gal.

V.1.5. Fase V (Hoyo Productor 1)

Para la fase V, de acuerdo a los resultados arrojados por las matrices de evaluación se tiene que la Lechada V.1 (ver Apéndices I), fue la lechada de cemento que se planteó para esta fase, debido a que obtuvo la mayor ponderación durante la evaluación y es la que mejor se adapta a las condiciones del pozo con respecto a las otras alternativas (ver tabla V.5).

Tabla V.5. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase V: Hoyo Productor 1

Propuesta Técnica		
T: [°F] [118-153]	Prof.: [ft] [12.300-14.632]	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	11

Se propuso utilizar para el Hoyo Productor 1 una Lechada Única Antimigratoria, con una densidad de 14,5 lb/gal.

V.1.6. Fase VI (Hoyo Productor 2 Liner)

Para finalizar con el planteamiento de las lechadas y de acuerdo a los resultados arrojados por las matrices de evaluación se obtuvo que la Lechada VI.1 (ver Apéndices I), es la lechada de cemento que resultó con mayor ponderación para esta fase respecto a las otras matrices (ver tabla V.6), donde se propuso utilizar una Lechada Única Antimigratoria, con una densidad de 14,5 lb/gal.

Tabla V.6. Resultados de la Evaluación de Matrices Fase VI: Hoyo Productor 2

Propuesta Técnica		
T: [°F] [153-185]	Prof.: [ft] [14.632-16.732]	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
	TOTAL	11

V.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CEMENTACIÓN

V.2.1. Fase I (Hoyo Conductor)

Para esta fase se estimó utilizar un volumen total de lechada de 610 Bls, esto para cubrir 329 pies de longitud la cual permitirá crear un aislamiento zonal desde 7.086 pies (Lecho Marino) hasta 7.415 pies (ver figura V.1).

Tabla V.7. Volúmenes de Lechadas Fase I

Sección	Fluidos	Longitud [pies]	Volúmenes [Bls]	Exceso 300% [Bls]	V final [Bls]
V1	Lechada Única	10	11	Sin exceso	11
V2	Lechada Única	354	192	449	641
				TOTAL	652

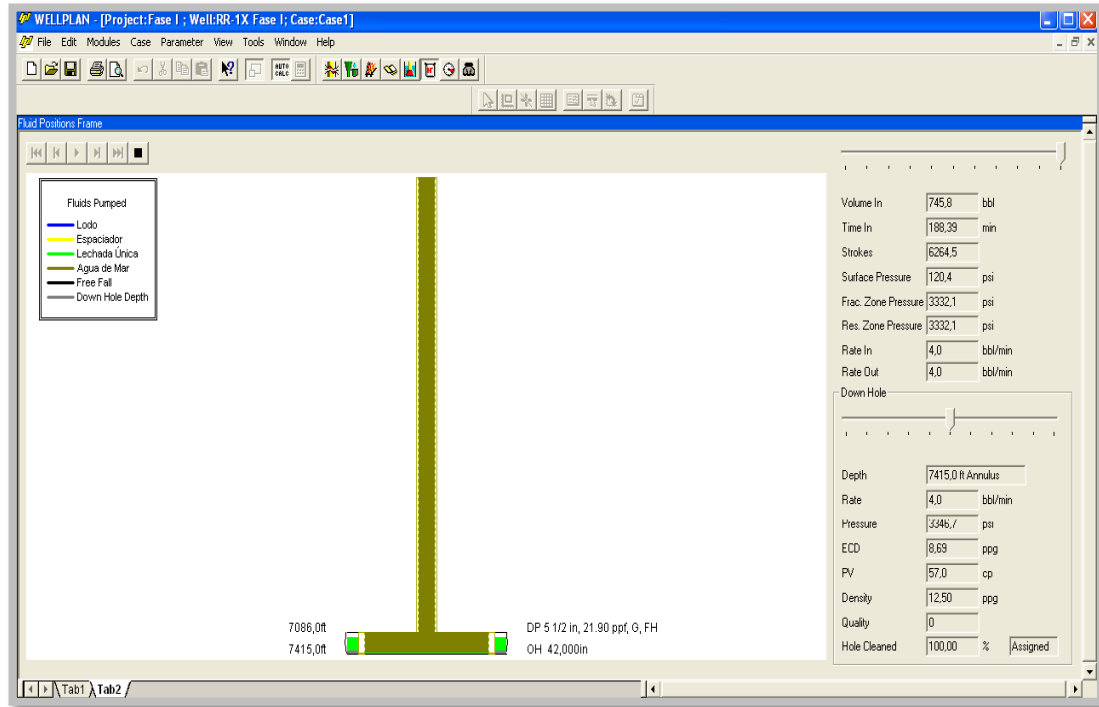


Figura V.1. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 36 pulg)

Los resultados obtenidos por medio del simulador mostraron que los volúmenes en barriles de cementos (ver tabla V.7), calculado teóricamente cubren el área anular esperada sin ningún inconveniente a pesar de el alto exceso que se le fue añadido. Adicionalmente las tasas de bombeo que se manejaron para esta fase resultaron óptimas, de tal manera que no ocasiono fractura a la formación.

Se debe destacar que el volumen obtenido por el simulador es la suma de los volúmenes del espaciador, cemento y fluido desplazador. Por ende las diferencias en volúmenes que muestra el simulador respecto al volumen teórico (esto se cumple para todas las fases).

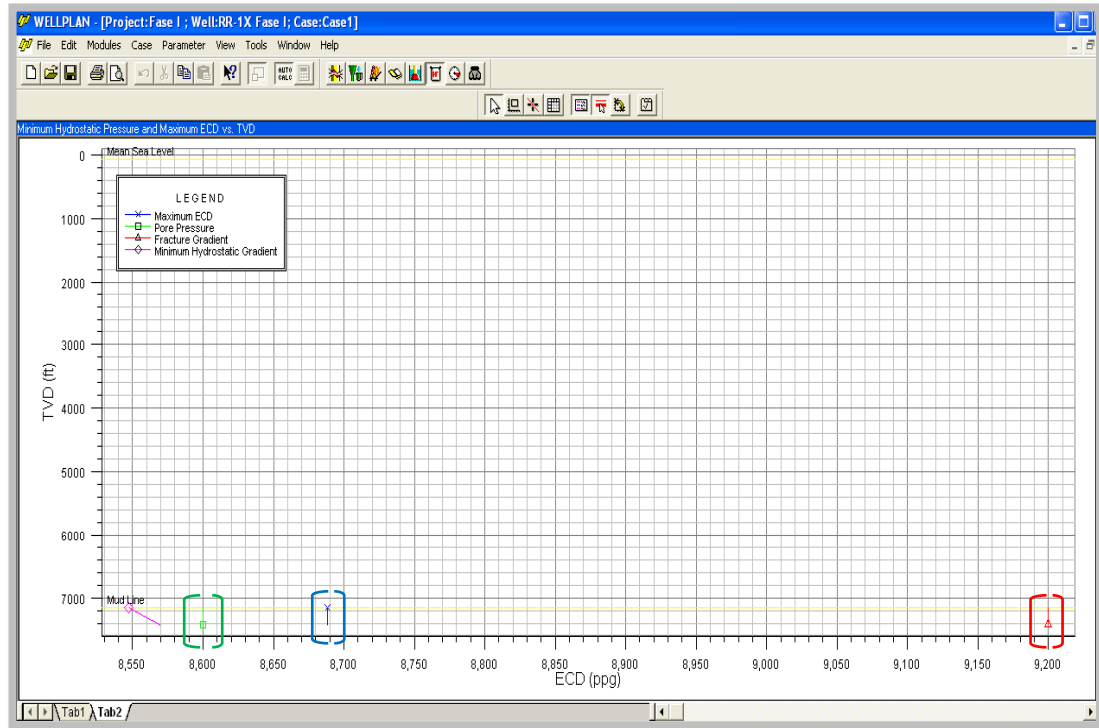


Figura V.2. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 36 pulg)

El resultado que se obtuvo de la Figura V.2 no se aprecia de manera notoria en el diagrama, pero básicamente refleja que la operación de ECD (azul) no sobrepasa la presión de fractura de la formación (rojo), esto debido a las tasas de bombeo que se emplearon para esta fase, evitando de esta manera los problemas operacionales durante el proceso de cementación.

V.2.2. Fase II (Hoyo Superficial)

Se estimó utilizar un volumen de lechada alivianada de 1.714 Bls. Este volumen ha sido calculado con un incremento del 200% como contingencias de las posibles zonas cavernosas en esta fase y para garantizar retorno de cemento al lecho marino (ver tabla V.8).

Tabla V.8. Volúmenes de Lechadas Fase II

Sección	Fluidos	Longitud [pies]	Volúmenes [Bls]	Exceso 200% [Bls]	V final [Bls]
V1	Lechada Única	10	3	Sin exceso	3
V2	Lechada Única	1.888	513	994	1.507
V3	Lechada Única	329	220	Sin exceso	220
				TOTAL	1.730

A continuación se muestra el resumen de la volumetría de cemento a utilizar para esta fase (ver figura V.3).

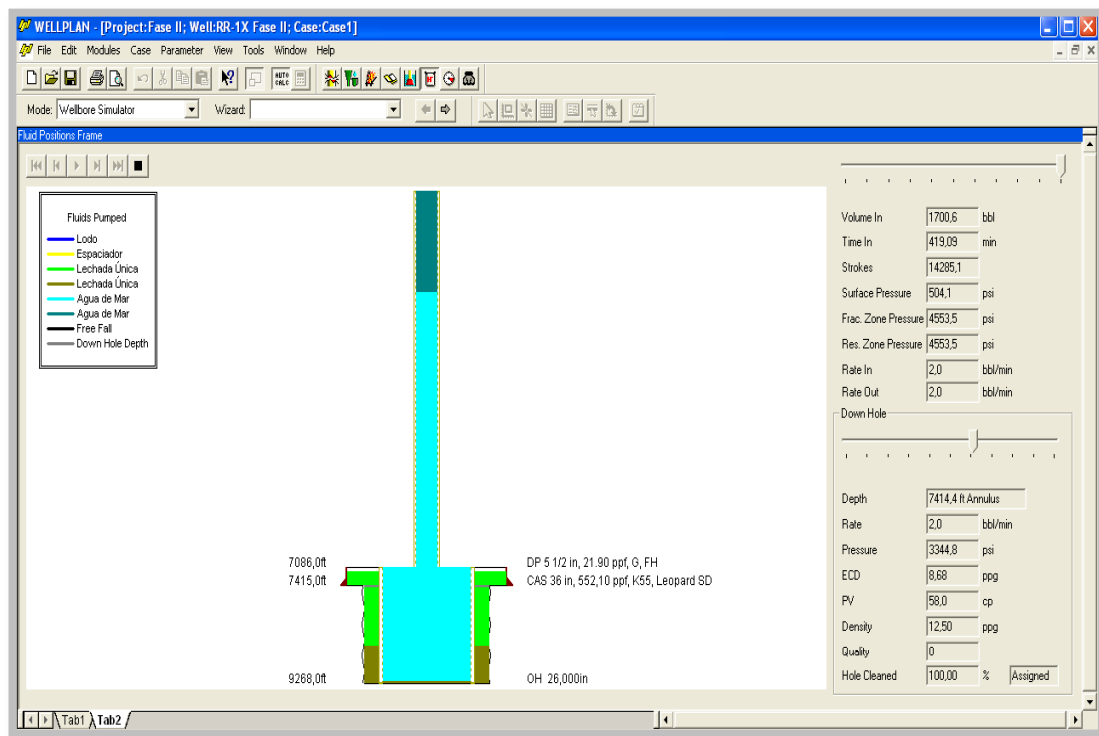


Figura V.3. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 20 pulg)

Los resultados obtenidos por medio del simulador mostraron, que la cantidad de volumen teórico cubrió toda la zona anular de esta fase, donde es de vital importancia lograr una buena cementación de este revestidor y así asegurar la integridad del pozo en la parte superficial para de esta manera soportar las grandes fuerzas axiales que ejercerán las perforaciones y cementaciones de las siguientes fases.

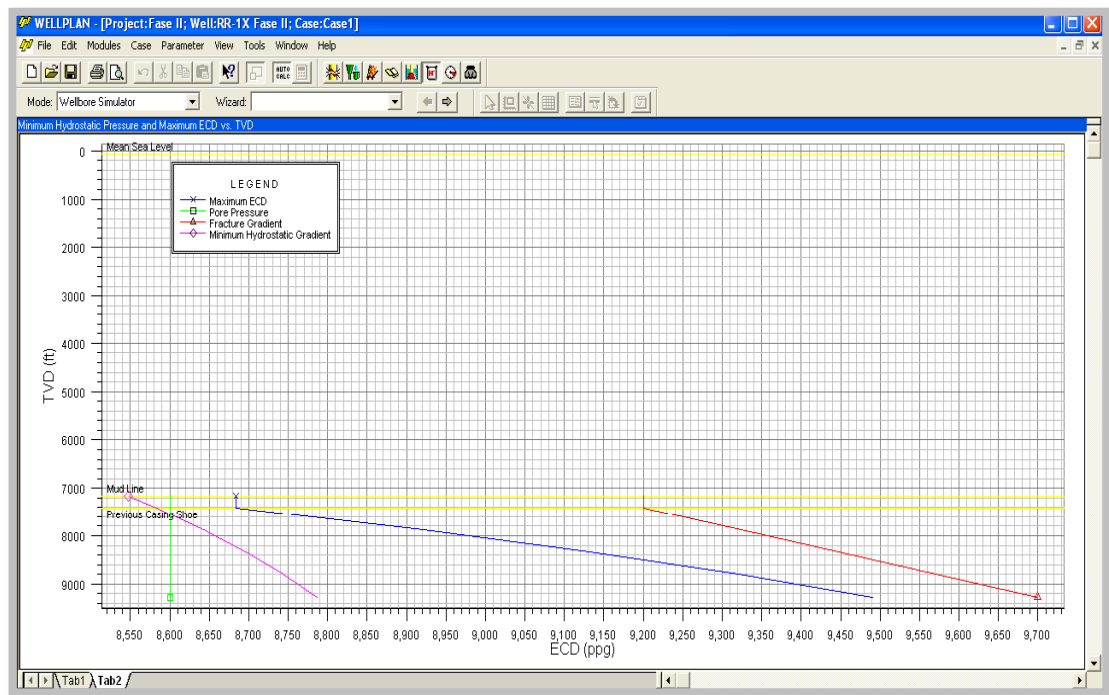


Figura V.4. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 20 pulg)

Como se muestra en la figura V.4, la curva de ECD arrojó valores que encuentran dentro de los rangos de la ventana operacional, lo que implica que las tasas de bombeos empleadas en esta fase fueron las ideales para tener un proceso de cementación exitoso.

V.2.3. Fase III (Hoyo Intermedio 1 *Liner*)

Se planifico utilizar un volumen de lechada de 362 Bls. Este volumen ha sido calculado con un incremento del 25%, con respecto al volumen teórico de la fase, para garantizar que el tope del cemento quede +/- 500 pies por encima de la zapata previa (20 pulg), a 8.768 pies. Este volumen será ajustado con el *caliper*.

Tabla V.9. Volúmenes de Lechadas Fase III

Sección	Fluidos	Longitud [pies]	Volúmenes [Bls]	Exceso 25% [Bls]	V final [Bls]
V1	Lechada Única	84	17	Sin exceso	17
V2	Lechada Única	1.757	252	61	313
V3	Lechada Única	500	42	Sin exceso	42
				TOTAL	372

A continuación se muestra el resumen de la volumetría (espaciador, cemento, fluido desplazante), que se implemento para esta fase y resultó de la aplicación del software de cementación (ver figura V.5).

