

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CEMENTACIÓN DE LA SECCIÓN
INTERMEDIA DE UN POZO INYECTOR DE UN CAMPO EN LA CUENCA
LLANOS ORIENTALES POR MEDIO DE LA SIMULACIÓN DEL USO DE LA
TECNOLOGÍA CABEZA ROTATIVA DE CEMENTACIÓN

MARIA CAMILA ALVAREZ HERRERA
EDSSON GIOVANY MARQUEZ DIAZ

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, COLOMBIA
2016

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DE CEMENTACIÓN DE LA SECCIÓN
INTERMEDIA DE UN POZO INYECTOR DE UN CAMPO EN LA CUENCA
LLANOS ORIENTALES POR MEDIO DE LA SIMULACIÓN DEL USO DE LA
TECNOLOGÍA CABEZA ROTATIVA DE CEMENTACIÓN

MARIA CAMILA ALVAREZ HERRERA
EDSSON GIOVANY MARQUEZ DIAZ

Trabajo de Grado para optar al título de:
INGENIERO DE PETRÓLEOS

DIRECTOR
Ingeniero Gino Nucci Rada

ORIENTADOR
Ingeniero Alejandro Contreras Garzón

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, COLOMBIA
2016

Nota de aceptación

Ing. Julio Montenegro Camacho

Ing. Iván Peñaloza Cristancho

Ing. Alejandro Contreras Garzón

Julio de 2016

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Ing. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director (E) Programa Ingeniería de Petróleos

Dr. EDGAR DAVID CEDEÑO LIGARRETO

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A Dios. A mi Abuelita, por cuidarme siempre desde el cielo. Por su ayuda divina desde el primer día.

A mis padres y a mi hermano, por el amor, la confianza, el apoyo, por cada día que han estado a mi lado incondicionalmente.

A cada persona que aportó, aunque sea un granito de arena en este arduo proceso.

A todos los que me dieron su voto de confianza y me alentaron a continuar cuando creía que no podría.

María Camila Álvarez Herrera

A mis padres Enrique Marquez Lasso y Floralba Diaz Lemus por ser el motor de mi vida, que me impulsa a cumplir cada meta propuesta. A mi hermana Jenny Marquez Diaz por ser un gran ejemplo de persona y por guiarme en momentos difíciles. A Constanza Diaz Lemus, mi tía, por haber confiado en mi y su gran aporte en mi formación laboral, personal y profesional. A mis abuelos, mis primos y demás familia en general porque cada uno de ellos aportó algo para el cumplimiento de esta meta tan importante en mi vida.

Edsson Giovany Marquez Diaz

AGRADECIMIENTOS

Después de tan arduos meses de trabajo, de días buenos y días malos, de sacrificios, de madrugadas y desvelos; hoy se ven aquí representados los frutos del esfuerzo impreso en la realización de este trabajo.

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres, Maricely Herrera y Nicolás Álvarez, quienes han trabajado cada día de sus vidas para poder tenerme en el lugar donde estoy ahora, quienes se empeñaron en enseñarme las cosas más valiosas, las que más necesitaba, para poder llegar hasta este punto como una mujer integra, quienes nunca me han dejado sola, no importa las circunstancias que se presenten; quienes me dieron la mano para apoyarme, me cargaron o me empujaron para que siguiera cuando ya no me quedaban fuerzas, quienes celebraron conmigo cada alegría y lloraron cada tristeza, quienes son la razón de todos mis logros cumplidos y de todos los que faltan por cumplir. Por su amor sin límite y constante apoyo.

A mi hermano, Juan Sebastian Alvarez Herrera, por ser amigo y cómplice, por ser tan sensato y centrado para darme una palabra, un consejo, apoyarme o regañarme, incluso. O para ser tan divertido y ligero, cuando sabe que lo necesito.

Agradezco a los ingenieros Henry Arias y Cesar Gomez, por ser los padrinos de mis primeros pasos profesionales durante mi práctica empresarial, además de su apoyo constante y consejo oportuno. Al ingeniero Gino Nucci, por ser nuestro guía, por su conocimiento, colaboración y disposición para dirigir nuestro trabajo de grado. Al ingeniero Sergio Acosta por el voto de confianza y el acompañamiento durante todo el proceso. Al ingeniero Alejandro Contreras, por la disposición, el apoyo y el optimismo, que fue de gran ayuda en los momentos más difíciles.

Agradezco a mi compañero Edsson Marquez, por soportar, entender y entregar tanto de sí como lo hice yo, para alcanzar este logro. A mis amigos, que me acompañaron y ayudaron durante este proceso.

A mi Sol, por ayudarme a ver el camino a pesar de los días oscuros.

María Camila Alvarez Herrera

AGRADECIMIENTOS

A Dios primero que todo por permitirme llegar a este punto satisfactoriamente al lado de mi familia. A mis padres Enrique Marquez Lasso y Floralba Diaz Lemus, por ser el motor que me impulsa todos los días a crecer personal y profesionalmente, por haber implantado en mí los valores que me hacen la persona que soy hoy en día lo cual me permite alcanzar mis metas, porque sin el apoyo y ayuda de ustedes nada sería posible. A mi hermana Jenny Marquez Diaz por ser un gran ejemplo de vida y por su apoyo constante e incondicional. A mi tía Constanza Diaz Lemus y su esposo, por haber aportado día tras día en mi formación profesional y laboral. A mi tío Armando Diaz Lemus por sus consejos y ayuda constante a lo largo de esta etapa. A mi novia Daniela Camargo Diaz por su apoyo, acompañamiento incondicional y ayuda en decisiones que han hecho posible lograr esta meta. A nuestro director Gino Nucci Rada por su interés y colaboración en el proyecto. A nuestro orientador Alejandro Contreras Garzón por su soporte y disposición durante la realización del proyecto. A mi compañera Camila Álvarez Herrera por su cumplimiento, colaboración y entendimiento. A mis abuelos por el acompañamiento que me brindaron durante esta etapa. A mis primos por aportar en mi formación académica con su experiencia. Y finalmente a mis amigos más cercanos por cada aporte y ayuda que me han brindado.

Edsson Giovany Marquez Diaz

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	24
OBJETIVOS	25
1. GENERALIDADES DE LA CUENCA LLANOS ORIENTALES	26
1.1 HISTORIA DEL CAMPO	26
1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	28
1.3 MARCO GEOLÓGICO	28
1.3.1 Columna Estratigráfica	28
1.3.2 Estratigrafía	31
1.3.3 Geología Estructural	35
1.3.4 Geología del Petróleo	36
1.3.5 Sincronismo	37
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO CASTILLA	38
2. CEMENTACIÓN CONVENCIONAL	40
2.1 CEMENTACIÓN PRIMARIA	40
2.1.1 Equipos	41
2.1.2 Pre-Flujos	50
2.1.3 Lechada y Aditivos	52
2.1.4 Descripción del Proceso.	56
2.1.5 Problemas y Limitaciones	63
2.2 CEMENTACIÓN REMEDIAL	66
2.2.1 Aplicaciones	67
2.2.2 Herramientas y Técnicas de la Cementación por Tapones	73
2.2.3 Herramientas y Técnicas de la Cementación Forzada	78
2.3 EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE CEMENTACIÓN	79
2.3.1 Pruebas de Presión	80
2.3.2 Registro de Temperatura	80
2.3.3 Registro de Ruido	81
2.3.4 Registro de Adherencia del Cemento	82
2.3.5 Registro Ultrasónico	85
3. CEMENTACIÓN DINAMICA	87
3.1 VENTAJAS DE LA CEMENTACIÓN DINÁMICA	89
3.1.1 Parámetro de Centralización (Standoff) Dinámico	89
3.1.2 Aumento del Esfuerzo de Corte	90
3.1.3 Prevención de Migración de Gas	92
3.2. RIESGOS	93
3.3 CABEZA ROTATIVA DE CEMENTACIÓN	94

3.3.1 Fundamentos de la Tecnología	94
3.3.2 Descripción de la Tecnología	94
3.3.3 Partes y Accesorios	96
3.3.4 Modo Operacional	105
3.3.5 Ficha Técnica y Especificaciones	107
3.3.6 Dimensiones	107
3.4 ANILLOS DE TORQUE	108
3.4.1 Ventajas	110
3.4.2 Instalación	110
3.5 ANTECEDENTE DE UNA OPERACIÓN DE CEMENTACIÓN DINAMICA	111
4. ANÁLISIS DEL ANTECEDENTE DE CEMENTACIÓN EN UN POZO DE ESTUDIO	116
4.1 GENERALIDADES DEL POZO	116
4.2 GENERALIDADES DEL DISEÑO DE CEMENTACIÓN	120
4.2.1 Sistemas de Fluidos Propuestos	121
4.2.2 Centralización	122
4.2.3 Potencial de Flujo	124
4.2.4 Jerarquía Reológica	125
4.2.5 Tiempos de Bombeabilidad y Desarrollo de Esfuerzo Compresivo	125
4.3 EJECUCIÓN DE LA OPERACIÓN	127
4.4 RESULTADOS DE LA CEMENTACIÓN	129
4.4.1 Diametro Real del Hueco	129
4.4.2 Pruebas de Presión	130
4.4.3 Registro de Evaluación del Cemento	131
5. EJECUCIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN	135
5.1 INFORMACIÓN BÁSICA INGRESADA	135
5.1.1 Generalidades	135
5.1.2 Esquema de Bombeo	136
5.1.3 Información Final de Fluidos 2D	137
5.1.4 Resumen Hidráulico	137
5.1.5 Información de la Formación	137
5.2 CASOS DE SIMULACIÓN	138
5.3 STANDOFF Y EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO	140
5.3.1 Caso Base	140
5.3.2 Caso Uno (1)	142
5.3.3 Caso Dos (2)	144
5.4 CONCENTRACIÓN DE FLUIDOS	145
5.4.1 Caso Base	145
5.4.2 Caso Uno (1)	149
5.4.3 Caso Dos (2)	151
5.5 DISTRIBUCIÓN DE FLUIDOS 3D	154
5.5.1 Caso Base	154
5.5.2 Caso Uno (1)	157
5.5.3 Caso Dos (2)	159
5.6 CONCLUSIÓN	162

6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS SIMULACIÓN – POZO DE ESTUDIO	163
6.1 ZAPATO DEL REVESTIMIENTO 9 5/8 PULGADAS @ 7862 PIES	164
6.2 TOPE DE LA LECHADA DE CEMENTO PRINCIPAL	166
6.3 TOPE DE LA LECHADA DE CEMENTO DE RELLENO	169
6.4 TORQUE	172
6.5 CONCLUSIÓN	175
7. EVALUACIÓN FINANCIERA	176
7.1 COSTOS DE INVERSIÓN (CAPEX)	177
7.1.1 Escenario Actual	177
7.1.2 Escenario Propuesto	177
7.2 COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)	177
7.2.1 Escenario Actual	178
7.2.2 Escenario Propuesto	179
7.3 EVALUACION FINANCIERA	179
7.4 CONCLUSIONES	182
8. CONCLUSIONES	183
9. RECOMENDACIONES	186
BIBLIOGRAFÍA	188

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica del Campo Castilla	29
Figura 2. Columna Estratigráfica de la Cuenca Llanos Orientales	30
Figura 3. Corte Estructural de la Cuenca Llanos Orientales	36
Figura 4. Carta de eventos del sistema petrolífero en la Cuenca Llanos Orientales	37
Figura 5. Historia de producción Campo Castilla	39
Figura 6. Diagrama de proceso de cementación convencional	41
Figura 7. Esquema cabeza de cementación con dos tapones	42
Figura 8. Unidad de Cementación	42
Figura 9. Principio de operación de mezclador por Jets	43
Figura 10. Configuración mezclador tipo tornado	44
Figura 11. Diagrama Batch Mixer	44
Figura 12. Equipo de Material a Granel o Bulk Truck	45
Figura 13. Diagrama de Zapato Guía.	46
Figura 14. Diagrama de un típico zapato flotador	47
Figura 15. Configuración de tapón inferior (naranja) y superior (amarillo).	48
Figura 16. Centralizador en espiral y rígido.	49
Figura 17. Etapa de Circulación del Lodo.	57
Figura 18. Procedimiento de Bombeo de Pre-flujos.	58
Figura 19. Lanzamiento de Tapón de Fondo.	59
Figura 20. Procedimiento de Bombeo de Lechada Inicial.	60
Figura 21. Procedimiento de Bombeo de Lechada de Cola.	61
Figura 22. Lanzamiento de Tapón de Superior.	62
Figura 23. Ilustración del espacio de flujo amplio y estrecho en un anular excéntrico.	63
Figura 24. Demostración del patrón de flujo preferente por un anular excéntrico	64
Figura 25. Ilustración de la disposición de fluidos en el anular	65
Figura 26. Tapón para Pérdida de Circulación	68
Figura 27. Tapón para “Sidetrack” o Desvío	69
Figura 28. Tapón ubicado como ancla para prueba	69
Figura 29. Forzamiento Circulante o “Circulating Squeeze”	70
Figura 30. Imagen de una fuga en un revestimiento	71
Figura 31. Bombeo de un tapón en una zona depletada	72
Figura 32. Tapones para el abandono de pozo	73
Figura 33. Tapón Balanceado	74
Figura 34. Herramienta “Dump-Bailer” y su método de uso	75
Figura 35. Método de Dos Tapones	76

Figura 36. Herramienta en forma de sombrilla y de diafragma para cementación por Tapones balanceados	76
Figura 37. Preventor de Reventón Interno o “IBOP”	77
Figura 38. Fractura vertical creada por un procedimiento de forzamiento a alta Presión	79
Figura 39. Perfil de temperatura posterior a la operación de cementación primaria	81
Figura 40. Herramienta CBL y señales recibidas según el medio de dispersión	82
Figura 41. Ilustración del tren de ondas y mapa de impedancia	84
Figura 42. Combinación herramienta ultrasónica, CBL y VDL	86
Figura 43. Comparación de flujo por el anular con y sin rotación	88
Figura 44. Disposición irregular del cemento debido problemas en una operación de Cementación convencional	95
Figura 45. Corte transversal del cuerpo de la RCH y jaula de tapones	96
Figura 46. Plano general de la Cabeza Rotativa de Cementación	91
Figura 47. Plano de ensamblaje del sistema Swivel, sección superior de la Herramienta	97
Figura 48. Unión cuerpo-rodamiento en el ensamblaje del Swivel	98
Figura 49. Ilustración de las partes básicas de un Swivel	98
Figura 50. Plano y ensamblaje de la jaula de tapones de una Cabeza Rotativa de Cementación	100
Figura 51. Corte de la RCH ilustrando el ensamble del pin liberador	101
Figura 52. Plano y ensamblaje de testigo de lanzamiento de tapones	102
Figura 53. Plano y ensamblaje del brazo expulsor del testigo	103
Figura 54. Ensamble del adaptador inferior y el sistema de seguros	104
Figura 55. Seguro de conexión RCH-adaptador final	106
Figura 56. Dimensiones del ensamble superior y la jaula de tapones	107
Figura 57. Plano en vista horizontal del acople entre dos tuberías	109
Figura 58. Configuración de un acople con un anillo de torque	109
Figura 59. Distribución del anular, lado amplio y lado estrecho	112
Figura 60. Gráfico de esfuerzo de corte del espaciador en función de la posición Angular del anular. Standoff 60%. Sin flujo axial	114
Figura 61. Gráfico de esfuerzo de corte de cemento en función de la posición angular del anular. Standoff 74%. Sin flujo axial	115
Figura 62. Estado mecánico final del pozo inyector de estudio	118
Figura 63. Disposición de los fluidos en el anular según el diseño de la cementación	120
Figura 64. Sección del registro de evaluación de cementación del revestimiento Intermedio en el pozo de estudio. Evidencia de chevron pattern y baja Impedancia acústica	132
Figura 65. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada de relleno @ 5162 Pies MD. Caso Base (Sin Rotación)	146

Figura 66. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada principal @ 6662 Pies MD. Caso Base (Sin Rotación)	147
Figura 67. Concentración de fluidos al zapato del revestimiento 9 5/8 pulgadas @ 7862 pies MD. Caso Base (Sin Rotación)	148
Figura 68. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada de relleno @ 5985 Pies MD. Caso 1 (Rotación de 20RPM).	149
Figura 69. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada principal @ 6662 pies MD. Caso 1 (Rotación de 20RPM)	150
Figura 70. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada de relleno @ 5931 Pies MD. Caso 2 (Rotación de 40RPM)	152
Figura 71. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada principal @ 6662 pies MD. Caso 2 (Rotación de 40RPM).	153
Figura 72. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 5161.0 pies. Caso Base (Sin Rotación).	155
Figura 73. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 6662.0 pies. Caso Base (Sin Rotación).	156
Figura 74. Distribución de fluidos 3D, en el zapato del revestimiento 9 5/8 pulgadas @7862.0 pies. (Sin Rotación).	157
Figura 75. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 5985.0 pies. Caso 1 (Rotación de 20 RPM).	158
Figura 76. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 6662.0 pies. Caso 1 (Rotación de 20 RPM)	159
Figura 77. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 5931.0 pies. Caso 2 (Rotación de 40 RPM)	160
Figura 78. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 6662.0 pies. Caso 2 (Rotación de 40 RPM)	161
Figura 79. Sección del registro de evaluación del cemento en el zapato del revestimiento De 9 5/8 pulgadas. (@ 7700 pies a 7860 pies)	165
Figura 80. Sección del registro de evaluación del cemento en el tope de la lechada Principal. (@ 6600 pies a 6700 pies)	168
Figura 81. Cortes longitudinales del pozo sin rotación y rotando a 20 RPM. @6662 pies.	169
Figura 82. Sección del registro de evaluación del cemento en el tope de la lechada de Relleno. (@ 5700 pies a 5900 pies).	171
Figura 83. Torque simulado para una operación sin anillos de torque	172
Figura 83. Torque simulado para una operación con anillos de torque	173

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Velocidades acústicas para diferentes materiales	83
Tabla 2. Ficha de especificaciones técnicas de la Cabeza Rotativa de Cementación	107
Tabla 3. Comparación de resistencia de las tuberías al esfuerzo	110
Tabla 4. Propiedades de los fluidos de la operación en el Pozo Ripalta	111
Tabla 5. Tasas de flujo de espaciador en el anular, sin rotación	112
Tabla 6. Tasa de flujo de cemento en el anular, sin rotación	113
Tabla 7. Propiedades de las tuberías de revestimiento del pozo de estudio	119
Tabla 8. Disposición y características de centralizadores en el pozo	123
Tabla 9. Rangos e implicaciones del potencial de flujo	124
Tabla 10. Programa de bombeo	126
Tabla 11. Reporte de actividades operación de cementación	128
Tabla 12. Información general del pozo simulado	136
Tabla 13. Programa de bombeo del pozo simulado	136
Tabla 14. Información final de fluidos	137
Tabla 15. Caracterización de la formación de interés	137
Tabla 16. Disposición porcentual de las lechadas	139
Tabla 17. Eficiencia de desplazamiento y standoff para el Caso Base	141
Tabla 18. Eficiencia de desplazamiento y standoff para el Caso 1	143
Tabla 19. Eficiencia de desplazamiento y standoff para el Caso 2	144
Tabla 20. Costos base de la cementación dinámica como convencional	176
Tabla 21. Costos de inversión para realizar una cementación dinámica	177
Tabla 22. OPEX de la operación de cementación convencional	178
Tabla 23. OPEX de la operación de cementación dinámica	179
Tabla 24. Diferencia de costos entre una operación de cementación convencional y una operación de cementación dinámica	180
Tabla 25. Comparación de egresos de la cementación convencional con respecto a la cementación dinámica	181

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Eficiencia de Desplazamiento	65
Ecuación 2. Modelo de velocidad acoplada	91
Ecuación 3. Tasas de cambio de esfuerzos de corte	91
Ecuación 4. Calculo de esfuerzos de corte locales	91

LISTA DE ABREVIATURAS

Abreviaturas	Significado
°F	Grados Fahrenheit
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	Instituto Americano del Petróleo (American Petroleum Institute)
Bbl	Barril
BHCT	Temperatura Circulante de Fondo (Bottom Hole Circulating Temperature)
BHST	Temperatura Estática de Fondo (Bottom Hole Static Temperature)
BOPD	Barriles de petróleo por día
BWPD	Barriles de agua por día
CBL	Registro de Adherencia del Cemento (Cement Bond Log)
CO ₂	Dioxido de Carbono
Cp	Centipoise
H ₂ S	Ácido Sulfhídrico
In	Inches- Pulgadas
KCl	Cloruro de Potasio
KM	Kilómetros
Lb/pie ²	Libras por Pie Cuadrado
Lbf	Libras Fuerza

LPG	Libras por Galón.
Lb/pulgada ²	Libra por Pulgada Cuadrada
MA	Millones de años
MD	Profundidad Medida (Measured Depth)
MgCl ₂	Cloruro de Magnesio
Min	Minutos
mm	Milímetros
MMBO	Millones de Barriles de Petróleo
MRayls	Milirayls
mV	Mili Voltios
NaCl	Cloruro de Sodio
NiCl ₂	Cloruro de Níquel
Pie ²	Pies Cuadrados
RCH	Cabeza Rotativa de Cementación (Rotative Cementig Head)
RPM	Revoluciones por Minuto
TOC	Tope de Cemento (Top of Cement)
TVD	Profundidad Vertical Verdadera (True Vertical Depth)
UCA	Prueba de Consistencia del Cemento (Ultrasonic Compressibility Analysis)
VDL	Registro de Densidad Variable de Ondas (Variable Density Log)
WOC	Espera de fragüe del cemento (Wait on Cement)

GLOSARIO

ANULAR: espacio formado por dos objetos concéntricos; tal como el espacio que se forma entre la tubería de revestimiento y la de producción, o análogamente la tubería de revestimiento y el hueco perforado por la broca. A través de este espacio es posible el flujo de fluidos.

CENTRALIZACIÓN: hace referencia al efecto de hacer coincidir el punto medio del diámetro de una tubería con el del hueco donde está siendo ubicada.

COMPACIDAD: se refiere a la cualidad o característica de compacto. Etimológicamente viene del adjetivo compacto y el sufijo “idad” que quiere decir cualidad de.

CUENCA DE ANTE-PAÍS (FORELAND): es una cuenca estructural que se desarrolla adyacente y paralela a un cinturón de montañas. La cuenca ante-país se forma debido a la inmensa masa creada por el engrosamiento de la corteza asociado a la evolución del cinturón de montañas que causa que la litosfera se pliegue.

DIORITA: roca plutónica de composición intermedia compuesta generalmente de dos tercios de plagioclasa y un tercio de minerales oscuros como hornablenda, biotita y a veces piroxeno.

EPICONTINENTAL: masa de agua salada con una gran extensión, pero con escasa profundidad que se extiende sobre una plataforma continental.

EXCÉNTRICO: hace referencia a qué tan descentralizada se encuentra la tubería en el hueco. Qué tan cerca de las paredes se encuentra.

FALLA: superficie o zona a través de la cual se desarrolla un deslizamiento medible. Son fracturas sobre las cuales las estructuras sufren deslizamiento primario por procesos de deformación frágil.