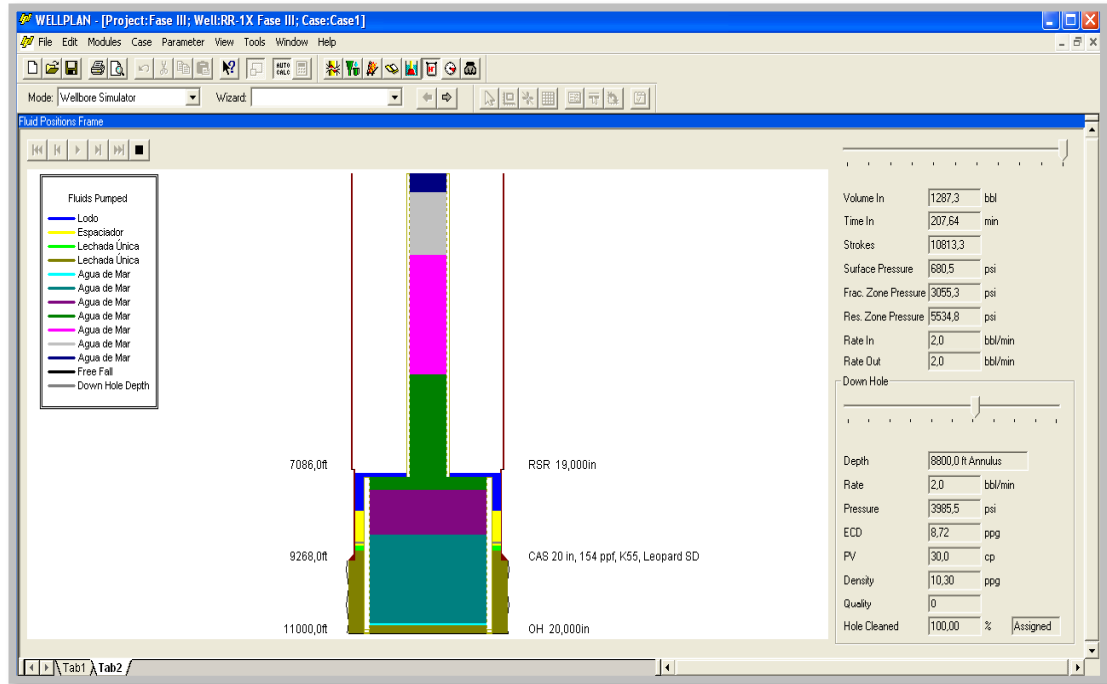


Figura V.5. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 16 pulg)

Los resultados obtenidos por la figura V.5, mostraron que el volumen de fluido (espacidor, lechada, desplazamiento), el tiempo de operación y la tasa de bombeo que se implementaron en esta sección fueron similares a los planteados (ver Anexo 1). Dando como resultado una lechada optima para la cementación de esta fase.

Finalmente, a diferencia de las fases anteriores el bombeo del fluido desplazante se inició con una tasa de bombeo de 2 Bls/min, para luego bombear de manera decreciente desde 12, 10, 8, 6, 4, hasta 2 Bls/min esto para tener un buen asentamiento del dardo, desplazar el cemento eficientemente y a su vez cubrir el diámetro interno del revestidor de fluido evitando problemas operacionales causado por diferencias de presiones.

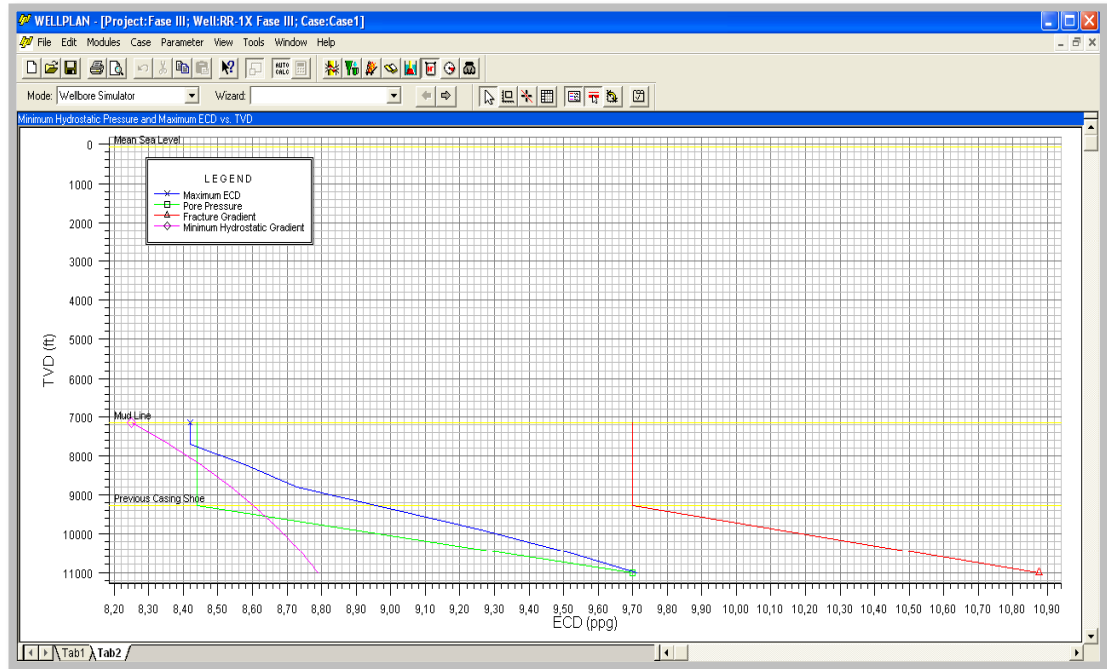


Figura V.6. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 16 pulg)

La figura V.6, muestra las ECD ejercidas durante la circulación de los fluidos, donde esta se mantiene entre los parámetros operacionales a pesar que a 7.000 pies la densidad equivalente resulto estar por debajo de las presiones de poros, es importante reflejar que este pequeño diferencial de densidad no repercutirá de manera negativa durante la operaciones, ya que como se menciono anteriormente es un pequeño el diferencial de aproximadamente 0,02 lb/gal.

V.2.4. Fase IV (Hoyo Intermedio 2)

Para esta fase se obtuvo un volumen de lechada de 231 Bls. Este volumen ha sido calculado con un incremento del 25% en relación con el volumen geométrico calculado. Lo anterior se realizó para favorecer que el tope de la lechada de cemento se encuentre 500 pies por encima de la zapata de 16 pulg,

es decir, a una profundidad de 10.500 pies, donde el volumen final de la lechada será ajustado con el *caliper* (ver tabla V.10).

Tabla IV.10. Volúmenes de Lechadas Fase IV

Sección	Fluidos	Longitud [pies]	Volúmenes [Bls]	Exceso 25% [Bls]	V final [Bls]
V1	Lechada Única	84	12	Sin exceso	12
V2	Lechada Única	1.325	168	40	208
V3	Lechada Única	500	18	Sin exceso	18
				TOTAL	238

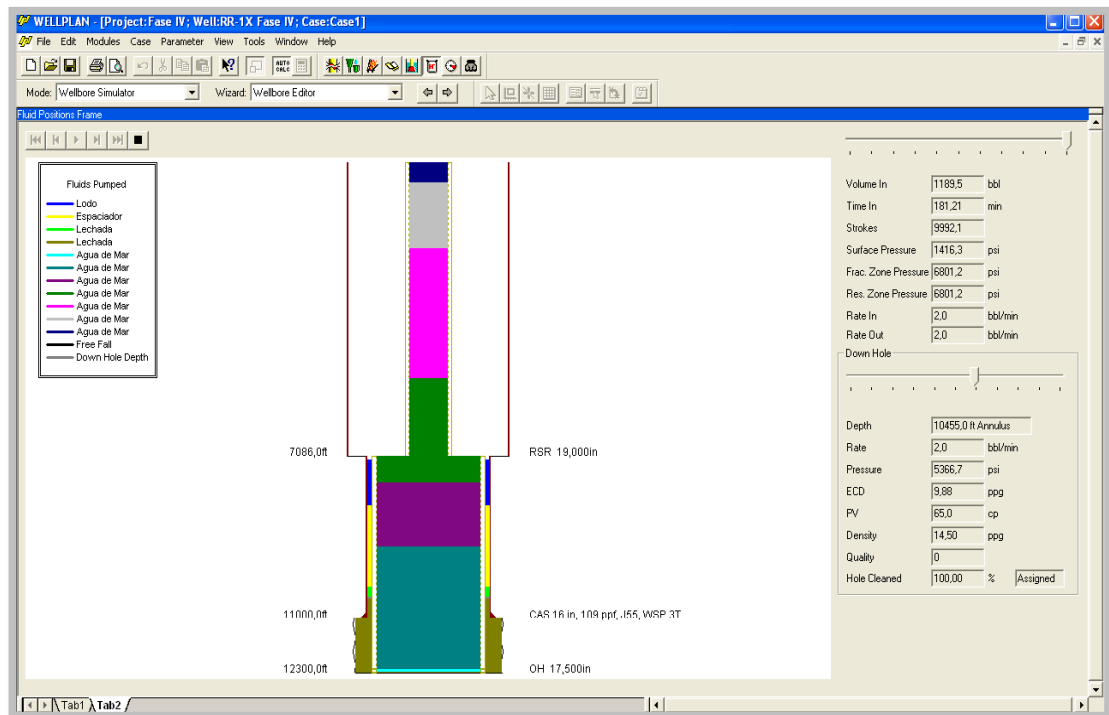


Figura V.7. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 13^{3/8} pulg)

La figura V.7 se obtuvo por medio de la distribución del los fluidos desplazantes y del cemento, donde su desplazamiento fue similar a los realizados en las fases anteriores y arrojó resultados satisfactorios, ya que los valores que resultaron del simulador se asemejan a los valores de volumetría, tiempo y tasas de bombeo (ver Anexo 1).

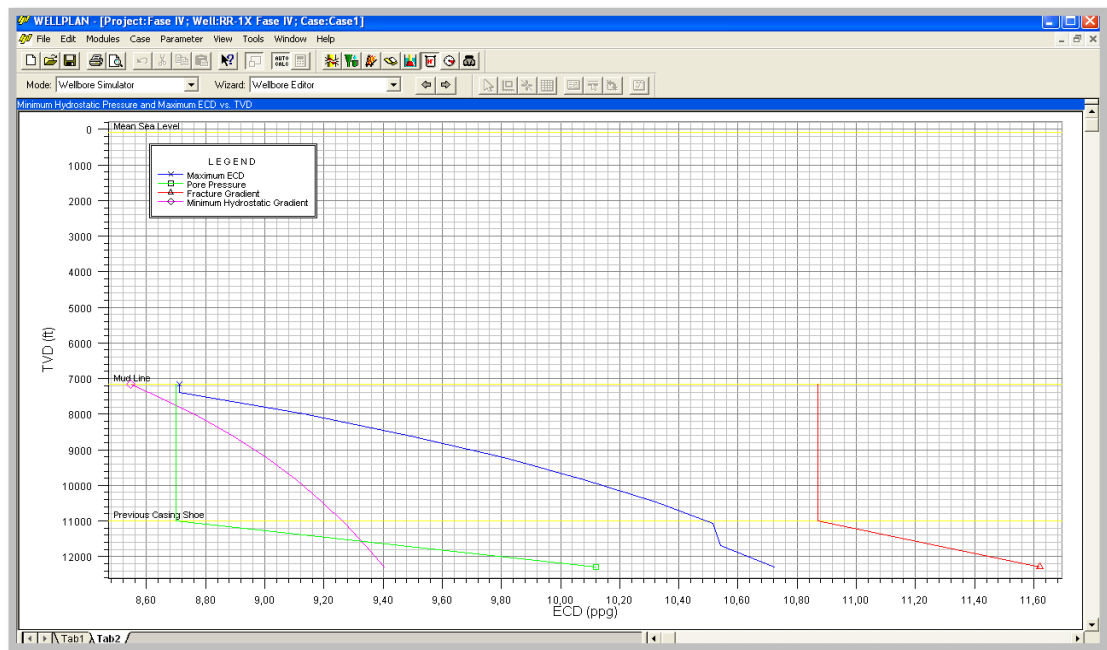


Figura V.8. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 13^{3/8} pulg)

Los resultados de la figura V.8, muestran que durante la operación de cementación la máxima ECD que se obtuvo en el espacio anular está por debajo de la presión de fractura lo cual garantiza que no debería existir pérdida de circulación, pero no se descarta la misma. Por ello, la densidad de los fluidos y las tasas de bombeo han sido ajustadas de manera de no afectar la integridad del pozo, ya que la hidrostática generada por los fluidos se mantiene dentro del rango de seguridad para mantener el control operacional del mismo.

V.2.5. Fase V (Hoyo Productor 1)

Para esta fase se planificó utilizar un volumen de lechada única de 204 Bls. Este volumen ha sido calculado con un incremento del 30% en relación con el volumen geométrico calculado. Lo anterior se realizó para favorecer que el tope de la lechada de cemento se encuentre a 500 pies por encima de la zapata de 13^{3/8} pulg hasta 11.800 pies. El volumen final para esta fase será ajustado con el *caliper* (ver tabla V.11).

Tabla IV.11. Volúmenes de Lechadas Fase V

Sección	Fluidos	Longitud [pies]	Volúmenes [Bls]	Exceso 30% [Bls]	V final [Bls]
V1	Lechada Única	84	6	Sin exceso	6
V2	Lechada Única	2.357	134	39	173
V3	Lechada Única	500	29	Sin exceso	29
				TOTAL	208

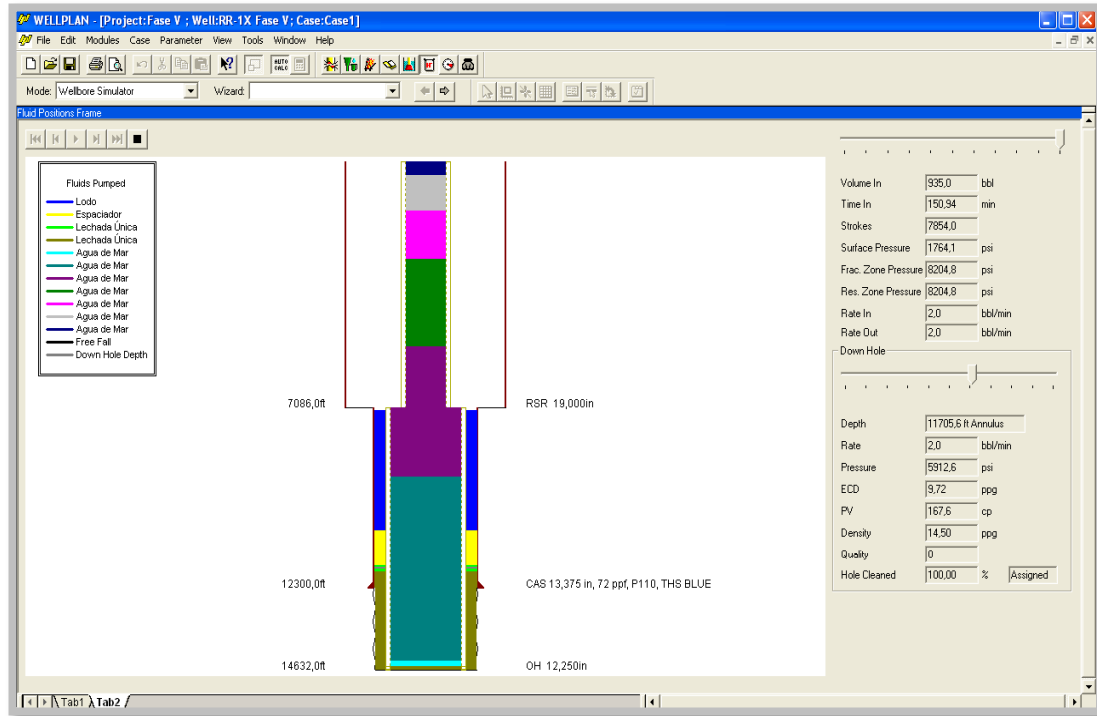


Figura V.9. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 9^{5/8} pulg)

El proceso de desplazamiento para esta sección fue similar al realizado en la fase anteriores, donde se obtuvo resultados satisfactorios y una buena distribución de fluidos a través de las tasas de bombeos decrecientes, ya que los valores resultantes del simulador presentaron similitud con respecto a los valores de volumetría, tiempo y tasas de bombeo (ver Anexo 1).