FILITA: roca con gradación metamórfica entre la pizarra y el esquisto. Puede distinguirse con facilidad por tener un brillo satinado y superficie ondulada. Está compuesta fundamentalmente por cristales finos de moscovita, clorita o ambas.

FLUJO AXIAL: flujo que va en la misma dirección del eje.

FUEL OIL: conocido en español como combustóleo, es un combustible pesado que se obtiene como residuo del proceso de destilación fraccionada del petróleo a presión atmosférica. De color negro y de uso industrial.

GELIFICACIÓN: procedimiento mediante el cual se espesan y estabilizan soluciones líquidas, emulsiones y suspensiones.

GLAUCONITA: mineral del grupo de los silicatos con numerosos iones metálicos. De color verde con tonalidades azuladas o amarillentas. Se encuentra en forma de agregados redondeados con partículas escamosas, pero de grano fino.

INFORMACIÓN PALINOLÓGICA: información derivada de la palinología, que hace referencia a la disciplina de la botánica dedicada al estudio del polen y las esporas y su capacidad para ser fosilizados.

LCM: material sólido introducido de manera intencional en un sistema de lodo para reducir y finalmente impedir el flujo del fluido de perforación dentro de una formación débil, fracturada o vacuolar. En general, este material es de naturaleza fibrosa o en forma de placa, ya que los proveedores intentan diseñar lechadas que obturen y sellen las zonas de pérdida.

LECHADA DE CEMENTO: mezcla de cemento, arena fina y agua que en el caso de la industria de petróleo y gas se utiliza para generar un sello hidráulico en el espacio anular formado por el revestimiento y el hueco.

LIGNOSULFONATOS: mezcla compleja de compuestos poliméricos de tamaños pequeño a moderado con grupos sulfonato unidos a la molécula.

PERCOLACIÓN: paso lento de los fluidos a través de materiales porosos.

PRESIÓN DE FRACTURA: presión requerida para inducir fracturas en una roca a una profundidad dada.

PRESIÓN DE PORO: presión de los fluidos en los poros de un yacimiento, normalmente la presión hidrostática, o la presión ejercida por una columna de agua desde la profundidad de la formación hasta el nivel del mar.

PUNTO CEDENTE: medida de la fuerza de atracción entre las partículas, bajo condiciones dinámicas o de flujo. Es la fuerza que ayuda a mantener el fluido una vez que entra en movimiento. El punto cedente está relacionado con la capacidad de limpieza del fluido en condiciones dinámicas, y generalmente sufre incremento por la acción de los contaminantes solubles como el carbonato, calcio, y por los sólidos reactivos de formación.

REOLOGÍA: rama de la física que estudia la relación entre esfuerzo y la deformación de los materiales que tienen la capacidad de fluir.

RIFT: área donde la presencia de grietas indica que la corteza está sufriendo divergencia y distensiones. Es similar a una fosa tectónica. Estas zonas son

producto de la separación de las placas tectónicas y su aparición produce sismos y actividad volcánica recurrente.

SIENITA: roca ígnea plutónica constituida por minerales como feldespato, oligoclasa, albita, y minerales máficos como biotita y piroxeno.

SILO: es una construcción diseñada para almacenar grano y otros materiales a granel.

STAND OFF: parámetro de centralización, expresado en porcentaje, que determina que tan excéntrica está la tubería con respecto al anular.

SURFACTANTE: elemento que actúa como detergente o humectante, que permite reducir la tensión superficial que existe en un fluido.

SWIVEL: eje dimensional. Conexión que permite que el elemento conectado gire vertical u horizontalmente.

TAPON DE CEMENTACIÓN: herramienta que funciona como barrera plástica y ayuda a el correcto desplazamiento de fluidos y limpieza del pozo.

TOP DRIVE: dispositivo mecánico dispuesto en un taladro de perforación que proporciona un torque, o rotación, en sentido horario a la sarta de tubería para facilitar el proceso de perforación de un pozo.

TUBERIA DE REVESTIMIENTO: tubería de gran diámetro que se baja en un agujero descubierto y se cementa en el lugar. La tubería de revestimiento se baja para proteger formaciones de agua dulce, aislar zonas de pérdida de circulación o aislar formaciones con gradientes de presión significativamente diferentes.

TORQUE: fuerza aplicada en una palanca que hace rotar alguna cosa. Fuerza necesaria para ajustar las conexiones de tubería. Esfuerzo ejercido por el efecto de rotación.

VELOCIDAD AXIAL: velocidad proyectada en dirección del eje central de un sistema.

VELOCIDAD TANGENCIAL: velocidad que es un vector tangente a la trayectoria circunferencial.

RESUMEN

La empresa Ecopetrol S.A. para el año 2015, perforó cinco pozos inyectoros que tenían como objetivo la disposición de agua de un campo localizado en la cuenca Llanos Orientales, más específicamente, inyectar el agua en la unidad operacionalmente conocida como T2. Sin embargo, solo dos pozos inyectoros perforados obtuvieron buenos resultados de cementación, motivo por el cual se incurrió en costos adicionales y tiempos no productivos invertidos en trabajos remediales que fueron necesarios para poner en operación los pozos.

Los malos resultados de cementación eran claros después de correr los registros de calidad de cemento, aun cuando la operación se hizo bajo las buenas practicas utilizadas anteriormente por la empresa. Por lo tanto, se decide investigar la viabilidad de una técnica que no había sido utilizada antes por la empresa Ecopetrol S.A. Pero que ha tenido éxito en diferentes operaciones alrededor del mundo. Esta técnica se conoce como cementación dinámica y consiste en rotar el revestimiento simultáneamente con el bombeo de pre-flujos, lechada de cemento y tapones durante toda la operación de cementación. Requiere de equipos adicionales para poder llevarse a cabo, que son la cabeza rotativa de cementación y anillos de torque que se usan en caso que la conexión entre los tubos no soporte el torque generado.

El presente trabajo, expone en general, los aspectos técnicos y económicos que se deben tener en cuenta para la realización de una cementación dinámica, en comparación con los aspectos técnicos y económicos que se llevaron a cabo en uno de los pozos que obtuvieron malos resultados de cementación. Posteriormente, mediante una simulación de la operación de cementación con el parámetro de rotación a diferentes frecuencias, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con respecto a los registros tomados en el pozo de estudio.

Para finalizar, se analizan financieramente mediante una comparación de egresos las ventajas y desventajas que conlleva para Ecopetrol S.A. la realización de la cementación dinámica con respecto a la operación de cementación convencional que se realizó en el pozo de estudio.

PALABRAS CLAVES:

- POZO INYECTOR
- CABEZA ROTATIVA CEMENTACIÓN
- CUENCA LLANOS ORIENTALES
- CEMENTACIÓN DINÁMICA
- CEMENTACIÓN REMEDIAL
- CEMENTACIÓN CONVENCIONAL

INTRODUCCIÓN

La industria del petróleo y gas, gira en torno a la producción de estos recursos naturales, la cual es posible gracias a la comunicación entre la superficie y el subsuelo, donde éstos están localizados. Esta comunicación se hace mediante pozos, que no son más que un conducto que permite el flujo de fluidos desde la roca porosa y permeable que los contiene, hasta la superficie; donde se pueden tratar con el fin de disponerlos para servicio de la sociedad e industria. Debido a la importancia de aquellos pozos, la industria de los hidrocarburos debe garantizar que, durante la vida productiva de los mismos, no se generen problemas asociados a una mala integridad. Esto se puede lograr por medio de la generación de un sello hidráulico que impida la comunicación entre zonas y el flujo de fluidos no deseados hacia o desde formaciones adyacentes o acuíferos por detrás de las tuberías que revisten el hueco. La creación de este sello hidráulico es lo que se conoce en esta industria como cementación de pozos.

Tal objetivo, que es de gran importancia tanto para el cumplimiento de requerimientos de las empresas operadoras, como para el cumplimiento de requerimientos ambientales; no es fácil de alcanzar. Esto se debe al papel que juegan los problemas asociados a la desviación del pozo, tortuosidad del hueco, centralización deficiente, jerarquía reológica inadecuada, cálculos erróneos de volumen anular, inadecuada limpieza del pozo, contaminación del cemento, entre otras; hacen de la cementación de un pozo, una operación compleja que tiene gran probabilidad de fallar. Cuando un trabajo de cementación arroja malos resultados, estos deben ser corregidos estrictamente antes de poner en operación el pozo con fines de inyección o de producción. Por lo tanto, antes de continuar con las operaciones de un pozo que acaba de ser cementado, se realizan diferentes procedimientos que permiten conocer el estado del mismo una vez se ha terminado la operación. En caso de tener malos resultados, es necesario intervenir el pozo con trabajos remediales los cuales generan sobre costos y tiempos no productivos.

De esta manera, con el fin de lograr una cementación primaria exitosa desde un principio, se ha investigado acerca de la técnica de cementación dinámica, la cual consiste en rotar el revestimiento simultáneamente con el bombeo de pre-flujos y lechada de cemento por medio de herramientas que permiten alcanzar los objetivos del procedimiento. Por lo tanto, el presente trabajo expone detalladamente el antecedente de un pozo de estudio que obtuvo malos resultados de cementación y se compara, mediante la simulación un pozo gemelo, con los posibles resultados de esta misma operación al aplicar el parámetro de rotación del revestimiento. Se espera que, con los resultados obtenidos, se pueda demostrar el beneficio que conlleva la aplicación de esta novedosa técnica. Adicionalmente, se realiza una comparación de egresos entre las dos operaciones estudiadas con el fin de determinar que la técnica de cementación dinámica, además de sus ventajas técnicas, es viable financieramente gracias al ahorro que representa al garantizar la integridad del pozo desde el principio evitando trabajos remediales.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar los resultados de la cementación de la sección intermedia de un pozo inyector de un Campo en la Cuenca Llanos Orientales por medio de una simulación del uso de la tecnología Cabeza Rotativa de Cementación.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir las generalidades del campo ubicado en la Cuenca Llanos Orientales.
- Describir las generalidades y los problemas de la cementación convencional realizada en el pozo de estudio con base en los resultados de los registros de evaluación de cemento, y los reportes de operación.
- Explicar la técnica de cementación dinámica.
- Realizar la simulación de la cementación del pozo inyector con parámetros dinámicos de rotación y reciprocaje.
- Analizar la información resultante de la simulación de la operación de cementación del pozo inyector realizada con los parámetros dinámicos para compararla con los resultados de cementación convencional en el pozo de estudio en el área.
- Evaluar la viabilidad financiera de la implementación de la tecnología Cabeza Rotativa de Cementación con base en los resultados de la simulación realizada, a través de una comparación de egresos (costos y gastos) entre la operación de cementación convencional y la operación de cementación dinámica.

1. GENERALIDADES DE LA CUENCA LLANOS ORIENTALES

En el presente capítulo se exponen las generalidades de la Cuenca Llanos Orientales, en la cual se encuentra localizado el Campo Castilla que es de interés para el presente trabajo. Para comenzar, se describe una breve historia del campo, seguido de la ubicación geográfica del mismo. Posteriormente, se da un enfoque en la geología de la cuenca y del campo, comenzando con un marco geológico, que contiene la estratigrafía, la geología estructural y la geología del petróleo de la zona de interés. Finalmente, se presenta una breve historia de producción a lo largo de la vida útil del Campo Castilla.

El Campo Castilla, por su ubicación geográfica pertenece a la Cuenca Llanos Orientales, la cual se encuentra localizada al sureste de la Cordillera Oriental, en la franja comprendida entre ésta cordillera y el Escudo de Guyana. Este campo, se ha convertido en una de las principales fuentes de producción del país. El Campo Castilla en el año 2015, llegó a un record de producción promedio de 125.699 barriles de petróleo durante el mes de Noviembre del mismo año, siendo así el campo de Ecopetrol con mayor producción en Colombia, aportando aproximadamente el 21% de la producción directa de Ecopetrol.¹

1.1 HISTORIA DEL CAMPO

El Campo Castilla fue explorado por primera vez en el año 1944 gracias a campañas exploratorias realizadas por empresas como Shell, Intercol, Texaco y Chevron. Esta última, después de diferentes campañas de sísmica 2D, obtuvo resultados positivos. Posteriormente, bajo el Contrato de Concesión Cubarral que comprendía un área de 97.450 hectáreas, la empresa Chevron Petroleum Company descubrió el Campo Castilla en el año 1969 con el Pozo Castilla-1, con una profundidad final de 7.347 pies, aportando crudo de 10° API en la Formación Mirador y 13,7° API en la Formación Guadalupe. Sin embargo, las características del crudo y las deficiencias en infraestructura dificultaban el transporte del petróleo, razón por la cual el campo no inició comercialización del activo hasta el año 1976.

Para los años 70, se introduce en Colombia la modalidad de asociación para los contratos de interés petrolero. Por tal motivo, la empresa Chevron Petroleum entrega el área en concesión al Ministerio de Minas y Energía y procede a firmar el primer Contrato de Asociación del país con la Empresa Colombiana de Petróleos hoy Ecopetrol S.A. Este contrato comprendió un periodo de evaluación de un año y

¹ ECOPETROL. Campo de producción Castilla alcanzo nuevo record de producción [en línea]<<http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/Campo-produccion-Castilla-alcanzo-nuevo-record-produccion>>. Citado 7 de Marzo de 2016.

un periodo de explotación de 25 años. Para este momento (1975) el crudo del Campo Castilla se comercializaba como combustible industrial (reemplazando el “*Fuel Oil*” o aceite combustible) y asfalto para carreteras mediante el Contrato de Asociación entre la Empresa Colombiana de Petróleos y Chevron Petroleum Company (50%-50%).

Bajo este mismo contrato Ecopetrol S.A, entre los años 1988 y 1989 perfora dos pozos exploratorios llamados Castilla Norte-1 y Castilla Este-1. Estos obtuvieron éxito encontrando petróleo en la Formación Mirador a profundidades aproximadas de 6.660 y 7.150 pies respectivamente. Tal descubrimiento, junto con el primer pozo perforado en 1969 (Castilla-1), permitió dividir el campo en tres áreas operativas llamadas Castilla, Castilla Este y Castilla Norte.

A raíz del descubrimiento de estas nuevas áreas operativas, la producción del campo aumentó llegando a 17.000 barriles de petróleo por día (BOPD), aproximadamente. Dicha producción de crudo llegó al mercado a satisfacer la demanda en las industrias, especialmente para consumo en calderas de combustibles. Sin embargo, la expedición del Decreto 94 en el año 1995, que prohibió el uso de calderas de combustible por motivos ambientales, generó una disminución del consumo de crudo. Es por esta razón que se comenzó a utilizar el crudo del Campo Castilla como materia prima para producir la mezcla conocida como *Chichimene Blend*, que permitió el envío del crudo del campo hacia la Estación Apiay para transportarlo a los respectivos procesos de refinación.

Terminado el periodo de 25 años de explotación del contrato, el Campo Castilla ya tenía perforados treinta y nueve (39) pozos. El 30 de Enero del año 2000, en cumplimiento con la cláusula 24 del contrato, Ecopetrol S.A asumió directamente la operación del área, cuya producción reportada era de 29.000 BOPD. Sin embargo, Ecopetrol S.A contrató a la empresa Chevron como prestador de servicios para operar el Campo durante seis meses más. De esta manera, Ecopetrol S.A asumió directamente la operación del campo el 31 de Julio del año 2000.²

Para el año 2002, se adquirió un volumen de sísmica 3D de 118 Km² que permitió definir de mejor manera la falla límite del modelo estructural y ampliar el área productiva del campo en dirección norte. Adicionalmente, se establece el modelo estático que permitió redefinir los tipos de roca para las unidades principales del yacimiento, las formaciones del cretácico definidas operacionalmente como Formación K1 y Formación K2.

El campo en febrero del año 2016, reportó una producción total de 129.538 BOPD entre las áreas operativas Castilla, Castilla Este y Castilla Norte.

² Anónimo. “Ecopetrol, Ahora única dueña de Cubarral”. En: El Tiempo. Bogotá .D.C. 29 Enero de 2000.

1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El Campo Castilla se encuentra localizado en la Cuenca Llanos Orientales, la cual está ubicada en el Departamento del Meta aproximadamente a 30 Km al sur de la Ciudad de Villavicencio, bajo la Jurisdicción de los municipios Acacias y Castilla La Nueva. Para llegar al campo desde la Ciudad de Villavicencio, se deben recorrer 60 Km por la vía Villavicencio-Acacias-Guamal-Castilla La Nueva³, como se muestra en la **Figura 1**.

1.3 MARCO GEOLÓGICO

El Campo Castilla se encuentra localizado en la Cuenca Llanos Orientales, la cual, según la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) es una depresión topográfica plana de orientación sureste – noreste que limita al norte con la Frontera Colombo Venezolana, al sur con el Arco del Vaupés y las rocas metamórficas que afloran en el Rio Guaviare, al este limita con los afloramientos de rocas plutónicas del Precámbrico pertenecientes al Escudo de Guyana y finalmente al oeste con la Cordillera Oriental.⁴

Esta es calificada como la cuenca sedimentaria más prolífera de Colombia. A continuación, se explican las características estratigráficas y estructurales que componen el sistema petrolífero en cuestión.

1.3.1 Columna Estratigráfica. La evolución de la Cuenca Llanos Orientales según la ANH, empieza en el Paleozoico con una fase de rípie. Los sedimentos siliciclasticos fueron depositados sobre el Basamento Precámbrico desde el Triásico hasta el Cretácico tardío.⁵

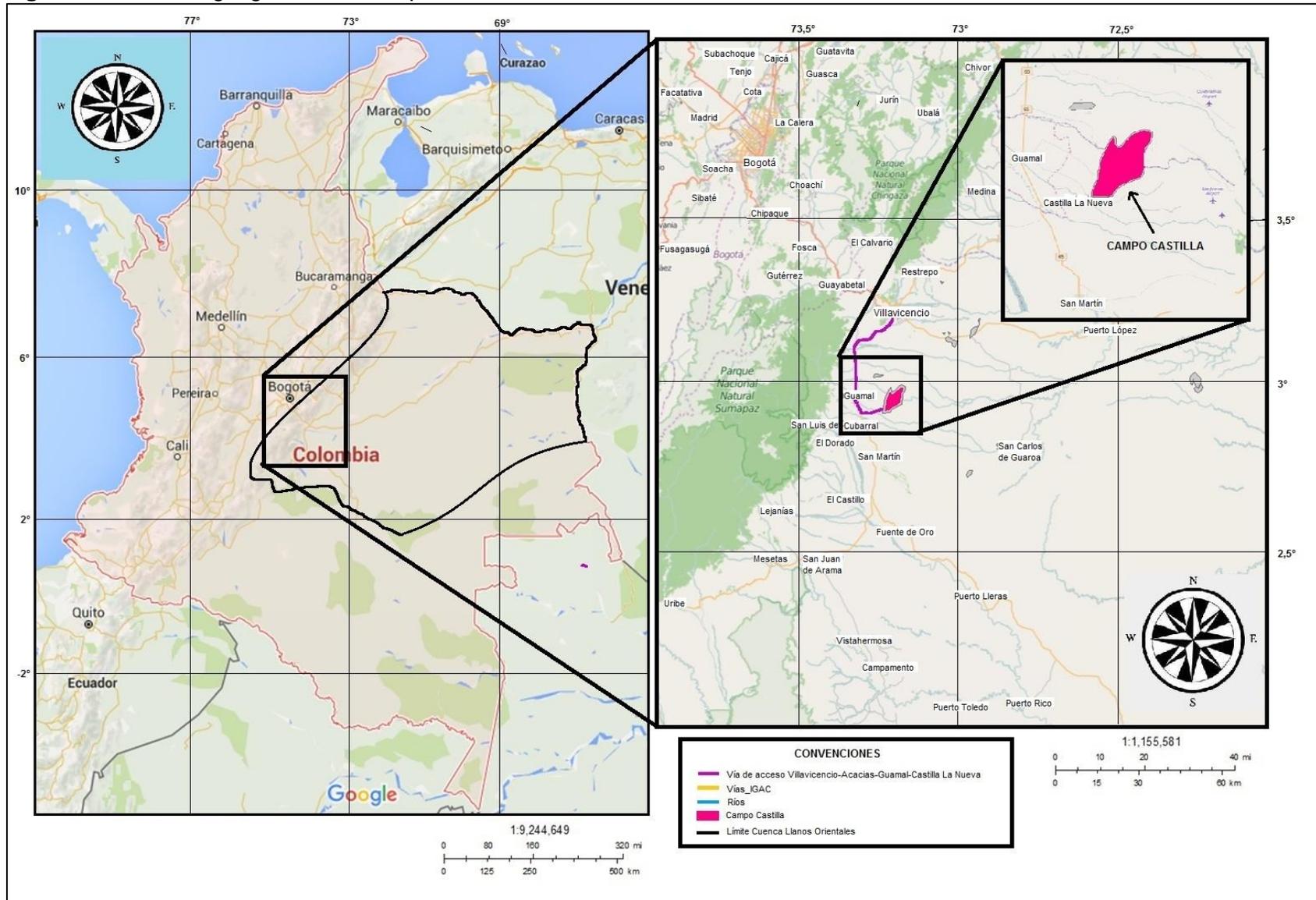
Desde el Mastrichitiano al Paleoceno, la cuenca se convirtió en una cuenca de ante-país (Foreland), es decir, una cuenca formada adyacente y paralela a una montaña, como lo es la Cordillera Oriental. A continuación, en la **Figura 2**, se puede observar la columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Llanos Orientales.

³ RODRIGUEZ Otavo Alba: Estudios de control de pozos durante las operaciones de mantenimiento y workover en el Campo Apiay y Castilla la Nueva.

⁴ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Colombian Sedimentary Basins. Bogotá D.C. ANH. 2007. Pag. 40.