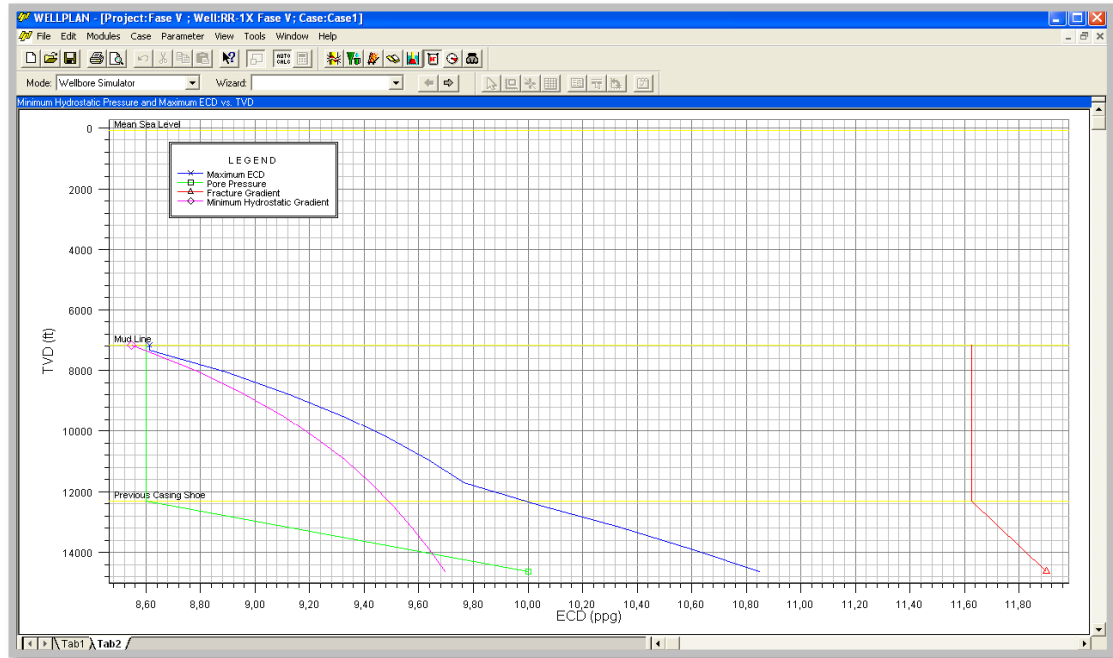


Figura V.10. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 9^{5/8} pulg)

En la figura V.10, se observa que durante la operación de cementación la máxima ECD que se obtuvo se encuentra entre los parámetros operacionales de presiones, lo cual garantiza que no debería existir pérdida de circulación, pero no hay que descartar esta circunstancia, ya que para esta fase se espera encontrar zonas de carbonatos altamente fracturados.

Las tasas de bombeo al igual que en las fases anteriores fueron ajustadas de manera de no afectar la integridad del pozo, ya que la hidrostática generada por los fluidos se mantiene dentro del rango de seguridad para mantener el control operacional del mismo.

V.2.6. Fase VI (Hoyo Productor 2 Liner)

Para la fase se estimó utilizar un volumen de lechada única de 69 Bls. Este volumen fue calculado con un incremento del 30%, en relación con el volumen teórico calculado. Esto para poder alcanzar el TOC a 14.332 pies en el tope del colgador representando 200 pies por encima de la zapata del revestidor de 9^{5/8} pulg. El volumen final será ajustado con el *caliper* (ver tabla V.12).

Tabla IV.12. Volúmenes de Lechadas Fase VI

Sección	Fluidos	Longitud [pies]	Volúmenes [Bls]	Exceso 30% [Bls]	V final [Bls]
V1	Lechada Única	84	3	Sin exceso	3
V2	Lechada Única	2.125	49	14	63
V3	Lechada Única	200	5	Sin exceso	5
				TOTAL	71

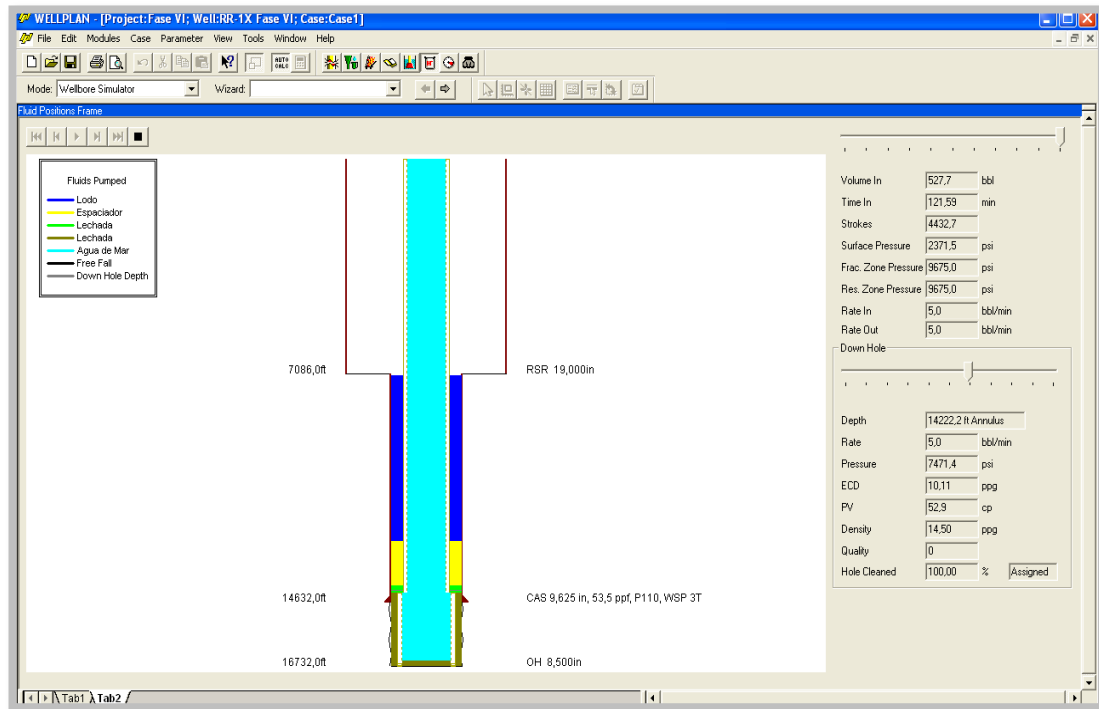


Figura V.11. Diagrama de los Fluidos (Revestidor 7 pulg)

Los resultados que arrojó la figura V.11, muestran que el volumen teórico cubrió la sección anular de esta fase hasta alcanzar el TOC esperado, donde el proceso de desplazamiento para esta sección fue diferente a las realizadas en fases anteriores, ya que para esta fase se bombeó a una tasa constante de 5 Bls/min, debido a la poca cantidad de barriles para desplazar el cemento. Resultando los valores simulados equivalentes a los valores teóricos obtenidos (ver Anexo 1).

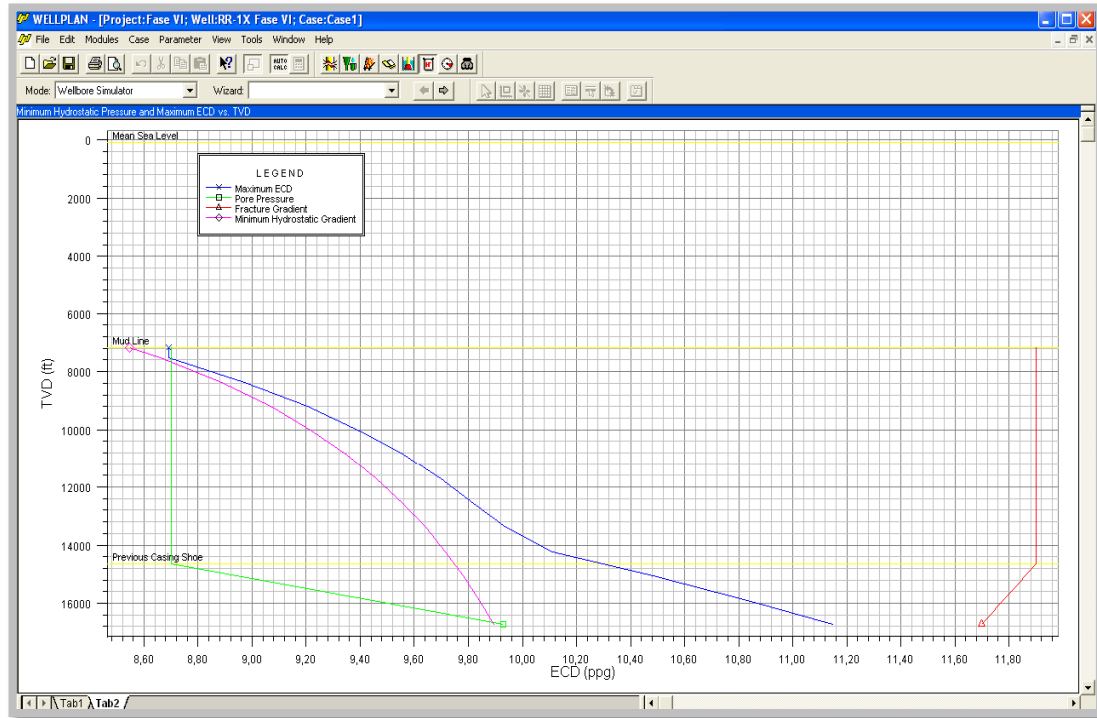


Figura V.12. Perfiles de Presiones de la Operación (Revestidor 7 pulg)

En la figura V.12, se muestra que durante la operación de cementación la máxima ECD que se obtuvo en el espacio anular está por debajo de la presión de fractura, la cual garantiza que no debería existir pérdida de circulación, pero no se descarta la misma debido a que datos geológicos reflejaron que esta fase cuenta con posibles carbonatos fracturados.

Por ello, la densidad de los fluidos y las tasas de bombeo fueron ajustadas para no afectar la integridad del pozo, ya que la hidrostática generada por los fluidos se mantiene dentro del rango de seguridad para mantener el control operacional del mismo.

V.3. PROPUESTA DE CEMENTACIÓN

V.3.1. Lechada de Cemento para el Revestidor de 36 pulg (Fase I)

Para la cementación del revestidor de 36 pulg, se propuso la aplicación de una Lechada Única Alivianada de densidad 12,5 lb/gal. Las propiedades estimadas de la lechada de cemento para esta fase pueden ser observadas en la tabla V.13.

Tabla V.13. Propiedades de la Lechada Única Alivianada Revestidor 36 pulg

Tipo de Lechada	Alivianada-Tixotrópica
Clase de Cemento	H
Aditivos	Acelerador, Dispersante, Extendendor, Controlador de Pérdida de Circulación, Antiespumante.
Densidad de la Lechada	12,5 lb/gal
Resistencia a la Compresión	[1.000-1.500] lpc @ 24 hr
BHST / BHCT	44 °F / 39 °F
Agua Libre	0%
Filtrado	< 200 cc / 30 min
Espaciador	Base Agua + Cloruro de Calcio + Silicato de Sodio + Trazador

La combinación de los aditivos, Acelerador y Dispersante, están diseñados para trabajar en ambientes marinos de baja temperatura, estos son usados para impartir propiedades tixotrópicas a las lechadas de cemento. Esta combinación a baja temperatura da propiedades de rápido desarrollo de geles, baja permeabilidad y rápido desarrollo de resistencia a la compresión a las lechadas, esto para enfrentar los grandes desafíos que se espera encontrar en esta fase.

V.3.2. Lechada de Cemento para el Revestidor de 20 pulg (Fase II)

Para la cementación del revestidor de 20 pulg, se propuso la aplicación de una Lechada Única Alivianada (Antimigratoria-Hibrida), de densidad 12,5 lb/gal. Las propiedades estimadas de la lechada de cemento para esta fase son las que a continuación se presentan (ver tabla V.14).

Tabla V.14. Propiedades de la Lechada Única Alivianada Revestidor 20 pulg

Tipo de Lechada	Alivianada-Antimigratoria-Impermeable
Clase de Cemento	H + Cemento Microfino
Aditivos	Retardador, Dispersante, Extendendor, Controlador de Pérdida de Circulación, Antiespumante.
Densidad de la Lechada	12,5 lb/gal
Resistencia a la Compresión	[1.000-1.500] lpc @ 24 hr
BHST / BHCT	72 °F / 63 °F
Agua Libre	0%
Filtrado	< 200 cc/ 30 min
Espaciador	Base Agua + Cloruro de Calcio + Silicato de Sodio + Trazador

Es importante destacar que la combinación de estos aditivos como: Microesfera, Retardador y Dispersante permiten formula una lechada de cemento con propiedades híbridas de manera que esta sea altamente impermeable, capaz de aumentar el tiempo de fraguado e impartir propiedades tixotrópicas respectivamente. Esta combinación al igual que la Fase I, le proporciona a la lechada de cemento propiedades de rápido desarrollo de geles, baja permeabilidad y rápido desarrollo de resistencia a la compresión.

V.3.3. Lechada de Cemento para el Revestidor de 16 pulg (Fase III)

Para la cementación del revestidor de 16 pulg, se propuso utilizar una Lechada Única Alivianada (Antimigratoria), de densidad 13,5 lb/gal. Donde las propiedades estimadas de la lechada pueden ser observadas en la tabla V.15.

Tabla V.15. Propiedades de la Lechada Única Alivianada Revestidor 16 pulg

Tipo de Lechada	Alivianada-Antimigratoria
Clase de Cemento	H
Aditivos	Retardador, Dispersante, Extendendor, Controlador de Pérdida de Circulación, Antiespumante.
Densidad de la Lechada	13,5 lb/gal
Resistencia a la Compresión	[1.000-1.500] lpc @ 24 hr
BHST / BHCT	98 °F / 80 °F
Agua Libre	0%
Filtrado	< 200 cc/ 30 min
Espaciador	Base Agua + Cloruro de Calcio + Silicato de Sodio

La mezcla de estos aditivos permiten cementar y sellar una zona de transición con bajos gradientes de fractura de la formación, evitando posibles problemas operacionales, para esto se propuso continuar con la aplicación de lechadas alivianadas, donde se recomienda dejar el tope del cemento muy por debajo del colgador de 16 x 20 pulg, es decir, a unos 500 pies por encima de la zapata anterior.