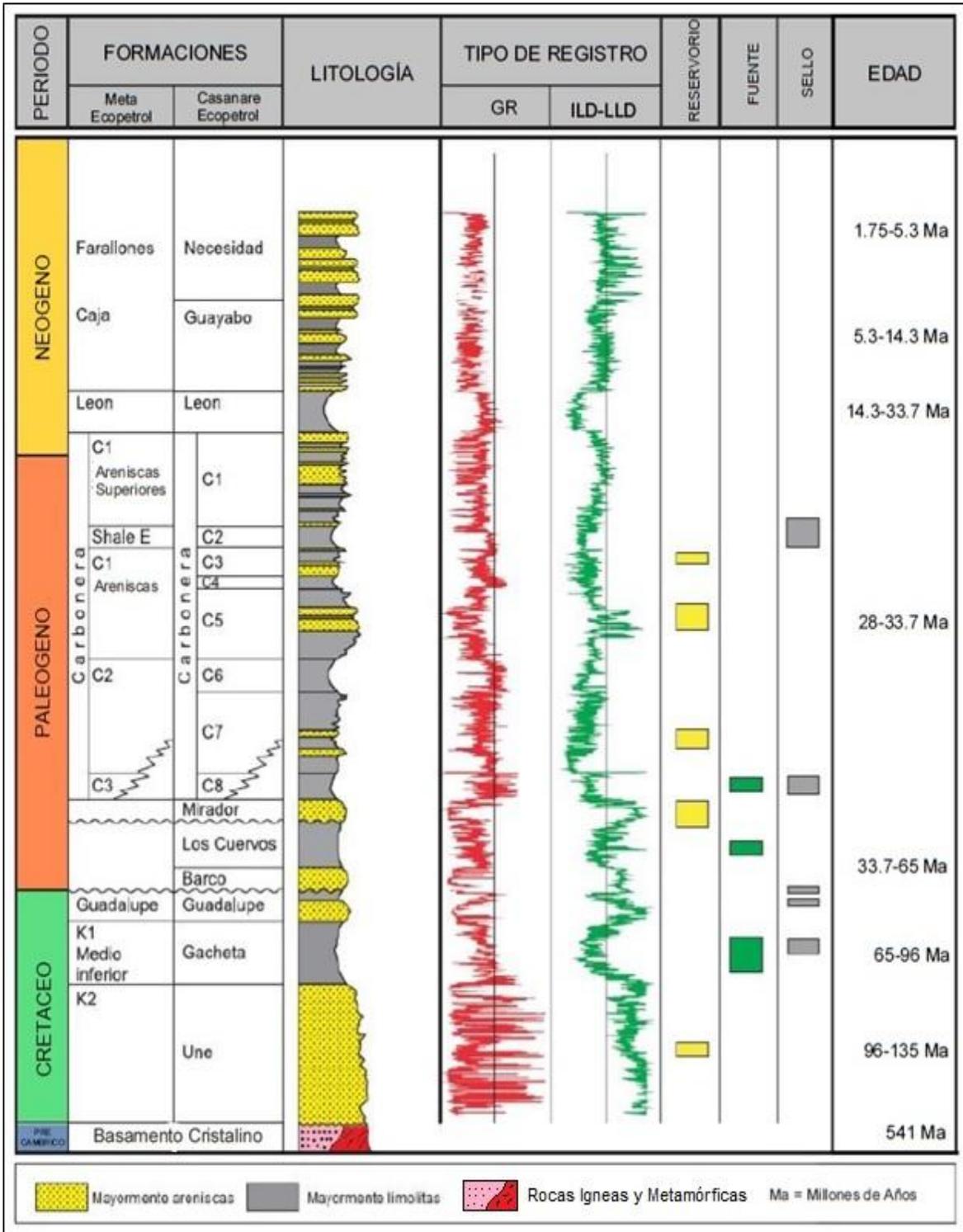
⁵ Ibid. Pag 69

Figura 1. Ubicación geográfica del Campo Castilla.



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VIAS INVIAS. Mapa de Carreteras 2014. Modificado por: María Camila Álvarez Herrera y Edsson Giovany Marquez Diaz. Mayo 3 de 2016.

Figura 2. Columna Estratigráfica de la Cuenca Llanos Orientales.



Fuente: Colombian Sedimentary Basins. Agencia Nacional de Hidrocarburos. 2010. Modificado por María Camila Álvarez Herrera y Edson Giovany Marquez Diaz. Mayo 3 de 2016.

1.3.2 Estratigrafía. A continuación, según la ANH, se describen cada una de las formaciones que se depositaron en la cuenca en orden cronológico de la más antigua (más profunda), a la más joven (más somera). Se explican cada una de ellas y sus características, haciendo énfasis en las encontradas en los pozos del Campo Castilla.

- *Basamento Precámbrico.* El basamento de la Cuenca Llanos Orientales data del periodo Precámbrico es decir hace unos 541 Millones de años (Ma). Se reportan dos tipos de basamento en la cuenca; uno ígneo-metamórfico, con una composición diorítica-sienítica y filitas (metamorfismo de bajo grado). El otro tipo son rocas ígneas ácidas e intermedias y metamórficas, también del Precámbrico, las cuales están relacionadas con el Escudo de Guyana. Su contacto suprayacente es discordante con las rocas de la Formación Une del Cretaceo.
- *Formación Une.* Según la ANH, litológicamente hablando, está compuesta por areniscas cuarzosas con pequeñas intercalaciones de arcillolitas y limolitas carbonosas. Su espesor aumenta generalmente hacia el noreste de la cuenca, presentado así un valor de cero en el límite de erosión o no deposición en el oriente y sureste. Esta formación presenta de 50 a 350 pies de espesor en el área del Meta y 300 a 600 pies en Arauca. Con espesores máximos de 650 pies en los pozos Santa Maria-1, Casanare-1, y Tame-1 cerca del frente de montaña. Esta formación produce aceite en el área del Campo Apiay-Suria.⁶ Según Burgl (1961), corresponde a la época del Albiano hace aproximadamente 113 Ma.⁷ Hace parte de la sedimentación marina somera de areniscas costeras cretácicas que se dio durante una transgresión regional.⁸ La Formación Une se encuentra en contacto discordante con el Basamento Precámbrico que la infrayace, y es suprayacida por la Formación Gacheta con un contacto concordante. Operacionalmente conocida como Unidad K2.
- *Formación Gacheta.* Está constituida por una secuencia de lutitas, de color gris a gris oscuro, con desarrollos menores de areniscas y contenido variable de glauconita. Esta formación representa la máxima transgresión del Cretaceo hacia el oriente y sureste, sobre el Escudo de Guyana. “Esto implica que el límite de erosión o deposición oriental se localiza siempre más al este que los límites sedimentarios de las formaciones Une y Guadalupe.” (ANH, 2012). En el oriente y suroriente de la Cuenca Llanos Orientales, ésta formación se acuña y desaparece. Es por esto que su espesor aumenta hacia el noroccidente con un valor máximo encontrado al suroccidente de más de 600 pies cerca del Pozo Chichimene-1. Esta formación es productora de hidrocarburos en varios campos de la cuenca. La Formación Gacheta corresponde al periodo del Cretaceo

⁶ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Op. Cit.

⁷ M. JULIVERT. Léxico Estratigráfico Internacional. América Latina. Colombia. 1968.

⁸ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Diciembre 2012. Pag 48.

Superior, según Hubach (1931).⁹ Su contacto infrayacente es concordante con la Formación Une, pero muestra un contacto gradual suprayacente con la Formación Guadalupe. Operacionalmente conocida como Unidad K1.

- *Formación Guadalupe.* Basado en información palinológica, ésta data del periodo del Cretáceo Superior hace unos 66 Ma. Consiste en una secuencia de areniscas masivas con pequeñas intercalaciones de lutitas que, en ocasiones, presentan pequeñas capas de carbón. Su mayor espesor fue encontrado con el Pozo Coral-1 en el área de Arauca con 600 pies. Su espesor aumenta hacia el piedemonte, desde cero, cerca al Escudo de la Guyana. hasta 600 pies. Esta formación se caracteriza por ser productora de hidrocarburos en la Cuenca Llanos Orientales. Su contacto infrayacente es gradual con la Formación Gacheta, pero su contacto suprayacente con las formaciones Barco y Los Cuervos es discordante.
- *Formaciones Barco y Los Cuervos.* Estas formaciones solo aparecen en el borde occidental de la cuenca y sus límites superiores e inferiores con otras formaciones son discordantes. Los depósitos continentales de estas formaciones son areniscas masivas consideradas pobremente clasificadas en la base, es decir, la Formación Barco, la cual a su vez es suprayacida por lutitas y delgadas capas de carbón. La Formación Los Cuervos está compuesta por lutitas de color gris, con algunas intercalaciones de areniscas color parduzco de grano fino. El máximo espesor registrado de estas formaciones es 1.710 pies en el Pozo Medina-1.
- *Formación Mirador.* También conocida como Unidad T2. La Formación Mirador es un conjunto de areniscas masivas con granulometría generalmente decreciente de base a tope, compuestas por cuarzo, materia orgánica leñosa, glauconita y algunas veces feldespato. Sus buenas cualidades petrofísicas la han caracterizado como el reservorio más importante hasta el momento de toda la cuenca. Es suprayacida por la Formación Carbonera en contacto concordante, lo cual en ocasiones dificulta su identificación debido a las areniscas similares de la Formación Carbonera con las que limita. En su límite basal se encuentran las principales discordancias de la cuenca y su espesor se acuña hacia el sureste y este de esta. Su contacto infrayacente es discordante. Data de la época entre el Eoceno y el Oligoceno inferior, hace aproximadamente 28 Ma. Operacionalmente conocida como Unidad San Fernando.
- *Formación Carbonera.* Se encuentra ampliamente distribuida en toda la cuenca y es característica por su espesor que llega hasta los 6.000 pies. Sus depósitos son transgresivos y regresivos de corta duración de un mar epicontinental de

⁹ M.JULIVERT. Op Cit.

poca profundidad. Debido a su espesor la Formación Carbonera fue dividida en diferentes unidades litológicas teniendo en cuenta que, aunque la cuenca no es considerada de origen marino, contiene algunas capas pertenecientes a este. La empresa Elf Aquitaine (ahora conocida como Total S.A), dividió este conjunto en ocho unidades operacionales que fueron agrupadas según sus características litológicas en números pares (C2, C4, C6, C8) e impares (C1, C3, C5, C7). Las unidades con números pares corresponden a los niveles transgresivos, es decir, secuencias de grano fino que corresponden a sellos importantes regionales, depositados en un ambiente continental a marino somero; y las unidades con números impares corresponden a niveles regresivos, que depositaron cuerpos arenosos los cuales pueden ser productores de hidrocarburos desde C3 a C7.

Data de la época del Oligoceno al Mioceno Medio. Fue depositada en ambientes que varían de marino a transicional continental. Su contacto infrayacente con la Formación Mirador es discordante, pero su contacto suprayacente con la Formación León es de carácter concordante.

Aunque ésta subdivisión ha sido de gran utilidad, para lograr identificar más fácilmente las unidades en sectores donde es más complejo el reconocimiento de las mismas, la empresa Ecopetrol S.A ha subdividido ésta formación de gran interés en las siguientes unidades de tope a base. Unidad T2, Lutita E4, Unidad T1, Lutita E3, Conjunto C2, Areniscas de Carbonera, Conjunto C1, Lutita E, y Areniscas superiores de Carbonera. A continuación, se exponen las unidades mencionadas anteriormente y su nomenclatura equivalente según las diferentes clasificaciones.

- *Unidad C8 (Lutita E4)*. Corresponde a un periodo de transgresión, ésta unidad se podría considerar la continuación del carácter marino de la Formación Mirador que la infrayace. Su espesor es variable desde los 50 pies en el borde oriental de la cuenca hasta más de 400 pies a lo largo del frente de montaña.
- *Unidad C7 (Unidad T1)*. Esta unidad, como se explicó anteriormente, por ser impar se compone de areniscas de grano fino a medio que fueron depositadas en un ambiente marino somero, deltaico y continental. Su espesor puede llegar a ser de 250 a 280 pies en la parte central de la cuenca.
- *Unidad C6 (Lutita E3)*. El espesor de esta unidad es bastante reducido al este de la cuenca hasta llegar a valores de entre 100 y 150 pies. Ha sido encontrado en un espesor máximo de 600 pies.
- *Unidad C5*. La Unidad C5 es poco consolidada y está compuesta por arcillolitas y areniscas alternadas con tamaño de grano de medio a grueso. Por su dificultad

para ser identificada, como se explicó anteriormente, la Unidad C5 hace parte del Conjunto C2 denominado de esta manera por Ecopetrol S.A, el cual comprende aproximadamente 1.000 pies.