V.3.4. Lechada de Cemento para el Revestidor de 13^{3/8} pulg (Fase IV)

Para la cementación del revestidor de 13^{3/8} pulg, se propuso utilizar una Lechada Única (Antimigratoria), de densidad 14,5 lb/gal, para cementar una sección relativamente corta. Sin embargo, el diseño final de la cementación de esta etapa depende de la prueba de integridad de formación, que se realizará a nivel de la zapata anterior (zapata de 16 pulg) y de las presiones registradas durante la perforación de la fase. Las propiedades estimadas de la lechada de cemento para esta fase son:

Tabla V.16. Propiedades de la Lechada Única Antimigratoria Revestidor 13^{3/8} pulg

Tipo de Lechada	Antimigratoria
Clase de Cemento	H
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida de Circulación, Antiespumante.
Densidad de la Lechada	14,5 lb/gal
Resistencia a la Compresión	> 1500 lpc @ 24 hr
BHST / BHCT	118 °F / 96 °F
Agua Libre	0%
Filtrado	< 200 cc/ 30 min
Espaciador	Base Agua + Cloruro de Calcio + Silicato de Sodio

La cementación de este revestidor permite aislar la zona donde se estima encontrar la unidad de sello del reservorio, es importante tener una buena cementación de esta fase con el fin de obtener sello hidráulico para evitar cualquier migración de fluido a través del espacio anular.

V.3.5. Lechada de Cemento para el Revestidor de 9^{5/8} pulg (Fase V)

Para la cementación del revestidor de 9^{5/8} pulg, se propuso aplicar una Lechada Única (Antimigratoria), de densidad 14,5 lb/gal. Sin embargo, el diseño final de la cementación de esta etapa depende de la prueba de integridad de formación que se realizará a nivel de la zapata anterior (zapata de 13^{3/8} pulg) y de las presiones registradas durante la perforación de la fase. A continuación se presentan las características de la lechada (ver tabla V.17).

Tabla V.17. Propiedades de la Lechada Única Antimigratoria Revestidor 9^{5/8} pulg

Tipo de Lechada	Antimigratoria
Clase de Cemento	H
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida de Circulación, Antiespumante.
Densidad de la Lechada	14,5 lb/gal
Resistencia a la Compresión	> 1500 lpc @ 24 hr
BHST / BHCT	153°F / 121 °F
Agua Libre	0%
Filtrado	250 cc/ 30 min
Espaciador	Base Agua + Cloruro de Calcio + Silicato de Sodio

La cementación de este revestidor permite aislar la zona productora, por lo tanto para esta fase se perforan los objetivos estratigráficos de interés. No se descartan pérdidas de circulación en esta fase, por ende el diseño de las lechadas de cemento está concebido para minimizar y/o eliminar este problema.

Por esta razón se propuso el uso de una lechada de cemento con propiedades antimigratorias, el tope del cemento (TOC) se estima en 500 pies sobre de la zapata del revestidor de 13^{3/8} pulg, pero dicho volumen y densidad serán ajustados de acuerdo al diámetro promedio del hoyo según registro *caliper*, presiones de poro y

fractura reales detectadas durante la perforación o en la etapa de registros en hoyo abierto.

V.3.6. Lechada de Cemento para el Revestidor de 7 pulg (Fase VI)

Se propuso utilizar una lechada única antimigratoria de densidad 14,5 lb/gal. Sin embargo, el diseño final de la cementación de esta etapa depende de la prueba de integridad de formación, que se realizará a nivel de la zapata anterior (zapata de 9^{5/8} pulg) y de las presiones registradas durante la perforación de la fase. A continuación se presentan las características de la lechada (ver tabla V.18).

Tabla V.18. Propiedades de la Lechada Única Antimigratoria Revestidor 7 pulg

Tipo de Lechada	Antimigratoria
Clase de Cemento	H
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida de Circulación, Antiespumante.
Densidad de la Lechada	14,5 lb/gal
Resistencia a la Compresión	> 1.500 lpc @ 24 hr
BHST / BHCT	185°F / 160 °F
Agua Libre	0%
Filtrado	250 cc/ 30 min
Espaciador	Base Agua + Cloruro de Calcio + Silicato de Sodio

La cementación de este revestidor tiene como objetivo aislar la zona productora. No se descartan pérdidas de circulación en esta fase, por ende el diseño de las lechadas de cemento está concebido para minimizar y/o eliminar este problema. Por esta razón se propuso el uso de una lechada de cemento con propiedades antimigratorias, el tope del cemento (TOC) se estima a nivel del colgador de 9^{5/8} x 7 pulg (200 pies sobre la zapata de 9^{5/8} pulg de área de solapamiento).

V.4. ESTIMACIÓN DE COSTOS DE LAS LECHADAS PROPUESTAS

La estimación de los costos del programa de cementación para cada una de las fases que conforman el pozo RR-1X, se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios necesarios requeridos para cada fase, donde es importante destacar que el costo total de un proyecto de exploración en costa afuera se encuentra alrededor de 150.000.000 UU\$ aproximadamente, donde el programa de cementación abarca el 8% de este costo total, es decir, se manejan cifras en orden de los 12.000.000 UU\$ para la cementación del pozo en estudio.

En la figura que a continuación se presenta se puede observar el costo total equivalente para cada una de las fases del pozo RR-1X (ver Apéndice III y Anexo 2):

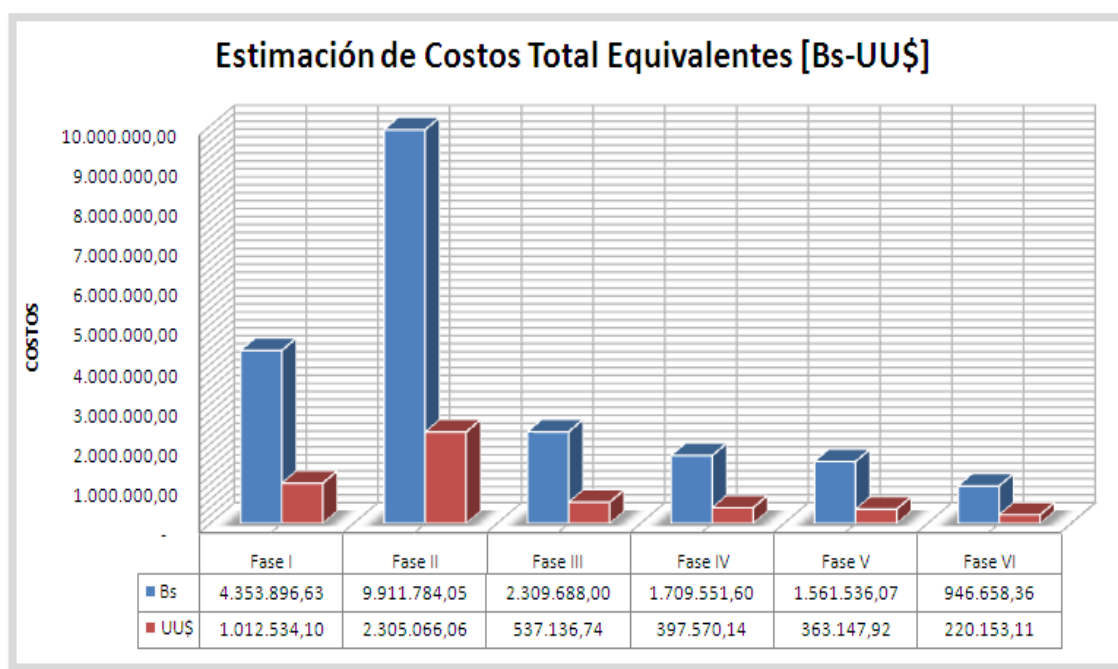


Figura V.13. Estimación total de los costos equivalentes para cada fase del pozo RR-1X

Los resultados muestran que las operaciones de cementación en zonas costa afuera son sumamente costosas esto debido a las condiciones hostiles que estas presentan, su logística, materiales y equipos especiales que se requieren para su aplicación.

Siendo las fases I y II las más costosas del pozo RR-1X, ya que estas son zonas donde se requerirán la mayor cantidad de volumen de lechada de cemento para ser bombeado, a demás de aditivos adicionales debido a la longitud que se deberá cementar y a alta complejidad que esta zona puede presentar, a diferencia de las otras fases donde su ventana operacional tiene un rango mayor, la cantidad de volumen de cemento es menor lo que implicaría un trabajo de menor tiempo de operación y por ende menores costos asociados para su programa de cementación (ver Anexo 2).

CAPÍTULO VI**PROPUESTA TÉCNICO-ECONÓMICA**

A continuación se presentará la propuesta técnico – económica para la cementación y construcción de cada una de las fases que conforman al pozo exploratorio RR-1X, con la finalidad de presentar el programa de cementación, que sirva como referencia a los procesos que deberán cumplirse durante la cementación, para de esta manera lograr un trabajo eficiente en lo que compete a la cementación del pozo en estudio.

VI.1. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 36 PULG**VI.1.1. Objetivos**

La cementación del revestidor de 30 pulg, tiene como finalidad crear un aislamiento zonal a largo plazo, proteger los estratos superficiales y asegurar la estabilidad e integridad del hoyo, y así permitir crear un buen sello entre las formaciones débiles (no consolidadas) y la tubería de revestimiento, para de esta manera impedir la invasión de mantos de agua superficiales y la migración anular de fluidos hacia la superficie provenientes de zonas cavernosas y zonas donde ocurra pérdida de circulación.

Este revestidor debe ser cementado hasta el lecho marino, es decir, debe estar completamente cementado, ya que servirá de soporte a los equipos de operación submarina. Es de vital importante tener un cemento con óptimas propiedades mecánicas que ayuden a soportar al revestidor, las grandes fuerzas axiales a las que

será sometido, así como proteger la tubería contra impactos originados por las perforaciones siguientes.

Como se menciona anteriormente el trabajo de cementación debe asegurar que el TOC se encuentre a nivel del lecho marino, por tal razón se debe considerar aditivos especiales para minimizar la pérdida de fluido, durante la operación de cementación. Se consideró como premisa importante el uso de pre-flujos (espaciador), los cuales tienen como función principal ayudar a remover el revoque formado durante la perforación y obturar la formación para mitigar las pérdidas de cemento hacia la formación.

VI.1.2. Diseño de la Operación

Se plantea utilizar una Lechada Única con propiedades tixotrópicas de densidad 12,5 lbs/gal, con baja permeabilidad, estas a su vez generan óptimas propiedades reológicas y alta resistencia a la compresión.

VI.1.2.1. Sistema de Fluido

La perforación de esta fase se hará sin *Riser Marino*, es decir, con descarga directa al lecho marino, se utilizará en forma continua Agua de Mar y Píldoras Bentonita. Considerando para esta sección una venta operacional de densidades comprendida entre [8,5-9,2] lb/gal, ver Capítulo III (Fig. III.7).

Para esta primera fase como se menciona anteriormente, se implementara píldoras viscosas, compuestas principalmente por controlador de filtrado polimérico, para favorecer un revoque delgado e impermeable que permita la limpieza del hoyo y la

obstrucción momentánea de los grades diámetros de poro que se pueden presentar es esta fase de la formación.

VI.1.2.2. Tren de Pre-Flujo

De acuerdo con el fluido de perforación propuesto para esta fase, el mismo está compuesto en su mayoría por agua de mar y píldoras viscosas a base de bentonita, lo que implica que formara un revoque fino y de fácil remoción. Donde la poca consolidación litológica y alta permeabilidad, permite emplear un sistema antipérdida, formando un sello en los poros de la formación.

Para esto se bombeará un tren de pre-flujos (espaciador) de 10 lb/gal de densidad, durante la perforación de esta fase, esto con la finalidad de remover parte del lodo que se encuentra en el diámetro interno del revestidor, separar la lechada de cemento del fluido de perforación y reducir la permeabilidad de la formación para evitar pérdidas de circulación, e impedir el paso de cualquier fluido a la formación a través de los macro poros que presenta esta fase.

VI.1.3. Volumetría a Utilizar

Tabla VI.1. Volumetría del Espaciador para el Hoyo 42 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Espaciador @ 10 lb/gal	5	100	20

Tabla VI.2. Volumetría de la Lechada de Cemento para el Hoyo 42 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Lechada Única @ 12,5 lb/gal	4	652	163

Tabla VI.3. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 42 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Agua de Mar	4	142	35
Agua de Mar	2	11	5

VI.1.4. Análisis de Tiempo de la Lechada

Bombeo del Espaciador 00:20 hr:min

Bombeo de la Lechada Única 02:43 hr:min

Desplazamiento 00:40 hr:min

Tiempo de la Operación 03:44 hr:min

Tiempo de Espesamiento de la Lechada Única (70 Bc) 05:44 hr:min

Margen de Seguridad: 02:00 hr:min

Nota: El tiempo de espesamiento final se determinará con las pruebas de laboratorio y va a depender de la concentración de los aditivos utilizados para preparar la mezcla de la lechada de cemento (ver Anexo 1).

VI.1.5. Centralizadores

Tomando en cuenta el tipo de formación a perforar en esta fase, el tamaño y longitud del hoyo no se propone la utilización de ningún tipo de centralizador, ya que sólo se estarán bajando al hoyo +/- 329 pies de revestidor, se considera que esta longitud es muy corta, por tal razón el uso de los centralizadores no tendrá ningún efecto adicional sobre la eficiencia de la cementación.

VI.1.6. Estimación de Costos

La estimación de los costos se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios utilizados durante el proceso de cementación de esta fase (ver Anexo 2).

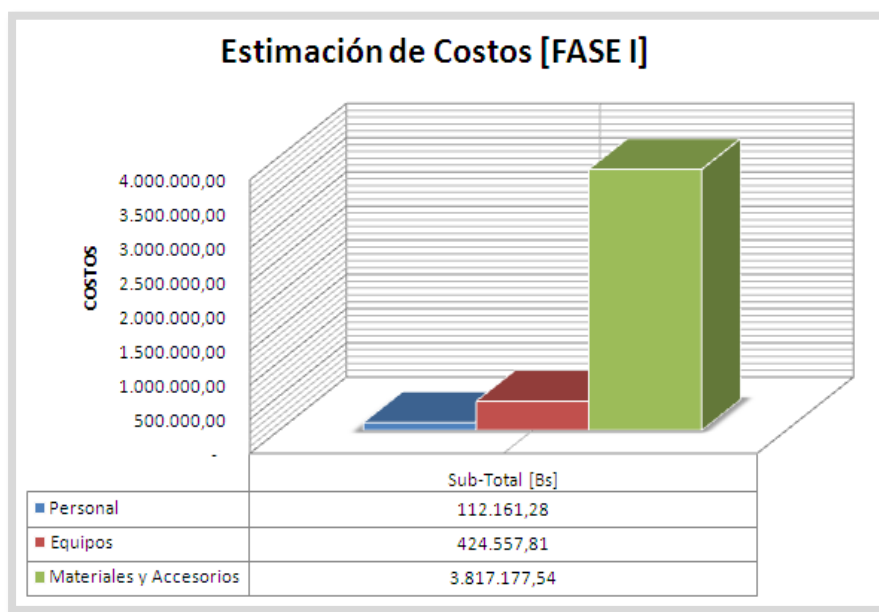


Figura VI.1. Estimación de Costos para la Fase I

VI.2. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 20 PULG

VI.2.1. Objetivos

La cementación del revestidor de 20 pulg, tiene como finalidad aislar la sección perforada y el tramo de la fase anterior ya revestido, y así poder asegurar un buen aislamiento zonal no solo durante la perforación de las fases siguientes sino también más allá de vida productiva del pozo. Obturando formaciones débiles con posibles pérdidas de circulación y zonas ladronas creando un sello hermético entre el revestidor y la formación, para cubrir y proteger de posibles invasiones de fluidos someros (Agua-Gas), que puede presentar esta fase.