- *Unidad C4.* Se trata de una intercalación rápida de areniscas, limolitas y lutitas. Por tal razón no es fácil identificar sus características litológicas. También hace parte del grupo denominado por Ecopetrol como Conjunto C2. Su espesor máximo se encuentra en la parte central de la cuenca alcanzando un máximo valor de 1.050 pies.
- *Unidad C3.* La Unidad C3 se desarrolla rápidamente hacia el suroeste de la cuenca, lugar en donde alcanza 700 pies en el frente de montaña. Está compuesta básicamente por niveles de arenisca de grano fino a grueso y algunos pies de limolitas y arcillolitas, con algunos niveles carbonosos en algunos sectores de la cuenca.
- *Unidad C2 (Lutita E).* En la parte central de la cuenca alcanza un espesor de 100 a 200 pies, con un comportamiento ascendente hacia el borde suroccidental, lugar en el cual alcanza hasta 900 pies de espesor. Está compuesto por lutitas grises y limolitas, litologías que hacen de esta unidad el segundo sello mejor desarrollado de la cuenca después de la Formación León, y el de mayor extensión en dirección este.
- *Unidad C1 (Areniscas Superiores de Carbonera).* Es suprayacida por la Formación León, la cual, gracias a sus características litológicas, es uno de los mejores sellos de la cuenca. La Unidad C1 es la última secuencia arenosa de Carbonera. A lo largo de su espesor contiene delgadas capas de limolitas intercaladas con cuerpos arenosos. Aumenta gradualmente hacia el occidente y llega hasta los 200 pies en el piedemonte.
- *Formación León.* Corresponde a depósitos del Mioceno Medio de hace aproximadamente 13 Ma, momento en el cual se da un aumento global del nivel del mar que coincide con la primera deformación significativa y levantamiento de la Cordillera Oriental. Tal evento ayudó a la deposición de lutitas grises en gran parte del espesor de esta formación.

Su máximo espesor encontrado es de 2.500 pies, aunque es un gran sello de la cuenca por las características explicadas anteriormente. En el sector suroeste de la cuenca, la secuencia se vuelve muy arenosa, lo cual la hace difícil de identificar y diferenciar de las areniscas superiores de carbonera. Su contacto

infrayacente con la Formación Carbonera es concordante, sin embargo, la parte superior de la Formación León no está determinada.¹⁰

- **Formación Guayabo.** Es la última secuencia de la cuenca que va de 2 a 10 Ma de antigüedad. Es un intervalo de gran espesor que llega hasta los 13.000 pies. Esta última fase marca el levantamiento de la Cordillera Oriental al oeste del piedemonte y la migración del eje de la cuenca de ante-país a la ubicación actual que es el piedemonte de la Cordillera Oriental. Esta secuencia está constituida por arcillolitas intercaladas con areniscas de pobre selección de grano fino a muy grueso, llegando incluso a conglomerados en algunos intervalos. Su base es de influencia marina y su tope es de fluvial a marino continental.¹¹

1.3.3 Geología Estructural. Según Cooper et al, (1995); la Cuenca Llanos Orientales es de tipo ante-país y se relaciona con la evolución de la Cuenca del Valle Medio del Magdalena y la Cordillera Oriental. Su comienzo se dio por medio de una fase extensional que permitió la formación de cuenca de *ripie* en el Paleozoico, la cual posteriormente desde el Cretáceo comenzó la mega-secuencia de cuenca de ante-país que termina en la época del Mioceno Tardío con la última fase de compresión e inversión.

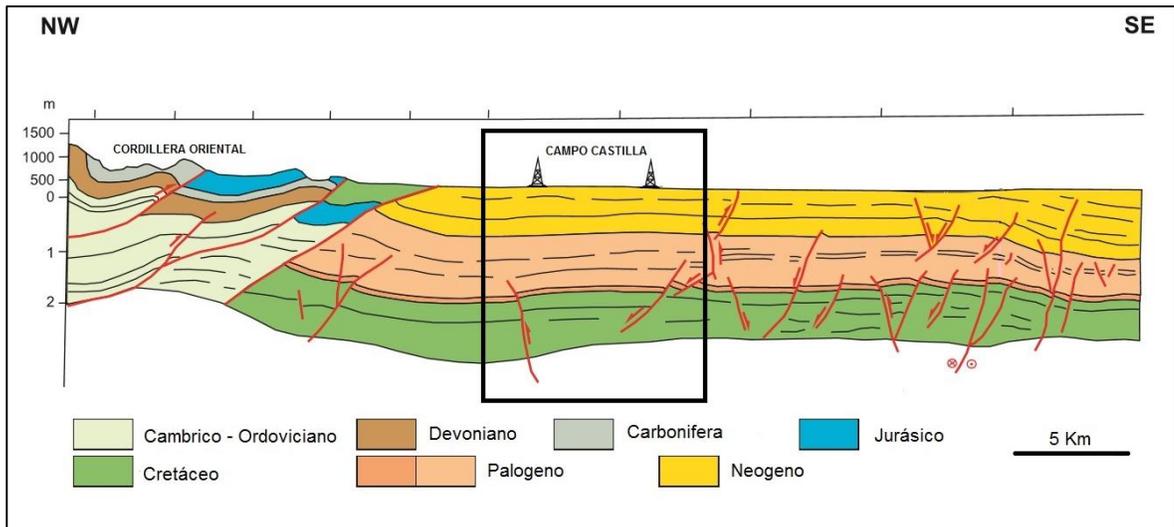
La geología estructural del Campo Castilla es básicamente una estructura anticlinal con un eje de orientación N 60° E, de 4 Km de ancho y 10 Km de largo, fallado en su flanco oriental. Contiene fallas normales e inversas, las cuales no son sellantes, ya que el contacto agua-petróleo no muestra cambios significativos a lado y lado de estas.

A continuación, en la **Figura 3**, se ilustra un corte en dirección noroccidente a suroriente que permite observar mejor la deposición y el sistema creado a partir de estos eventos.

¹⁰ J. DE PORTA. Léxico Estratigráfico Internacional. América Latina. Colombia. 1974.

¹¹ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. CUENCA LLANOS ORIENTALES. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. 2012. Pag 48.

Figura 3. Corte Estructural de la Cuenca Llanos Orientales.



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Colombian Sedimentary Basins. Bogotá D.C. ANH. 2007. Pag. 40.

1.3.4 Geología del Petróleo. Según la ANH, la Cuenca Llanos Orientales posee más de 1.500 millones de barriles de aceite (MMBO) recuperables documentados oficialmente, los cuales se han descubierto en dos campos gigantes como lo son Caño Limón y Castilla; tres grandes que son Rubiales, Apiay y el complejo Tame, además de más de cincuenta campos menores.¹² A continuación, se presentan las generalidades del sistema petrolífero que han permitido la explotación de esta prolifera cuenca.

- **Roca Madre.** Según la ANH (2007), las rocas madre de esta Cuenca ante-país son una mezcla de arcillolitas marinas y continentales que se encuentran en la Formación Gacheta, cuyo contenido total de materia orgánica (TOC) oscila entre el 1% y el 3% con contenido de kerogeno tipo II y III, y con espesores de 150 a 300 pies. Dichas rocas están localizadas debajo del flanco este de la Cordillera Oriental.
- **Roca Reservorio.** Las areniscas del Paleogeno, como las formaciones Carbonera y Mirador son excelentes unidades reservorio, aunque dentro de la secuencia del Cretáceo también se encuentran varios intervalos de areniscas que pueden ser buenos reservorios de la cuenca. Sin embargo, el espesor sedimentario de la cuenca aumenta en dirección este-oeste, pero la porosidad disminuye en la misma dirección, pasando del 30% al 10%. Como se expuso anteriormente, las formaciones reservorio del Cretáceo son Gacheta y Une, las cuales para el interés de este trabajo son los intervalos productores en el Campo

¹² AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Colombian Sedimentary Basins. Bogotá D.C. ANH. 2007. Pag. 71.

Castilla. Estos son llamados por Ecopetrol como Unidad K2 (Une) y Unidad K1 (Gacheta), además de la Formación San Fernando conocida operacionalmente como T2.

- *Migración.* Se han documentado dos eventos de migración en la historia de la cuenca. El primero empezó en el Eoceno-Oligoceno hace unos 30 Ma y el segundo empezó en el Mioceno hace unos 20 Ma y sigue ocurriendo en el presente.
- *Roca Sello.* Como fue mencionado anteriormente, la Formación León es considerada un buen sello de la cuenca. Sin embargo, hacia el suroeste se vuelve arenosa, al punto de confundirse con las arenas superiores de la Formación Carbonera. Tradicionalmente la Unidad C-8 ha sido considerada el sello regional de la cuenca, pero por su extensión la Unidad C-2 de la Formación Carbonera es el mejor sello. Las formaciones del Cretácico, Gacheta y Guadalupe, son formaciones que también pueden ser consideradas sellos de la cuenca debido a las capas intraformacionales de lodolitas presentes en dichas formaciones.
- *Trampa.* Como fue mencionado anteriormente, el Campo Castilla estructuralmente hablando es un anticlinal con una falla inversa en su flanco oriental, aunque tiene otras fallas normales e inversas, es esta falla la que forma una trampa del tipo estructural.¹³

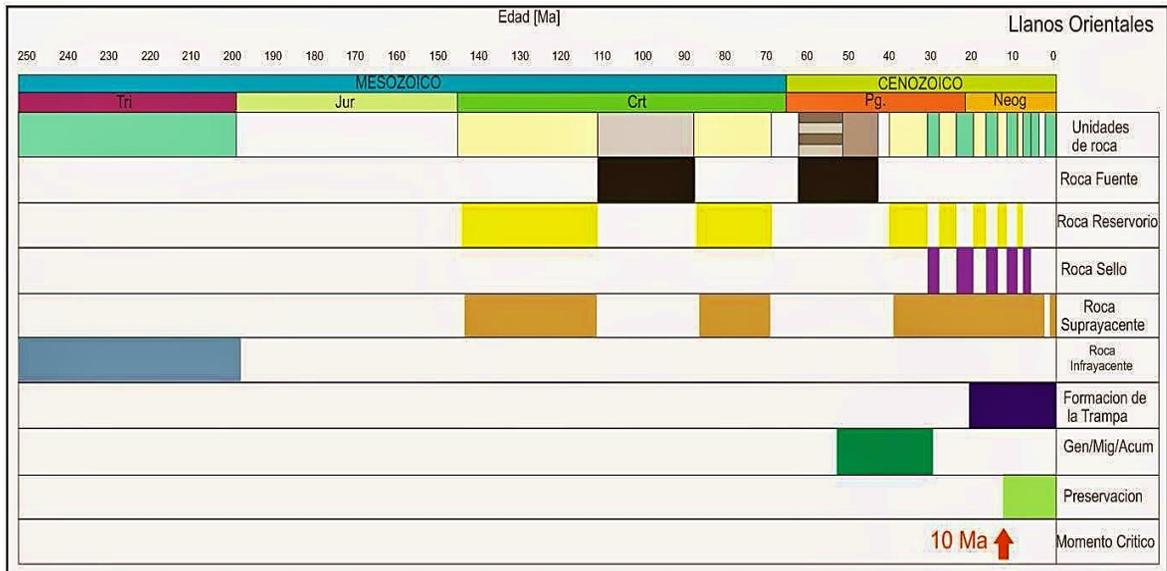
1.3.5 Sincronismo. El sincronismo es el fenómeno responsable de proveer una escala geológica de tiempo adecuada para que todos los componentes presentes en un sistema petrolífero ocurran. Este se encarga no solamente de la aparición de las condiciones de generación de hidrocarburos, los mecanismos de migración, las formaciones rocosas o entrampamientos; sino también de que todo lo anterior ocurra favorablemente con el tiempo.

En la **Figura 4** se puede observar la carta de eventos para la Cuenca Llanos Orientales donde se muestra la relación temporal de los elementos de esta, descritos previamente en el capítulo. Adicionalmente, se puede ver en ella el tiempo de preservación y el momento para el sistema, el cual son 10 Ma. En esta carta se pueden comparar los tiempos de los procesos ocurridos con los tiempos de los elementos formados en la Cuenca Llanos Orientales.¹⁴

¹³ Ibid. Pag 71

¹⁴ UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Geología, Geofísica Y Geoquímica De La Cuenca Catatumbo. 2009.