Para este revestidor se debe realizar una excelente cementación y de esta manera garantizar una cementación exitosa con retorno al lecho marino, ya que servirá de soporte a los siguientes equipos de control de pozo; Cabezal Submarino, BOP y Riser Marino durante toda la perforación de las formaciones más profundas, y posteriormente para la instalación del arbolito de producción.

VI.2.2. Diseño de la Operación

Se propone utilizar una Lechada Única Alivianada (Antimigratoria/Hibrida), con una densidad de 12,5 lb/gal, y de esta manera cubrir la longitud total a cementar de (2.182 pies). Para esto se propone usar un sistema que actúe como material antipérdida y un espaciador como pre-flujo para dispersar el lodo, además de promover la remoción del revoque por efecto mecánico, y a su vez obturar la formación permitiendo alcanzar el TOC (7.086 pies) en el lecho marino.

VI.2.2.1. Sistema de Fluido

La perforación de esta fase se hará sin *Riser* Marino, es decir con descarga directa al lecho marino, se utilizará en forma continua Agua de Mar y Píldoras Bentonita. Considerando para esta sección una venta operacional de densidades comprendida entre [8,6-9,7] lb/gal, ver Capítulo III (Fig. III.7).

Para esta fase se implementaran píldoras viscosas, compuestas principalmente por controlador de filtrado polimérico, para favorecer un revoque delgado e impermeable que permita la limpieza del hoyo y la obstrucción de manera momentánea los grades diámetros porales que son comunes para esta fase de la formación.

VI.2.2.2. Tren de Pre-Flujo

De acuerdo al fluido de perforación propuesto en esta fase, el cual está compuesto en su mayoría por agua de mar y píldoras viscosas a base de bentonita, que permitirá formar un revoque fino y de fácil remoción. Donde la poca consolidación litológica y alta permeabilidad de esta zona, permite utilizar un sistema antipérdida, formando un sello en los poros de la formación.

Para esto se bombeará un tren de pre-flujo (espaciador) de 10,6 lb/gal de densidad durante la perforación de esta fase, esto con la finalidad de promover la remoción del revoque dejado durante la perforación por efecto mecánico, separar la lechada de cemento del fluido de perforación y reducir la permeabilidad de la formación para evitar pérdidas de circulación, e impedir el paso de cualquier fluido a la formación a través de los posibles macro poros que puede presentar esta fase.

VI.2.3. Volumetría a Utilizar

Tabla V.4. Volumetría del Espaciador para el Hoyo 26 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Espaciador @ 11 lb/gal	5	100	20

Tabla V.5. Volumetría de la Lechada de Cemento para el Hoyo 26 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Lechada Única @ 12,5 lb/gal	4	1.010	253
Lechada Única @ 12,5 lb/gal	6	720	120

Tabla V.6. Volumetría de desplazamiento para el Hoyo 26 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Agua Fresca	4	162	40
Agua Fresca	2	10	5

VI.2.4. Análisis de Tiempos de las Lechadas

Bombeo del Espaciador 00:20 hr:min

Bombeo de la Lechada de Única 06:13 hr:min

Desplazamiento 00:45 hr:min

Tiempo de la Operación 07:18 hr:min

Tiempo de Espesamiento de la Lechada (70 Bc) 09:18 hr:min

Margen de Seguridad: 02:00 hr:min

Nota: El tiempo de espesamiento final se determinará con las pruebas de laboratorio y va a depender de las concentraciones de los aditivos utilizados para preparar la mezcla de la lechada de cemento (ver Anexo 1).

V.2.5. Centralizadores

Con la finalidad de obtener mayor estabilidad durante la corrida del revestidor y de esta manera obtener un *stand off* mínimo de 70%, se colocará un aproximado de +/- 27 centralizadores de Arco Estándar Soldado Tipo 300, garantizando así una distribución regular tanto de los fluidos como de las velocidades anulares y los espesores de la capa de cemento.

VI.2.6. Estimación de Costos

La estimación de los costos se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios utilizados durante el proceso de cementación de esta fase (ver Anexo 2).

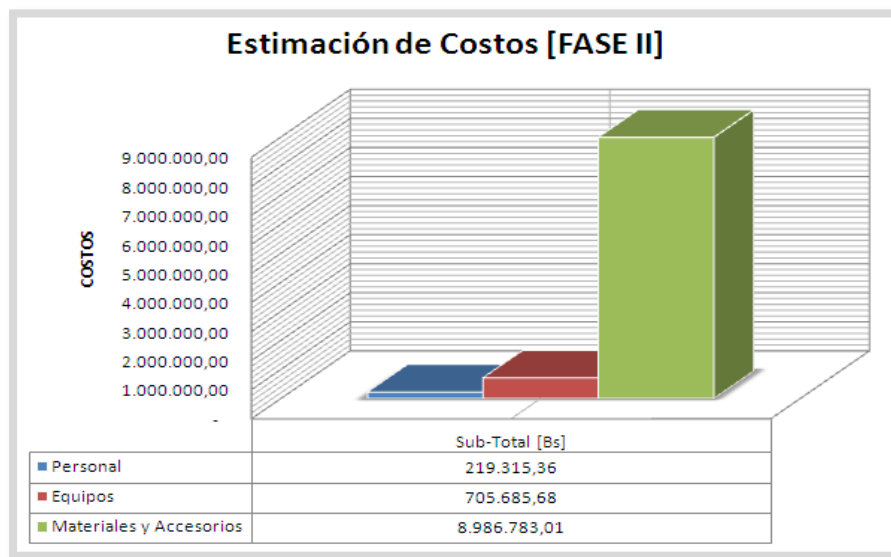


Figura VI.2. Estimación de Costos para la Fase II

VI.3. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 16 PULG

VI.3.1. Objetivos

La cementación del revestidor de 16 pulg, tiene como finalidad sostener y adherirse a la tubería creando un sello hidráulico entre el revestidor y la formación, para cubrir, proteger y aislar los estratos perforados en la fase, garantizando la integridad del pozo para las siguientes perforaciones del pozo.

Para este revestidor es importante garantizar una buena cementación de la fase perforada y así poder evitar cualquier migración de fluido a través del espacio anular, que podrían dificultar el avance de la perforación y de esta manera obtener una integridad efectiva en la zapata, dando soporte a la siguiente fase a perforar.

VI.3.2. Diseño de la Operación

Se propone utilizar para esta fase una Lechada Única Alivianada (Antimigratoria) de densidad comprendida de 13,5 lb/gal, (+/- 500 pies por encima de la zapata del revestidor de 20 pulg), lo que implicaría que el TOC quedaría a 8.768 pies y así dar una mayor integridad y soporte al revestidor de 16 pulg, esta lechada será diseñada para proveer buenas propiedades mecánicas. En caso, que en esta sección del pozo se encuentren presencia de fluidos indeseables agua y/o gas.

VI.3.2.1. Sistema de Fluido

La perforación de esta fase se dará inicio con la instalación del *Riser* Marino y la BOP's submarina, por lo tanto ocurre el proceso de circulación del fluido de perforación y están instalados los equipos de control de sólidos. El fluido de perforación deberá ser ambientalmente compatible con el suelo marino, de manera que se generen ripios no dañinos.

Se usarán fluidos de perforación con densidades comprendidas entre [9,7-10,9] lb/gal, estas comprenden las de poro y fracturas respectivamente ver Capítulo III (Fig. III.7.). Este fluido estará compuesto principalmente por controlador de filtrado polimérico, Agua de Mar, Glicol, NaCl y KCL para favorecer un revoque delgado e impermeable que permita la limpieza del hoyo y la obstrucción de los diámetros de la formación que se pueden presentar en esta fase.

VI.3.2.2. Tren de Pre-Flujo

Se utilizará un espaciador de 10,8 lb/gal, para así poder remover el revoque dejado por el lodo durante la perforación por efecto mecánico, permitiendo que el cemento tenga buena adherencia entre la formación y el revestidor, evitando crear espacios no cementados por donde puedan canalizar fluido indeseables.

VI.3.3. Volumetría a Utilizar

Tabla VI.7. Volumetría de Espaciador para el Hoyo 20 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Espaciador @ 11 lb/gal	5	70	14

Tabla VI.8. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 20 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Lechada Única @ 13,5 lb/gal	2	10	5
Lechada Única @ 13,5 lb/gal	4	362	91

Tabla VI.9. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 20 pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Agua de Mar	2	10	5
Agua de Mar	12	470	39
Agua de Mar	10	245	24
Agua de Mar	8	147	18
Agua de Mar	6	78	13
Agua de Mar	4	39	10
Agua de Mar	2	10	5

V.3.4. Análisis de Tiempos de las Lechadas

Bombeo del Espaciador 00:14 hr:min

Liberación del Tapón Inferior (Blando) 00:05 hr:min

Bombeo de la Lechada Única 01:36 hr:min

Liberación del Tapón Superior (Duro) 00:05 hr:min

Desplazamiento 01:54 hr:min

Tiempo de la Operación 03:54 hr:min

Tiempo de Espesamiento de la Lechada Única (70 Bc) 05:54 hr:min

Margen de Seguridad: 02:00 hr:min

Nota: El tiempo de espesamiento final se determinará con las pruebas de laboratorio y va a depender de las concentraciones de los aditivos utilizados para preparar la mezcla de la lechada de cemento (ver Anexo 1).

VI.3.5. Centralizadores

Tomando en cuenta el tamaño del diámetro interno y el *drif* de este resvestidor, ver figura IV.1, no se propone la utilización de ningún tipo de centralizador, ya que para esta sección los diámetros de los centralizadores son mayores que los diámetros antes mencionados, lo que ocasionaría que estos se quedasen estancados y por ende crear problemas operacionales. Sin embargo, se podría implementar un centralizador de menor diámetro pero estos no tendrían ningún efecto adicional sobre la eficiencia de la cementación.

VI.3.6. Estimación de Costos

La estimación de los costos se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios utilizados durante el proceso de cementación de esta fase (ver Anexo 2).

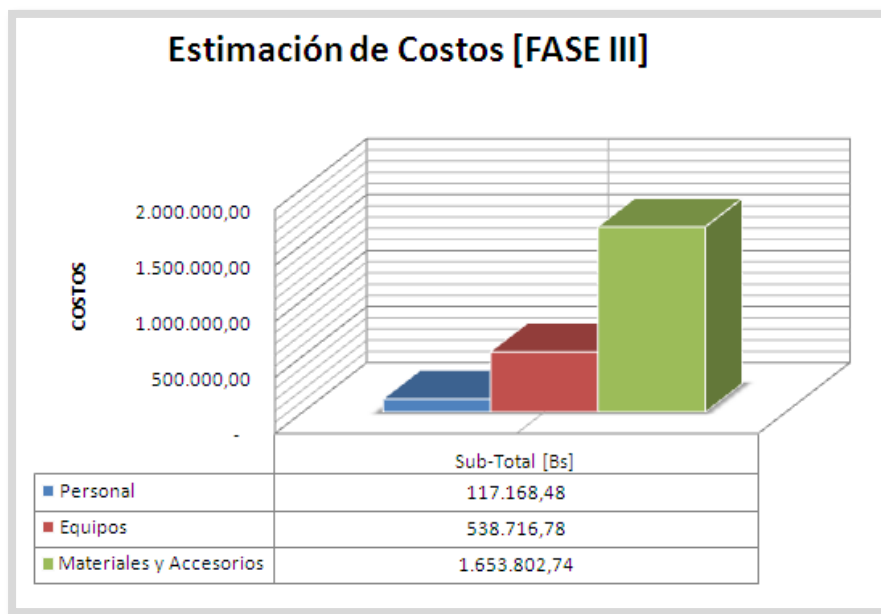


Figura VI.3. Estimación de Costos para la Fase III

VI.4. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 13^{3/8} PULG**VI.4.1. Objetivos**

La cementación del revestidor de 13^{3/8} pulg, tiene como finalidad sostener y adherirse a la tubería creando un sello hidráulico entre el revestidor y la formación, para cubrir, proteger y aislar los estratos perforados en la fase, garantizando buena integridad al pozo, permitiendo continuar la perforando de las secciones siguientes de producción del pozo sin ningún inconveniente.

Para este revestidor es importante garantizar una buena cementación de la fase perforada y así poder evitar cualquier migración de fluido a través del espacio anular, que conforma el diámetro externo de la tubería y el hoyo.

VI.4.2. Diseño de la Operación

Se propone utilizar para esta fase una Lechada Única Antimigratoria de densidad de 14,5 lb/gal, (+/- 500 pies por encima de la zapata del revestidor de 16 pulg), y así dar una mayor integridad y soporte al revestidor de 13^{3/8} pulg, esta lechada será diseñada para proveer buenas propiedades mecánicas, con una resistencia a la compresión mayor de 1.500 lpc, en caso, que en esta sección del pozo se encuentren presencia de fluidos indeseables agua y/o gas.

VI.4.2.1. Sistema de Fluido

La perforación de esta fase se utilizara un lodo de perforación con una densidad comprendida entre [10,1-11,6] lb/gal ver Capítulo III (Fig. III.7). Este lodo estará compuesto principalmente por controlador de filtrado polimérico, Agua de Mar, Glicol, NaCl y KCL para favorecer un revoque delgado e impermeable que permita la limpieza del hoyo y la obstrucción de los diámetros de la formación que se pueden presentar en esta fase. El fluido de perforación deberá ser ambientalmente compatible con el suelo marino, de manera que se generen ripios no dañinos.

VI.4.2.2. Tren de Pre-flujo

Se utilizará un espaciador de 11,6 lb/gal, para así poder remover el revoque dejado por el lodo durante la perforación por efecto mecánico y a su vez separar las lechadas de cemento del lodo.

VI.4.3. Volumetría a Utilizar

Tabla V.10. Volumetría de Espaciador para el Hoyo 17^{1/2} pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Espaciador @ 11,6 lbs/gal	5	70	14

Tabla V.11. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 17^{1/2} pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Lechada Única @ 14,5 lb/gal	2	10	5
Lechada Única @ 14,5 lb/gal	4	229	57

Tabla V.12. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 17^{1/2} pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Agua de Mar	2	10	5
Agua de Mar	12	439	37
Agua de Mar	10	229	23
Agua de Mar	8	137	17
Agua de Mar	6	73	12
Agua de Mar	4	37	9
Agua de Mar	2	10	5

VI.4.4. Análisis de Tiempos de las Lechadas

Bombeo del Espaciador 00:14 hr:min

Liberación del Tapón Inferior (Blando) 00:05 hr:min

Bombeo de la Lechada Única 01:02 hr:min

Liberación del Tapón Superior (Duro) 00:05 hr:min

Desplazamiento 01:48 hr:min

Tiempo de la Operación 03:14 hr:min

Tiempo de Espesamiento de la Lechada Única (70 Bc) 05:14 hr:min

Margen de Seguridad: 02:00 hr:min

Nota: El tiempo de espesamiento final se determinará con las pruebas de laboratorio y va a depender de las concentraciones de los aditivos utilizados para preparar la mezcla de la lechada de cemento (ver Anexo 1).

VI.4.5. Centralizadores

Se propone utilizar +/- 22 centralizadores en total de Alta Restauración y Bajo Arranque Soldado de Tipo 305 Flexible, a través de estos se obtuvo un *stand off* de 70%, garantizando así una distribución regular tanto de los fluidos de perforación como de las velocidades anulares y los espesores de la capa de cemento.

Se colocará dos centralizadores entre collar flotador – zapata, y el resto será distribuido a lo largo de las tuberías de revestimientos espaciados aproximadamente a 84 pies (25,6m), con la finalidad de obtener a través del espacio anular la distribución óptima de la lechada de cemento.

VI.4.6. Estimación de Costos

La estimación de los costos se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios utilizados durante el proceso de cementación de esta fase (ver Anexo 2).

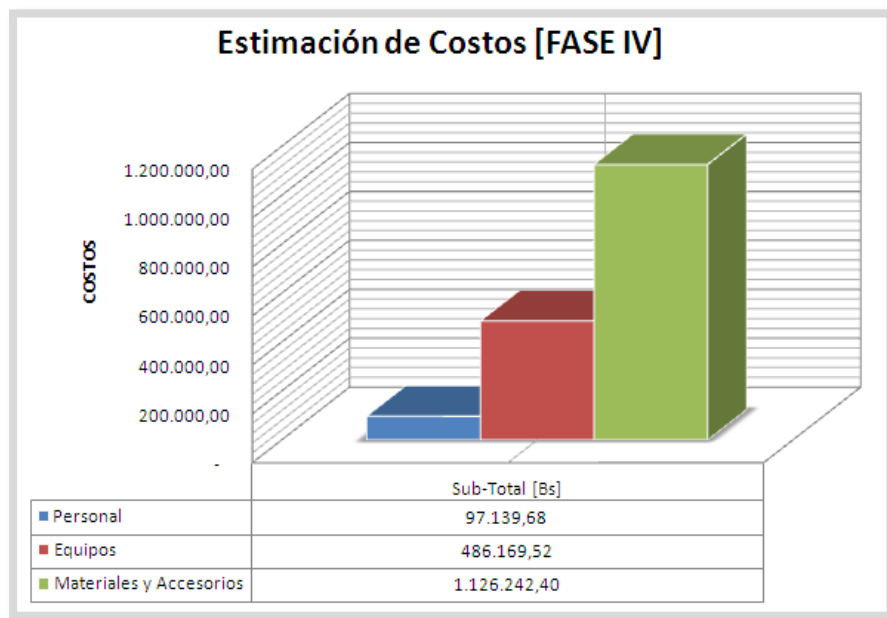


Figura VI.4. Estimación de Costos para la Fase IV

VI.5. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 9 ^{5/8} PULG

VI.5.1. Objetivos

La cementación del revestidor de 9^{5/8} pulg, tiene como finalidad crear un sello hidráulico, esto para lograr aislar zona de carbonato altamente fracturado, que permita el soporte y adherencia de la tubería de revestimiento, de manera que garantice una buena integridad del pozo, la no-migración de gas y restricción del movimiento de fluidos indeseados en el anular hasta el cabezal del pozo y de igual manera proteger la tubería de la corrosión.

Es importante tener un cemento de excelente propiedades mecánicas que permita ayudar al revestidor a soportar las fuerzas axiales a las que será sometido, una de ellas

será el soporte del *Liner* de producción, que se colgara en la parte interna de este revestidor.

VI.5.2. Diseño de la Operación

Se propone utilizar para esta fase una Lechada Única Antimigratoria de densidad comprendida de 14,5 lb/gal, (+/- 500 pies por encima de la zapata del revestidor de 13^{3/8} pulg), quedando el TOC a 11.800 pies para de esta manera dar una mayor integridad y soporte al revestidor de 9^{5/8} pulg, esta lechada será diseñada para proveer buenas propiedades mecánicas, con una resistencia a la compresión mayor de 1.500 lpc, en caso, que en esta sección del pozo se encuentren presencia de fluidos indeseables agua y/o gas.

VI.5.2.1. Sistema de Fluido

La perforación de esta fase se utilizara un lodo de perforación con una densidad que se encuentre comprendida entre [10,1-11,8] lb/gal, como ventana operacional. Este lodo estará compuesto principalmente por controlador de filtrado polimérico, Agua de Mar (*Drill in*), Glicol, NaCl y KCL para favorecer un revoque delgado e impermeable que permita la limpieza del hoyo y la obstrucción de los diámetros de la formación que se pueden presentar en esta fase. El fluido de perforación deberá ser ambientalmente compatible con el suelo marino, de manera que se generen ripios no dañinos.

VI.5.2.2. Tren de Pre-Flujo

Se utilizará un espaciador de 11,8 lb/gal, para así poder remover el revoque dejado por el lodo durante la perforación por efecto mecánico y separar la lechada de cemento del lodo. Dada las características reológicas estos fluidos están diseñados para ser desplazados en flujo laminar efectivo y turbulento respectivamente, asegurando una completa remoción del lodo de perforación.

VI.5.3. Volumetría a Utilizar

Tabla V.13. Volumetría de Lavador y Espaciador para el Hoyo 12^{1/4} pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Espaciador @ 12,5 lb/gal	5	60	12

Tabla V.14. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 12^{1/4} pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Lechada Única @ 14,5 lb/gal	2	10	5
Lechada Única @ 14,5 lb/gal	4	198	49

Tabla V.15. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 12^{1/4} pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Agua de Mar	2	10	5
Agua de Mar	12	375	31
Agua de Mar	10	184	18
Agua de Mar	8	61	8
Agua de Mar	6	34	6
Agua de Mar	4	27	7
Agua de Mar	2	10	5

VI.5.4. Análisis de Tiempos de las Lechadas

Bombeo del Espaciador 00:12 hr:min

Liberación del Tapón Inferior (Blando) 00:05 hr:min

Bombeo de la Lechada Única 00:54 hr:min

Liberación del Tapón Superior (Duro) 00:05 hr:min

Desplazamiento 01:20 hr:min

Tiempo de la Operación 02:36 hr:min

Tiempo de Espesamiento de la Lechada Única (70 Bc) 04:36 hr:min

Margen de Seguridad: 02:00 hr:min

Nota: El tiempo de espesamiento final se determinará con las pruebas de laboratorio y va a depender de las concentraciones de los aditivos utilizados para preparar la mezcla de la lechada de cemento (ver Anexo 1).

VI.5.5. Centralizadores

Se propone utilizar +/- 35 centralizadores en total de Cuerpo Sólido y Cuchara Recta Tipo 342, donde a través de estos se obtuvo un *stand off* de 70% aproximadamente, garantizando así una distribución regular tanto de los fluidos de perforación como de las velocidades anulares y los espesores de la capa de cemento.

Se colocará dos centralizadores sólido uno a 5 pies por encima de la zapata y el otro a 5 pies por debajo del collar flotador, esto para garantizar una buena centralización de la zapata de este revestidor, generando la distribución más óptima de la lechada de cemento.

VI.5.6. Estimación de Costos

La estimación de los costos se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios utilizados durante el proceso de cementación de esta fase (ver Anexo 2).

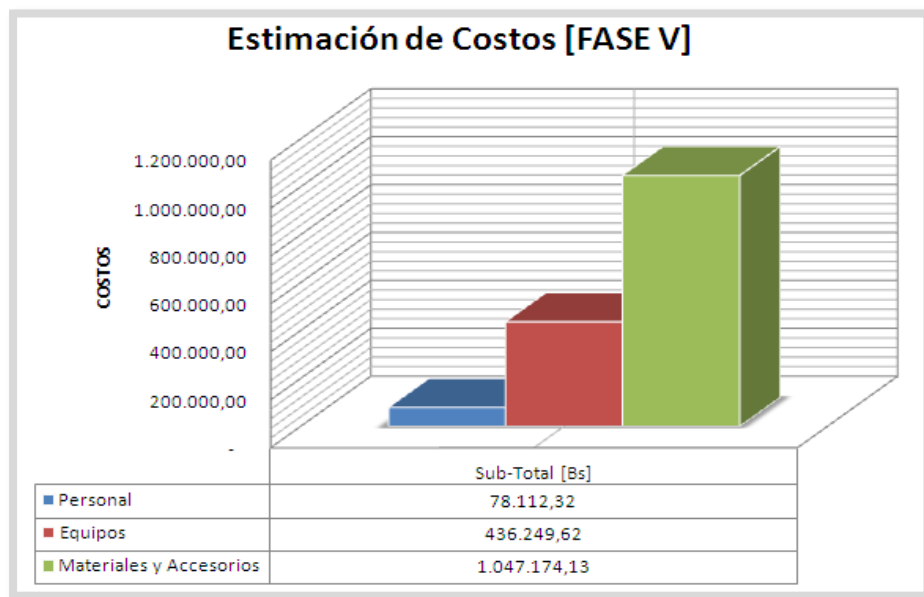


Figura VI.5. Estimación de Costos para la Fase V

VI.6. PROGRAMA DE CEMENTACIÓN REVESTIDOR DE 7 PULG

VI.6.1. Objetivos

La cementación del revestidor de 7 pulg, tiene como finalidad crear un sello hermético entre la tubería y la formación, que permita crear un aislamiento zonal y garantice una buena integridad al pozo, para evitar la no-migración de gas y restricción del movimiento de fluidos indeseados en el anular hasta el cabezal del pozo y de igual manera proteger la tubería de la corrosión.

Es importante tener un cemento de excelente propiedades mecánicas que permita ayudar al revestidor a soportar las altas presiones y temperaturas que posiblemente se encuentren durante el asentamiento de este revestidor.

VI.6.2. Diseño de la Operación

Se propone utilizar para esta fase una Lechada Única Antimigratoria de densidad comprendida de 14,5 lb/gal, (+/- 300 pies por encima de la zapata del revestidor de 9^{5/8} pulg), donde ira colgado a 14.332 pies el *Liner* 7 pulg, proporcionando una mayor integridad y soporte, esta lechada será diseñada para proveer buenas propiedades mecánicas, con una resistencia a la compresión mayor de 1.500 lpc, en caso, que en esta sección del pozo se encuentren presencia de fluidos indeseables agua y/o gas.

VI.6.2.1. Sistema de Fluido

La perforación de esta fase se utilizara un lodo de perforación, donde la densidad de este fluido se encuentra comprendida entre [9,9-11,7] lb/gal, densidad de poro y fractura respectivamente. Este lodo estará compuesto principalmente por controlador de filtrado polimérico, Agua de Mar, Glicol, NaCl, CaCO₃ y KCL para favorecer un revoque delgado e impermeable que permita la limpieza del hoyo y la obstrucción de los diámetros de la formación que se pueden presentar en esta fase. El fluido de perforación deberá ser ambientalmente compatible con el suelo marino, de manera que se generen ripios no dañinos.

VI.6.2.2. Tren de Pre-Flujo

Se utilizará un espaciador de 11,9 lb/gal, para así poder remover el revoque dejado por el lodo durante la perforación por efecto mecánico y de esta manera evitar canalización de fluidos indiciados durante el proceso de cementación, separando la lechada de cemento del lodo. Dada las características reológicas estos fluidos están

diseñados para ser desplazados en flujo laminar efectivo y turbulento respectivamente, asegurando una completa remoción del lodo de perforación.

VI.6.3. Volumetría a Utilizar

Tabla IV.16. Volumetría de Lavador y Espaciador para el Hoyo 8 ½ pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Espaciador @ 11,9 lb/gal	5	60	12

Tabla IV.17. Volumetría de las Lechadas de cemento para el Hoyo 8 ½ pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Lechada Única @ 14,5 lb/gal	2	10	5
Lechada Única @ 14,5 lb/gal	4	61	15

Tabla IV.18. Volumetría de Desplazamiento para el Hoyo 8 ½ pulg

Volumen [Bls]	Tasa de Bombeo [Bls/min]	Cantidad [Bls]	Tiempo [min]
Agua de Mar	2	10	5
Agua de Mar	5	761	152

VI.6.4. Análisis de Tiempos de las Lechadas

Bombeo del Espaciador 00:12 hr:min

Liberación del Tapón Inferior (Blando) 00:05 hr:min

Bombeo de la Lechada Única 00:20 hr:min

Liberación del Tapón Superior (Duro) 00:05 hr:min

Desplazamiento 02:37 hr:min

Tiempo de la Operación 03:20 hr:min

Tiempo de Espesamiento de la Lechada Única (70 Bc) 05:00 hr:min

Margen de Seguridad: 02:00 hr:min

Nota: El tiempo de espesamiento final se determinará con las pruebas de laboratorio y va a depender de las concentraciones de los aditivos utilizados para preparar la mezcla de la lechada de cemento (ver Anexo 1).

VI.6.5. Centralizadores

Con la finalidad de obtener mayor estabilidad durante la corrida del revestidor y de esta manera obtener un *stand off* mínimo de 70%, se colocará un aproximado de +/- 30 centralizadores en total, garantizando así una distribución regular tanto de los fluidos como de las velocidades anulares y los espesores de la capa de cemento. Los centralizadores que se proponen utilizar son de Cuerpo Sólido y Cuchilla en Espiral, colocando dos centralizadores sólido entre collar flotador – zapata, de la misma manera que la fase anterior, para mejorar las velocidades anulares de los fluidos y distribuir eficientemente la lechada de cemento.

VI.6.6. Estimación de Costos

La estimación de los costos se realizó tomando en cuenta el personal, equipos, materiales y accesorios utilizados durante el proceso de cementación de esta fase (ver Anexo 2).

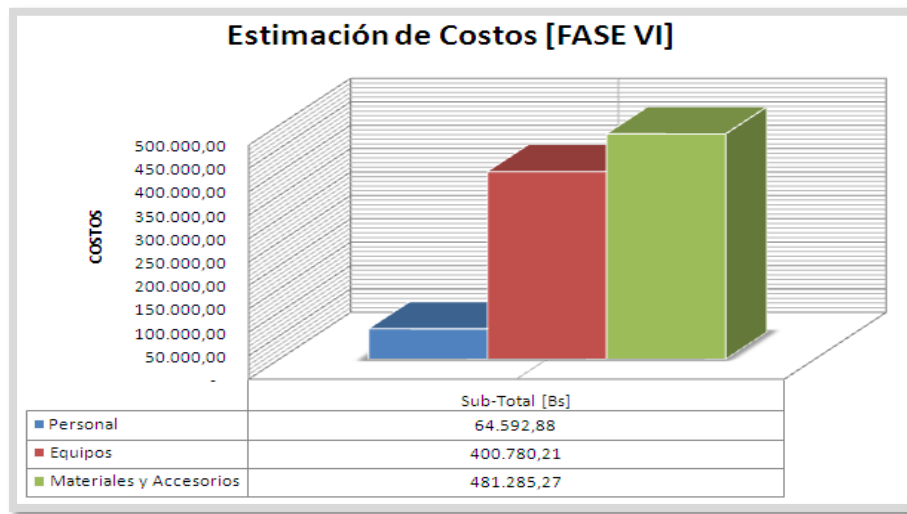


Figura VI.6. Estimación de Costos para la Fase VI

CONCLUSIONES

En base al desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado se concluye lo siguiente:

1. El estudio de las características litoestratigráficas del Bloque 54, permitió elaborar una propuesta por fases para las formaciones a cementar, ya que estas van varián significativamente y con ellas la composición de la lechada de cemento.
2. Para la cementación del Pozo RR-1X se propuso la aplicación del cemento Clase H y de lechadas antimigratorias para todas y cada una de las fases que conforman el pozo exploratorio en estudio.
3. Las lechadas de cementos para las dos primeras fases poseen propiedades tixotrópicas que permitirá generar geles ideales con la finalidad de bloquear momentáneamente las zonas de amplio diámetro de poro y problemas de pérdida de circulación.
4. La técnica de cementación que deber ser aplicada para las dos primeras fases es totalmente diferente a las fases siguientes que complementan al pozo en estudio, el cual se realiza por medio de sartas internas (*Inner String*).
5. El software de cementación (*OptiCem*), permitió realizar las evaluaciones operacionales para de esta manera mejorar y optimizar la propuesta de cementación.