Figura 4. Carta de eventos del sistema petrolífero en la Cuenca Llanos Orientales.



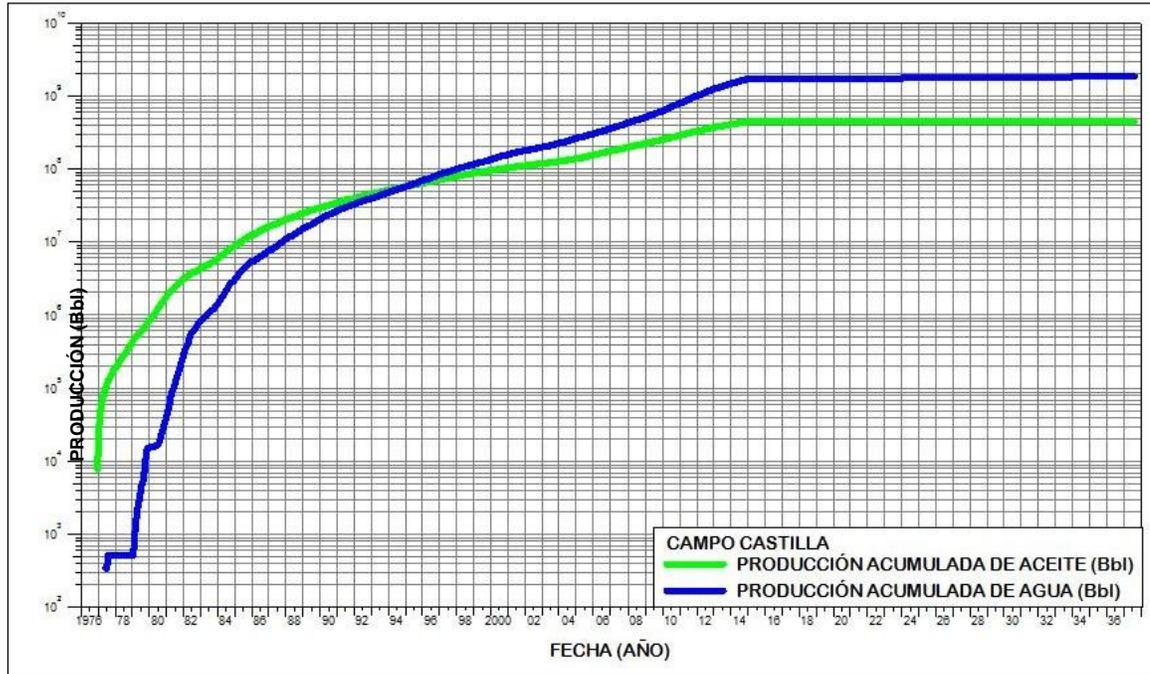
Fuente: Colombian Sedimentary Basins. Agencia Nacional de Hidrocarburos. 2010.

1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN DEL CAMPO CASTILLA

Como se explicó anteriormente, desde el año 1944 empresas como Shell, Intercol, Texaco, Chevron y Conoco Philips, realizaron estudios y exploración del área donde se encuentra hoy el Campo Castilla. Sin embargo, la mayoría de ellas no obtuvieron éxito sino hasta el año 1960 cuando la compañía Chevron Petroleum Company, bajo el Contrato de Asociación Cubarral, inició producción del campo con el pozo Castilla -1. Debido a los problemas generados por las características del crudo encontrado, la comercialización del activo no fue posible sino hasta el año 1976.

Después de aproximadamente 40 años, para el 2014, el Campo Castilla aportaba 126.000 BOPD, provenientes de 422 pozos, distribuidos de la siguiente manera: En Castilla Norte, 182 pozos y 240 en el área restante. Para el 31 de Diciembre del año 2014 el campo tenía un producción acumulada de 447 MMBO como se ilustra en la **Figura 5.**

Figura 5. Historia de producción Campo Castilla.



Fuente: Schlumberger. Oil Field Manager. 2015.

El mecanismo principal de producción del Campo Castilla es el empuje hidráulico que aporta un acuífero activo. Sin embargo, esta energía no es suficiente para la producción del campo, por lo cual los pozos cuentan con sistemas de levantamiento artificial ya sea bombeo mecánico (BM) o electrosumergible (ESP); así como métodos recuperación como inyección de agua, con volumen aproximado de agua inyectada de 70.000 barriles de agua por día (BWPD).

Para el mes de Febrero del año 2016 el Campo Castilla reportó una producción en promedio día calendario 129.538 BOPD, que es la estimación actual de producción para este años. Esto comprende la producción de las áreas operativas Castilla, Castilla Norte y Castilla Este.

2. CEMENTACIÓN CONVENCIONAL

En este capítulo se explicará el procedimiento de cementación convencional (primaria y remedial). Para cada una de ellas se mencionarán los equipos necesarios para realizar la operación, los pre-flujos, la lechada y los aditivos que se utilizan en cada caso, la descripción del proceso, los posibles problemas y limitaciones que se puedan presentar y los antecedentes en los pozos de estudio. Con esto se da cumplimiento al segundo objetivo propuesto para este trabajo.

El proceso de cementar un pozo de extracción o inyección de hidrocarburos o agua, es sin discusión una operación de crucial importancia. La cementación convencional es aquel procedimiento mediante el cual se bombea una lechada de cemento compuesta de fluido de mezcla, cemento seco y aditivos; la cual se ubica en el anular del pozo, entre el revestimiento y la formación. Este procedimiento es realizado con las técnicas y metodologías tradicionales que se han desarrollado con el paso de los años. Entre ellas se encuentran las cementaciones primarias y remediales.

2.1 CEMENTACIÓN PRIMARIA

La cementación primaria es una operación que consiste en la colocación de una lechada específica de cemento en el espacio anular, que es aquel que existe entre la tubería de revestimiento y el agujero abierto (formación) o la tubería de revestimiento anterior.

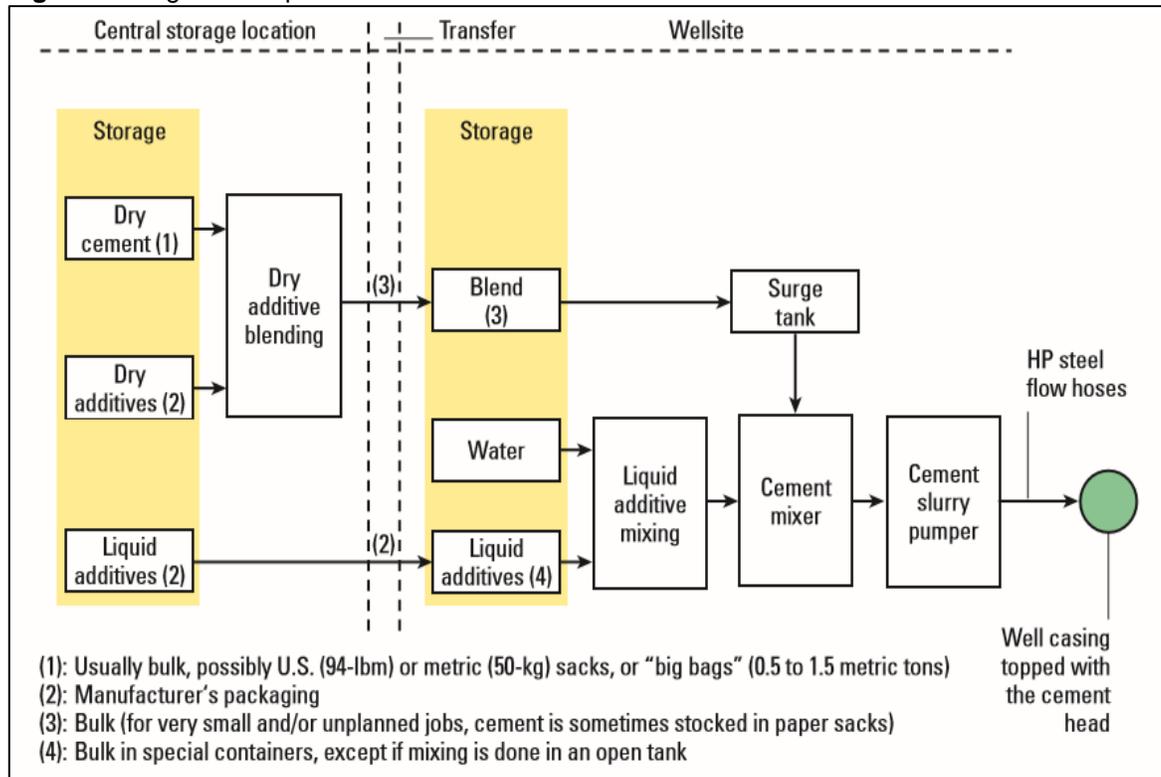
Según CPVEN (2008), este procedimiento se realiza con el objetivo principal de asegurar la integridad del hueco. Lo anterior se consigue por medio de un aislamiento zonal efectivo que se logra gracias a un sello hidráulico que impide la comunicación entre zonas, mitigando la migración de fluidos no deseados que contaminen o invadan otras formaciones o acuíferos que se tengan sub y supra yacentes.

Adicionalmente, es de gran importancia brindar protección a la tubería de revestimiento contra la corrosión provocada por los fluidos de la formación, como son el H₂S y CO₂. Así como proveer anclaje y sustentación o soporte dentro del hueco. Otra función muy importante es dar estabilidad a las paredes del hueco para evitar derrumbes en zonas no consolidadas en el pozo. Cuando los objetivos expuestos anteriormente no se alcanzan de una manera adecuada, la vida productiva del pozo y su capacidad para explotar su potencial se ven afectadas y limitadas.¹⁵

¹⁵ CPVEN. Seminario De Cementación. [Print(0)]: Seminario ed. Maracaibo, Venezuela.: 2008.

2.1.1 Equipos. Con el fin de lograr los objetivos planteados anteriormente, la operación de cementación requiere de ciertos equipos en superficie y subsuelo. La configuración de éstos puede variar según las necesidades del procedimiento, la complejidad del pozo o de la lechada de cemento; como se puede ver en la **Figura 6**. A continuación, se exponen los equipos que, según Superior Energy Services (2015), generalmente son utilizados para realizar una operación convencional.

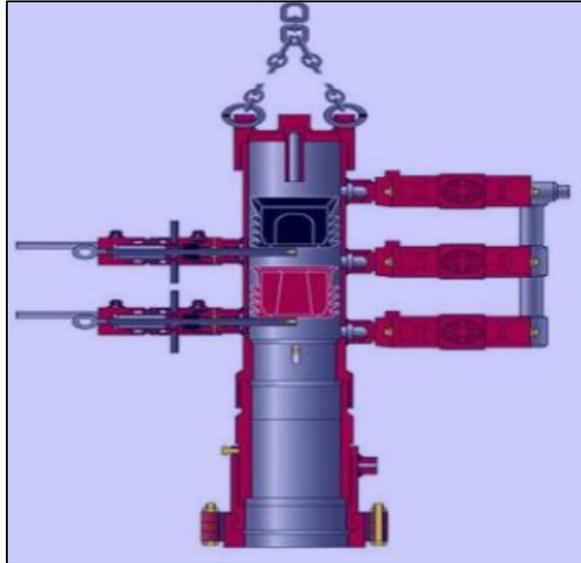
Figura 6. Diagrama de proceso de cementación convencional.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- **Cabeza de Cementación.** Este equipo conecta directamente la línea de descarga de la unidad de cemento con la parte superior de la tubería de revestimiento. Este elemento se enrosca hasta un torque determinado generando así un sello efectivo entre la tubería y la línea para garantizar el flujo sin fugas a través de estos. En su interior están contenidos los tapones, que son dispositivos que aíslan y limitan el flujo de los fluidos bombeados dentro de la tubería durante la operación, los cuales son liberados en un momento específico del procedimiento; y posee líneas de entrada de fluidos a la herramienta como se puede ver en la **Figura 7**.