6. Por medio de la aplicación del software de cementación (*OptiCem*), se ajustaron las tasas de bombeo del espaciador, cemento y fluido desplazante, esto para evitar fracturar la formación durante el proceso de cementación.
7. Las fases I y II del pozo exploratorio son aquellas que presentan mayor costos en el servicio de cementación, debido a las cantidades de aditivos empleados por sus altos niveles de complejidad y los grandes volúmenes de lechadas de cementos empleados.
8. Para las fases III y IV del pozo se utilizó el menor porcentaje de volumen en exceso, debido a que estas formaciones representan las rocas sello de la columna litoestratigráfica del pozo RR-1X.
9. Para las fases productoras se propuso una densidad de lechada de 14,5 lb/gal para evitar problemas operacionales durante la cementación de los carbonatos fracturados que son propensos a encontrarse en estas zonas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar las pruebas de laboratorio a las propuestas de cementación, con la finalidad de determinar las propiedades reológicas más óptimas que permitan adaptarse a las condiciones del área.
2. Crear una base de datos referente al pozo en estudio para de esta manera optimizar todas las operaciones de perforación, incluyendo los procesos de cementación.
3. Durante las operaciones de las fases I y II se deberá monitorear en todo momento la operación de cementación con el ROV, observar el posible cambio de color en el lecho marino producto de indicadores químicos agregados al espaciador, esto significa que se ha alcanzado el tope del cemento en el lecho marino, pero no se debe dejar de bombear cemento hasta cumplir el 300% y 200% respectivamente del volumen de exceso preestablecido.
4. Realizar la perforación de un hoyo piloto de 12 ¼ pulg, una vez culminada la primera fase. Debido a la necesidad de conocer las características geológicas del Campo, se requiere recopilar la mayor cantidad de datos posibles a medida que vayan avanzando las operaciones de perforación, por lo que se hace imprescindible la toma de registros en esta sección.
5. Implementar agentes antimigratorios y controladores de pérdida de circulación en la composición de las lechadas a utilizar, debido a que las fases a cementar están propensas a presentar arenas poco consolidadas y zonas cavernosas.

6. Para las fases I y II, los sistemas de pre-flujos se le deben incorporar aditivos que formen cristales instantáneos, creando un sello en los poros de la formación, para así favorecer la columna de la lechada y que esta pueda alcanzar el lecho marino durante el bombeo.
7. Realizar un ajuste económico detallado, una vez que se realicen la pruebas de laboratorio con la finalidad de reducir los costos obtenidos y evaluar los ahorros significativos de la tecnología aplicada.
8. Antes de iniciar la mezcla de cemento, agregar 2 gal de antiespumante líquido a la tina de la mezcla con 3 Bls de agua, para evitar excesiva generación de espuma.
9. Se debe llevar estricto control sobre la operación de perforación para detectar posibles indicios de pérdida de circulación en cada una de las fases, de ser así, estas pérdidas deberán ser remediadas en lo posible antes de cementar.
10. En caso de que el equipo de flotación falle se deberán bombear los barriles retornados rápidamente a una tasa de 6 Bls/min y verificar retorno.
11. Ajustar los volúmenes de las lechadas de cementos, de acuerdo al diámetro promedio que de como resultado del registro del *Caliper*.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Cemento Pórtland.** Consultado el 19 de Octubre de 2.011, de http://es.wikipedia.org/wiki/Cemento_portland.
- [2] Díaz, P. y Méndez, A. (2007). **Fundamentos teóricos prácticos de perforación y construcción de pozos.** Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [3] Bolívar, Rafael. **Cementación de Pozos de Petróleo y Gas. Materia Electiva para la Escuela de Petróleo.** Universidad Central de Venezuela. Holcim Venezuela. Presentación Digital.
- [4] **Revestimiento y Cementación de Pozos UNEFA.** Consultado el 18 Octubre 2.011, de http://www.buenastareas.com/ensayos/Cementacion-De-Pozos-y-Revestidotes_/2071001.html.
- [5] MENDOZA L. 2006. **Curso de Cementación de Pozos.** PDVSA Servicios S.A. Punta de Mata, Monagas-Venezuela.
- [6] **INGENIERIA DE CEMENTACIÓN.** Consultado el 12 de Septiembre de 2.011, de <http://www.cedip.edu.mx/tomos/tomo07.pdf>.
- [7] Nelson, E Nelson, E. (1990). **Well Cementing.** Schlumberger Dowell, Sugar Land. Texas.
- [8] **Cementos Especiales.** Consultado el 21 de Noviembre de 2011, de <http://es.scribd.com/doc/46228694/25/Cementos-especiales>.

- [9] The Robert Gordon University (2007). **Cementing Operation**. MSc Energy Programme / Drilling Technology Cementing Operations.
- [10] Vásquez, J. (2002). **Estudio y Diseño de Cementación Primaria de Pozos en el Área Mayor de Socororo**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [11] **ENI DRILLING DESIGN MANUAL**. Consultado el 21 de Octubre de 2.011, de <http://www.arpo.in.agip.it>.
- [12] **Cementing Services & Products Catalog**. Consultado el 13 de Octubre de 2.011, de http://www.slb.com/~media/Files/cementing/catalogs/cementing_catalog.ashx.
- [13] Chegin, J. (2002). **Uso de la Tecnología del Concreto para el diseño de la Lechada de Cementación de Pozos Petroleros**. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [14] Abbas, Raafat. (2002). **Soluciones a Largo Plazo para el aislamiento Zonal**. Oilfield Review. Invierno 2002/2003.
- [15] Caballos, V (2005). **Evaluación del Proceso de Centralización de Tuberías de Revestimiento para la Cementación Primaria en los pozos del Distrito Anaco**. Trabajo Especial de Grado. Universidad de Oriente, Maturín.
- [16] **Tenaris**. Consultado el 31 de Noviembre de 2.011, de <http://www.tenaris.com/shared/documents/files/CB186.pdf>.

- [17] **Introducción a la Cementación.** Consultado el 10 de Octubre 2.011, http://seia.sea.gob.cl/archivos/Anexo_IX_Procedimiento_de_Cementacion.pdf.
- [18] **Introducción al Equipo de perforación.** Consultado el 22 de Febrero de 2.012, http://issuu.com/biliovirtual/docs/schlumberger_introduccion_al_equipo_de_perforacion/22?mode=a_p.
- [19] Molero J., Zambrano O. (2008). **Cementación Primaria de Pozos.** Seminario de Cementación Maturín - Venezuela.
- [20] **Golfo de México.** Consultado el 27 de Noviembre de 2.011, de http://es.wikipedia.org/wiki/Golfo_de_M%C3%A9xico Consultada 2011, 27].
- [21] **Geología del Golfo de México.** Consultado el 30 de Septiembre 2.011, de http://www.oid-ido.org/IMG/pdf/El_golfo_de_mexico.pdf.
- [22] Cuvillier, Gérard (2000). **Soluciones para los problemas de la construcción de pozos en aguas profundas.** Oilfield Review. Verano 2000.
- [23] Betancourt A., Gonzalo E. (2007). **Perforación Costa Afuera: Estado del Arte.** Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [24] Velasco A., Vegas A. (2009). **Aplicación del Método de Elementos Finitos en Tubería Verticales Ascendente (*Riser Marino*) Usadas en Perforaciones de Pozos Costa Afuera.** Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

[25] Separata Técnica, **Proyecto exploratorio en aguas profundas, Área Golfo de México**. Fuente: PDVSA Servicio (2011).

[26] **Revestimiento y Cementación de Pozo**. Consultado el 28 de Octubre de 2011, de <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8020/1/Dise%C3%B1o%20de%20Revestimiento%20y%20Cementaci%C3%B3n%20de%20pozos%20en%20el%20Oriente%20Ecuatoriano.pdf>.

[27] ARIAS F. 2006. **El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica. (Cuarta edición)**. Editorial Episteme. Caracas-Venezuela.

APÉNDICES

Apéndice I. Matrices de Evaluación para la selección de las lechadas

Para seleccionar las posibles lechadas de cemento de cada una de las fases que corresponden al pozo RR-1X, se hizo necesario realizar matrices de evaluación y con estas se determinaron y seleccionaron las posibles lechadas de acuerdo a las condiciones del pozo en estudio. Donde la matriz que arrojó mayor ponderación fue la seleccionada para trabajar en base a esta.

Las matrices de evaluación fueron realizadas por medio de documentación técnica referente a las cementaciones primarias exitosas realizadas en zonas costa afuera, a demás de entrevistas y reuniones con expertos en materia de cementación de pozos.

FASE I: Hoyo Conductor: Para esta fase se realizaron 4 matrices de evaluación para de esta manera seleccionar la que mayor ponderación promedie.

Tabla A.1. Matriz de Evaluación: Lechada I.1

Propuesta Técnica		
T: [39-44]°F	Prof.: [7.086-7.415]ft	Ponderación
Lechada	Única Alivianada	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	12,5	2
Aditivos	Acelerador, Antimigratorio, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.2. Matriz de Evaluación: Lechada I.2

Otra Propuesta		
T: [39-44]°F	Prof.: [7.086-7.415]ft	Ponderación
Lechada	Única Alivianada	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	12,5	2
Aditivos	Acelerador, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.3. Matriz de Evaluación: Lechada I.3

Experiencia en Campo Dragón (Venezuela)		
T: [78-80]°F	Prof.: [495-688]ft	Ponderación
Lechada	Única Tixotrópica	3
Cemento	G	2
ρ [lb/gal]	14,2	1
Aditivos	Microesfera, Acelerador, Dispersante, Controlador de Filtrado, Antiespumante	3
TOTAL		9

Tabla A.4. Matriz de Evaluación: Lechada I.4

Experiencia en Green Canyon (GOM)		
T: [65-70]°F	Prof.: [4.427-4.821]ft	Ponderación
Lechada	Única Espumante	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	1
Aditivos	Espuma, Acelerador, Extendedor, Controlador de Filtrado	2
TOTAL		9

FASE II: Hoyo Superficial: Para esta fase se realizaron 4 matrices de evaluación y así seleccionar la matriz que mayor ponderación tenga.

Tabla A.5. Matriz de Evaluación: Lechada II.1

Propuesta Técnica		
T: [44-72]°F	Prof.: [7.086-9.268]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H + Microcemento	3
ρ [lb/gal]	12,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.6. Matriz de Evaluación: Lechada II.2

Otra Propuesta		
T: [44-72]°F	Prof.: [7.086-9.268]ft	Ponderación
Lechada	Alivianada + Convencional	1
Cemento	H	2
ρ [lb/gal]	12,5 / 15,6	1
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	2
TOTAL		6

Tabla A.7. Matriz de Evaluación: Lechada II.3

Experiencia en Campo Dragón (Venezuela)		
T: [80-90]°F	Prof.: [495-1.600]ft	Ponderación
Lechada	Única Tixotrópica	3
Cemento	G	2
ρ [lb/gal]	14,2	1
Aditivos	Microesfera, Acelerador, Antimigratorio, Dispersante, Controlador de Filtrado, Antiespumante	3
TOTAL		9

Tabla A.8. Matriz de Evaluación: Lechada II.4

Experiencia en Green Canyon (GOM)		
T: [65-70]°F	Prof.: [4.427-4.717]ft	Ponderación
Lechada	Única Espumante	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	1
Aditivos	Espuma, Acelerador, Extendedor, Controlador de Filtrado	2
TOTAL		9

FASE III: Hoyo Intermedio 1: Para esta fase se realizaron 2 matrices de evaluación, debido que se encontró casos o experiencias referente a este tipo de revestidor, pero por medio de reuniones con expertos en la materia de cementación y los estudios realizados se tienen las siguientes matrices.

Tabla A.9. Matriz de Evaluación: Lechada III.1

Propuesta Técnica		
T: [72-98]°F	Prof.: [9.268-11.000]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	13,5	3
Aditivos	Retardador, Dispersante, Extendedor, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		12

Tabla A.10. Matriz de Evaluación: Lechada III.2

Otra Propuesta		
T: [72-98]°F	Prof.: [9.268-11.000]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	13,5	3
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		12

FASE IV: Hoyo Intermedio 2: Para esta fase se realizaron 4 matrices de evaluación y así seleccionar la matriz que mayor ponderación tenga.

Tabla A.11. Matriz de Evaluación: Lechada IV.1

Propuesta Técnica		
T: [98-118]°F	Prof.: [11.000-12.300]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.12. Matriz de Evaluación: Lechada IV.2

Otra Propuesta		
T: [98-118]°F	Prof.: [11.000-12.300]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.13. Matriz de Evaluación: Lechada IV.3

Experiencia en Campo Dragón (Venezuela)		
T: [°F]	Prof.: [1.600-7.428]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	G	2
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Microesfera, Dispersante, Controlador de Filtrado, Antiespumante	3
TOTAL		10

Tabla A.14. Matriz de Evaluación: Lechada IV.4

Experiencia en Green Canyon (GOM)		
T: [°F]	Prof.: [4.427-6.662]ft	Ponderación
Lechada	Única Espumante	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,2	2
Aditivos	Espuma, Acelerador, Extendedor, Controlador de Filtrado	2
TOTAL		10

FASE V: Hoyo Productor 1: De manera similar a las fases anteriores, para esta sección se realizaron 4 matrices de evaluación y así seleccionar la de mayor ponderación.

Tabla A.15. Matriz de Evaluación: Lechada V.1

Propuesta Técnica		
T: [118-153]°F	Prof.: [12.300-14.632]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.16. Matriz de Evaluación: Lechada V.2

Otra Propuesta		
T: [118-153]°F	Prof.: [12.300-14.632]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	15,6	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Antiespumante	2
TOTAL		10

Tabla A.17. Matriz de Evaluación: Lechada V.3

Experiencia en Campo Dragón (Venezuela)		
T: [°F]	Prof.: [7.428-8.032]ft	Ponderación
Lechada	Alivianada Antimigratoria + Convencional	1
Cemento	G	2
ρ [lb/gal]	13,5 / 15,8	1
Aditivos	Microesfera, Extendedor, Dispersante, Controlador de Filtrado, Antiespumante	3
TOTAL		7

Tabla A.18. Matriz de Evaluación: Lechada V.4

Experiencia en Green Canyon (GOM)		
T: [°F]	Prof.: [12.767-14.500]ft	Ponderación
Lechada	Antimigratoria + Convencional	1
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	15,7 / 16,2	1
Aditivos	Espuma, Dispersante, Extendedor, Controlador de Filtrado, Retardador, Antiespumante	2
TOTAL		7

FASE VI: Hoyo Productor 2: A diferencia de las fases anteriores para esta sección se realizaron 3 matrices de evaluación y así seleccionar la de mayor ponderación, es decir, la que mejor se ajuste a las condiciones de esta fase.

Tabla A.19. Matriz de Evaluación: Lechada VI.1

Propuesta Técnica		
T: [153-185]°F	Prof.: [14.632-16.732]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	14,5	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Controlador de Pérdida, Antiespumante	3
TOTAL		11

Tabla A.20. Matriz de Evaluación: Lechada VI.2

Otra Propuesta		
T: [153-185]°F	Prof.: [14.632-16.732]ft	Ponderación
Lechada	Única Antimigratoria	3
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	15,6	2
Aditivos	Retardador, Dispersante, Antiespumante	2
TOTAL		10

Tabla A.21. Matriz de Evaluación: Lechada VI.3

Experiencia en Green Canyon (GOM)		
T: [°F]	Prof.: [18.000-23.695]ft	Ponderación
Lechada	Antimigratoria + Convencional	2
Cemento	H	3
ρ [lb/gal]	15,7 / 16,2	1
Aditivos	Espuma, Dispersante, Extendedor, Controlador de Filtrado, Retardador, Antiespumante	3
TOTAL		9

Apéndice II. Cálculos Tipos Volúmenes de las Lechadas.

Fase I: Hoyo Conductor

Capacidades

C₁: Capacidad del diámetro interno del revestimiento

C₂: Capacidad del diámetro hoyo y la el diámetro externo del revestimiento

C₃: Capacidad del diámetro hoyo (bolsillo)

C₄: Capacidad del diámetro del diámetro interno de la sarta interna (*Inner String*)

Volúmenes de Lechadas

Este volumen será calculado con un incremento del 300%, debido a las complejidades geológicas que se pueden presentar en esta fase y asegurar retorno de cemento al lecho marino.

—

Volúmenes de Desplazamiento

—

—

Apéndice III. Metodología para la Estimación de los Costos.

Para determinar los Costo Total Equivalente en Bolívares Fuertes de cada una de las fases se realizó utilizando el siguiente procedimiento:

Una vez que se tiene el costo total equivalente del Personal, Equipos, Materiales y Accesorios se suman cada uno de estos para determinar la Oferta Total del programa de cementación para todas las fases que conforman al pozo exploratorio RR-1X.

Adherencia: Unión física que resulta de haberse pegado una cosa de otra, este término es utilizado en la industria petrolera cuando el cemento entra en contacto con la formación y el diámetro externo del revestidor.

Aditivos: Es una sustancia que se agrega en cantidades pequeñas a una cantidad grande de otra sustancia para cambiar algunas características de esta última. En cementación, es una sustancia que se agrega al cemento para cambiar las características de éste y satisfacer las condiciones específicas del pozo. Un aditivo de cemento puede trabajar como acelerador, retardador, entendedor, densificante, u otro reactante.

Arcilla: Es la materia prima para la fabricación del cemento y se encarga de aportar el óxido de aluminio. La arcilla es una tierra plástica, blanda y de diversos colores, está compuesta principalmente por silicato de aluminio hidratado, formado por la descomposición del feldespato y otros silicatos de aluminio.

Arena: Es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. Se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros, formada principalmente por sílice.

Batimetría: Es el estudio de la profundidad marina, en tres dimensiones de los fondos lacustres o marinos.

Bioclotos: Cualquier elemento fósil, entero o fragmento, de origen animal o vegetal que haya o no sufrido transporte.

Bioturbación: Re exposición de sedimentos enterrados y de contaminantes asociados en la interfase agua-sedimento como resultado de la excavación de los fondos de los cuerpos de agua por los macro invertebrados acuáticos (gusanos oligoquetos).

Brechas: Roca formada por un 50%, al menos, de fragmentos angulosos con diámetro mayor de 2 mm, unidos en un cemento.

Caliza: Es una roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio (CaCO_3), generalmente calcita. También puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, entre otros, que modifican el color y el grado de coherencia de la roca.

Cavitación: Es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido.

Cenozoico: Era geológica también conocida como Era Terciaria, que comprende desde el final del Mesozoico hasta el comienzo del Antropozoico, con una duración aproximada de 65 millones de años. Se divide en los períodos Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Plioceno.

Clinker: Sustancia que se forma fundiendo limolita, arcilla o lutita, y mineral de hierro en un horno. El clinker es molido en una mezcla polvorienta y combina cantidades pequeñas de yeso u otro material para formar el cemento.

Creta: Roca sedimentaria marina, calcárea (90% o más de CaCO_3), de grano muy fino, blanca, porosa, blanda y friable, que deja traza. Está formada en su mayor parte por una acumulación de cocolitos y contiene frecuentemente foraminíferos.

Cretácico: Último periodo de la Era Secundaria, el cual tuvo sus comienzos hace 144 millones de años y que finalizó hace 65 millones aproximadamente. Es un período en el cual la tierra se encuentra en relativa calma orogénica, semejante paleontológica y paleogeográficamente al Jurásico.

Cuaternario: Era geológica comprendida entre el Terciario y los tiempos actuales, con una duración aproximada de un millón y medio de años. También se le denomina era Antropozoica o Neozoica. Se divide en dos períodos: Pleistoceno y Holoceno. El hecho más importante de este período lo constituye la aparición del hombre.

Densidad: Dimensión de la materia según su masa por unidad de volumen. En la terminología petrolera la densidad de los fluidos de perforación y lechadas de cementos se denomina con frecuencia “peso” y se expresa en libras por galón [lpg], libras por pie cúbico [lb/pe3] o en gramos por centímetro cúbicos [g/cm3].

Densidad Equivalente de Circulación (DEC): Para un fluido circulante, la densidad equivalente de circulación en [lb/gal] es igual al peso de su columna hidrostática [lpc] más la pérdida total de presión por fricción [lpc], divididas por la profundidad [pies] y por 0,052.

Deshidratación del cemento: Durante la deshidratación del cemento, el agua contenida en el cemento es inyectada a la formación y se forma un revoque (torta de filtrado) de partículas sólidas en la cara de la formación.

Eoceno: Periodo de la era Cenozoica que se inició hace unos 54 millones de años y que tuvo una duración aproximada de 9 millones de años. En éste período se presenta la máxima expansión de los mares, intensa actividad volcánica y marcada orogenia.

Espacio Anular: Espacio entre dos círculos. En el caso de un pozo, es el espacio entre dos tuberías o entre una tubería y la pared de la formación.

Estratigrafía: Es la rama de la Geología que trata del estudio e interpretación de las rocas sedimentarias estratificadas, y de la identificación, descripción, secuencia, tanto

vertical como horizontal; cartografía y correlación de las unidades estratificadas de rocas.

Facies: Conjunto de caracteres petrográficos y paleontológicos que definen un depósito o una roca.

Falla: Es una discontinuidad que se forma por fractura en las rocas superficiales de la Tierra, cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas.

Foraminíferos: Son organismos marinos, unicelulares y que viven en el fondo del mar, están formados por materia orgánica en su totalidad, mezclada con granos de arena, o compuestas por una capa interna fina de materia orgánica y una capa externa gruesa de naturaleza calcárea.

Formación: Es una unidad litoestratigráfica formal que define cuerpos de rocas caracterizados por unas propiedades litológicas comunes (composición y estructura) que las diferencian de las adyacentes. Es la principal unidad de división litoestratigráfica.

Gradiente de fractura: Presión por pie de profundidad que se requiere para que se inicie la fractura de una formación o arena.

Ilmenita: Es un mineral débilmente magnético, de color negro o gris, que se encuentra en las rocas metamórficas y en las rocas básicas ígneas (gabro, diabasa, piroxenita), o en placeres.

Lechada: Es una mezcla de partículas sólidas (cemento y aditivos) en una fase acuosa, con características físicas y químicas propias.

Litología: Es la parte de la geología que trata de las rocas, especialmente de su tamaño de grano, del tamaño de las partículas y de sus características físicas y químicas. Incluye también su composición, su textura, tipo de transporte así como su composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

Lodo de perforación: Fluido de perforación de base agua o base petróleo, cuyas propiedades han sido alteradas por sólidos, naturales o de producción industrial, disueltos y suspendidos. Es utilizado para hacer circular hacia fuera los recortes, posee también muchas otras funciones en la perforación de un pozo.

Lutita: Arcilla de origen rocoso, finamente granular, con clivaje tipo pizarra, que a veces contiene una sustancia orgánica parecida al petróleo.

Marga: Tipo de roca sedimentaria compuesta principalmente de calcita y arcillas, con predominio, por lo general, de la calcita, lo que le confiere un color blanquecino con tonos que pueden variar bastante de acuerdo con las distintas proporciones y composiciones de los minerales principales.

Mesozoico: Era geológica también conocida como Era Secundaria, que tuvo sus comienzos hace 248 millones de años y que finalizo hace 65 millones de años aproximadamente. Se encuentra dividida tres períodos: Triásico, Jurásico y Cretácico.

Mioceno: Período de la era Cenozoica comprendido entre el Plioceno y el Oligoceno, el cual se inicio hace unos 24 millones de años aproximadamente y que tuvo una duración aproximada de 12 millones de años. En este período la distribución continental y oceánica es semejante a la actual.

MCU: Discontinuidad producida por extensas inundaciones en aguas profundas.

Núcleo: Es una muestra cilíndrica tomada de la formación para análisis geológico.

Oligoceno: Período de la era Cenozoica, entre el Eoceno y el Mioceno, el cual tuvo su inicio hace unos 34 millones de años y que tuvo una duración aproximada de 10 millones de años. Durante este período alcanzan gran desarrollo los mamíferos.

Oncolito: Es una concreción calcárea esférica, formadas por capas concéntrica, de ángulos milimétricos a algunos centímetros de diámetro, de origen orgánico formado en aguas marinas o lacustre, de capas concéntricas de algas (azules o verdes), alrededor de un fragmento.

Oolito: Pequeñas esfera de 0,5 a 2 milímetros como promedio, cuyo centro es un fragmento (grano de cuervo, trozo de concha) y la envoltura está formadas por delgadas capas que dan una estructura concéntrica.

Peloides son agentes físicos semilíquidos, formados por una mezcla de sustancias orgánicas o inorgánicas resultantes de procesos biológicos, geológicos y agua mineral, agua del mar o agua de lago salado.

Plagioclas: Es un mineral triclínico perteneciente el grupo de los tectosilicatos que es un constituyente importante de muchas rocas, específicamente está constituido por la solución sólida isomorfa comprendida entre la albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y la anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Pleistoceno: Período geológico de comienzos del Cuaternario, con una duración aproximada de 1 millón de años. Comprende varios períodos de glaciaciones y antropológicamente corresponde al desarrollo de los antepasados del hombre actual (australopitecos, pitecántropos y hombre de Neandertal).

Plioceno: Período final de la era Cenozoica, comprendido entre el Mioceno y la era Cuaternaria, el cual se inicio hace unos 12 millones de años y que tuvo una duración aproximada de 10 millones de años. Período en el cual la fauna y la flora son semejantes a las actuales.

Porosidad: Es la relación que hay entre el volumen vacío en el interior de una roca y su volumen bruto.

Presión de colapso: Es la máxima presión externa que el revestidor puede resistir. Estas presiones pueden ser; la presión de fluidos de la formación, presión hidrostática del fluido en el hoyo y la presión impuesta.

Presión de estallido: Es la máxima presión interna que el revestidor puede resistir. Estas presiones actúan del centro de la tubería al centro de la misma.

Presión de poro: Es la presión ejercida por los fluidos contenidos en los poros de la roca. También se le considera la presión del yacimiento.

Presión hidrostática: Presión ejercida por una columna de fluido; se expresa habitualmente en libras por pulgada cuadrada [lpc].

Programación: Proceso mediante el cual el continente gana terreno al mar por deposición de materiales en la región costera.

Punto cedente: Tensión máxima que un sólido o líquido puede resistir sin sufrir la deformación permanente por el flujo plástico o por ruptura.

Reología: Es un término que denota el estudio de la deformación de los materiales, incluyendo los fluidos. En la terminología petrolera, la frase propiedad de flujo y

viscosidad, son las expresiones generalmente usadas para describir las cualidades de un fluido en movimiento.

Resistencia a la compresión: Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento.

Revoque: Película que se forma en las paredes de la formación y que está conformada por las partículas presentes en el lodo de perforación. Su espesor y propiedades físicas dependen de las características del lodo y del pozo, permitiendo disminuir la pérdida de filtrado a la formación.

Rifts: Son áreas donde la presencia de grietas indican que la corteza está sufriendo divergencia y distensiones. Estas zonas son producto de la separación de las placas tectónicas y su presencia produce seísmos y actividad volcánica recurrente.

Tiempo de bombeabilidad: Tiempo requerido para que un cemento comience a endurecerse o a formar resistencia de gel, o sea que sea bombeable bajo condiciones de fondo del pozo.

Tiempo de espesamiento: Desde el punto de vista operacional, es el tiempo durante el cual se considera que la lechada de cemento debe colocarse en el espacio anular y que esta desarrolle fuerzas de compactación casi inmediata con el fin de acortar el tiempo de fraguado.

Tiempo de fraguado: Es el tiempo que debe tener la lechada de cemento en compactarse. Este tiempo que inicia desde que los aditivos entran en contacto con el agua en la mezcla hasta que la lechada de cemento fragüe o seque.

Tixotropía: Capacidad de un fluido para desarrollar resistencia de gel con el tiempo. Propiedad de un fluido que hace que adquiera una estructura de gel rígido o semi-rígido si se deja en reposo, pero que se convierte nuevamente en fluido por agitación mecánica.

Abreviaturas

API: Instituto Americano del Petróleo.

Bc: Unidad de Consistencia.

BHCT: Bottom Hole Circulating Temperature. Temperatura circulante de fondo de hoyo.

BHA: Ensamblaje de fondo.

BHST: Bottom Hole Static Temperature. Temperatura estática de fondo de hoyo.

DSDP: Deep Sea Drilling Project. Proyecto de perforación geotécnica realizada en el Golfo de México.

ECD: Densidad equivalente de circulación.

E&P: Exploración y Producción.

GOM: Golfo de México.

GOR: Relación Gas Petróleo.

IADC: International Association of Drilling Contractor.

MCU: Unidad de Cretácico Medio, marcador geológico regional de la cuenca.

OptiCem: Programa que simula el proceso de cementación primaria.

PSPSA: PDVSA Servicios Petroleros Sociedad Anónima.

Riser: Tubo ascendente que conecta el cabezal submarino con superficie.

RKB: Elevación de la mesa rotaria.

ROV: Remotely Operated Vehicle (Robot Submarino).

SPE: Society of Petroleum Engineer.

TOC: Top of Cement (Tope de Cemento).

TVD: True Vertical Deep.

WOC: Waiting of Cement (Fraguado de Cemento).

Unidades

°C: Grados Centígrados.

°F: Grados Fahrenheit.

Bls: Barriles.

FT (ft): Pies.

GOES: Gas original en sitio.

GPM (gpm): Galones por minutos.

GS (GE): Gravedad específica.

Lb/ft² (lpc): Libras por pulgada cuadrada.

Lb/Gal (lpg): Libras por galón.

Ma: Millones de años.

Min: Minutos.

MMBls: Miles de Millones de Barriles.

pc/sc (ft³/sc): Pies cúbicos por saco.

POES: Petróleo original en sitio.

RPM: Revoluciones por Minuto.