Figura 7. Esquema cabeza de cementación con dos tapones.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015.

- *Unidad de Bombeo de Cemento.* Este equipo suministra alta potencia y presión de bombeo a la lechada para posicionarlo sin inconvenientes en el pozo. También tiene la capacidad de medir los fluidos de mezcla y a su vez, controla la presión y caudal de bombeo. Por otra parte, la unidad de bombeo proporciona el control necesario para los sistemas adjuntos de mezclado del cemento.
- La unidad consta de dos bombas que son alimentadas por diésel o de manera eléctrica. Ésta puede estar ubicada en camiones, como se puede observar en la **Figura 8**, en el caso de cementación “on-shore” (en tierra), o puede montarse en patines cuando es utilizada “off-shore” (costa afuera).

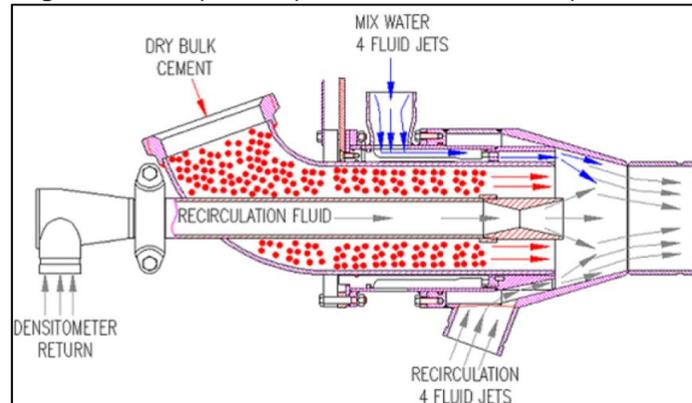
Figura 8. Unidad de Cementación.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015.

- *Líneas de Tratamiento.* La línea de tratamiento es un conjunto de tuberías, válvulas y uniones que se utilizan con el fin de llevar el cemento y los pre-flujos bombeados desde la unidad de cementación hasta el pozo. La selección del diámetro de la línea se lleva a cabo según el caudal de operación y las presiones a las cuales ésta estará sometida.

Figura 9. Principio de operación de mezclador por Jets.

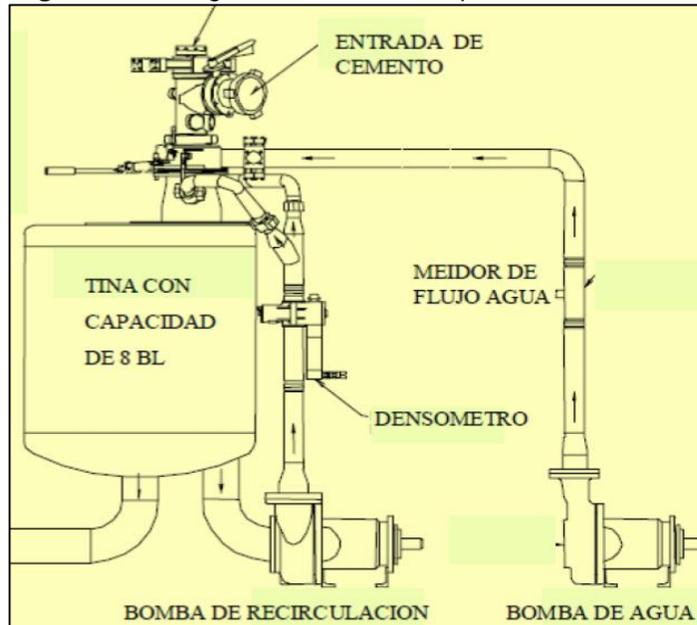


Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015.

- *Sistema de Mezcla de Cemento.* Un método de bombeo del cemento es al vuelo, lo cual hace referencia a una lechada que requiere una baja energía de mezcla para ser homogénea. Para lograr una lechada con las propiedades requeridas se debe obtener la proporción exacta de fluido de mezcla y cemento seco. De esa manera podrá ser bombeada con el caudal deseado para posicionarla en fondo de pozo.

Esto se puede realizar de tres maneras. (a) Jets. El cemento seco es llevado al recipiente de mezcla mediante succión desde un recipiente cónico. Allí se encuentra con el agua de mezcla. Después de este proceso es llevado a un tanque de mezcla desde donde es transportada por una bomba centrífuga que la envía a las bombas de desplazamiento positivo. Este proceso puede verse en la **Figura 9**. (b) Slurry Chief. Este mecanismo funciona bajo el mismo sistema de la mezcla en jets. Adicionalmente dosifica la porción de cemento seco de manera más exacta por medio de una cuchilla y con el fin de garantizar mayor homogeneidad, aplica la recirculación de la mezcla. (c) Tornado. Consiste de un tubo vertical que es alimentado del cemento seco por medio de tubos concéntricos pequeños y de agua de mezcla de forma tangencial generando flujo helicoidal dentro del sistema. En la parte inferior, una tubería concéntrica recircula la mezcla en el tanque de descarga. Se pasa la lechada a la bomba centrífuga y posteriormente a las bombas de desplazamiento positivo. Este procedimiento puede verse reflejado en la **Figura 10**.

Figura 10. Configuración mezclador tipo tornado.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015.

- *Sistema de Mezcla por Baches.* También conocido como Batch Mixer. Es un sistema que, como se ve en la **Figura 11**, está equipado con paletas, bombas centrifugas, líneas y tanques donde bajos volúmenes de lechada son circulados y agitados con el fin de garantizar homogeneidad. Este sistema se utiliza cuando la mezcla de cemento requiere densidad precisa y una mayor energía de agitación. Es un sistema simple que se presenta en capacidades entre 15 y 150 barriles.

Figura 11. Digrama Batch Mixer.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015.

- *Tanques de Fluido.* En ellos se preparan y almacenan los fluidos utilizados en el proceso de cementación.
- *Sistema de Aditivos Líquidos.* Su principal función es medir y almacenar los aditivos líquidos utilizados para la preparación de la lechada en operaciones de cementación. Son eficientes y económicos, lo que los convierte en elementos imprescindibles en cualquier trabajo de cementación que requiera el uso de aditivos líquidos para obtener las propiedades de cemento necesarias. Estos sistemas pueden ser controlados manualmente, de manera automática o computarizada.
- *Equipo de Material a Granel.* En operación, este sistema es usado para almacenar el cemento seco y de esta manera poder transportarlo al sistema de mezclado de cemento. Para este fin se requieren silos de cemento a presión o gravedad, los cuales permiten almacenar cementos y mezclas por separado y transportar el cemento a granel, el cual se realiza con el objetivo de llevarlo hasta el pozo y directamente al sistema de mezclado. Adicionalmente se requieren elementos como el compresor de aire, mangueras de caucho y tanques de descarga, que permiten una efectiva transferencia de un método de almacenamiento a otro. El montaje se realiza en un camión de dimensiones suficientes para soportar el sistema, como se aprecia en la **Figura 12**.¹⁶

Figura 12. Equipo de Material a Granel o Bulk Truck.



Fuente: Curso básico/intermedio de cementación. Superior Energy Services. 2015.

Cada operación de cementación, requiere una configuración de herramientas en subsuelo para poder llevar a cabo el procedimiento de manera eficiente y poder controlar variables en el pozo que no se pueden controlar desde superficie. Algunas de las herramientas más comunes, según Schlumberger (2006), se presentan a continuación.

- *Zapata Guía.* Son herramientas que facilitan el posicionamiento del revestimiento a la profundidad deseada. No poseen válvulas de retención o

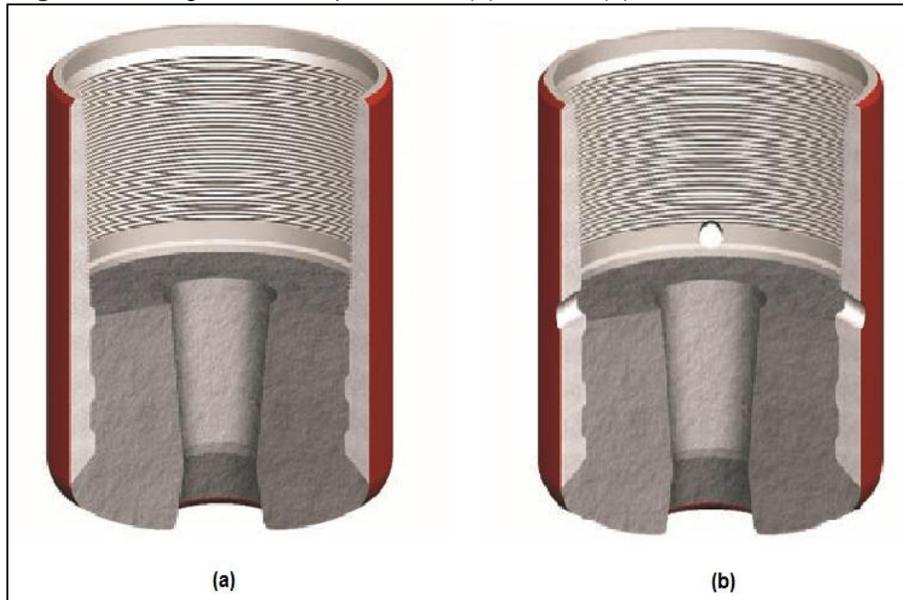
¹⁶ Superior Energy Services. Curso Básico/Intermedio De Cementación. Villavicencio, Colombia.: 2015. p. 9663-68

dispositivos controladores de flujo. Su principal función es proteger el borde inferior del revestidor y se utilizan en pozos someros (<2000 pies de Profundidad Vertical Verdadera "TVD") y se utilizan en conjunto con un collar de flotación o de auto llenado.

Las zapatas poseen orificios laterales que permiten una vía de flujo secundaria, lo cual facilita la corrida de la tubería hasta el fondo del pozo durante la cementación, adicionalmente mejoran la remoción del lodo y facilitan las operaciones de lavado cuando se precisa circular para evitar el atascamiento.

Se usan principalmente dos tipos de zapatas: Zapata Nariz de Cemento y Zapata Nariz de Aluminio. Estas se diferencian por el tipo de material que conforma la nariz o punta que es la que está en contacto con la formación. En la **Figura 13**, se puede ver que además de su material, las zapatas pueden tener agujeros para la salida de fluidos desde su interior.

Figura 13. Diagrama de Zapato Guía. (a) Básico. (b) Con Down Jet.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Equipo de Flotación.* El equipo de flotación reduce la tensión de la torre de perforación induciendo o aumentando la flotación del revestidor. Está constituido por zapatas especializadas y collares que contienen válvulas de cierre para evitar el ingreso de fluidos desde el anular; como se ve en la **Figura 14**. Uno de sus objetivos principales es permitir el bombeo de lechadas de cemento que son más pesadas que el lodo.

Figura 14. Diagrama de un típico zapato flotador.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Equipo de Llenado Automático.* Las zapatas y collares de llenado automático están equipados con válvulas de cierre similares a las utilizadas en los equipos de flotación. Sin embargo, en este caso las válvulas son configuradas en una posición normalmente abierta para permitir el paso de fluidos desde el anular y el llenado del equipo. Esto ahorra tiempo y reduce el esfuerzo requerido para vencer el efecto de flotación al momento de bajar el revestimiento a fondo de pozo.

Esto se logra mediante la conversión de la válvula de cheque del equipo de flotación aplicando un procedimiento determinado. Es por esta razón que se debe evitar parar súbitamente durante la bajada del revestidor debido a que el golpe de presión puede causar la prematura conversión de la válvula, afectando así el funcionamiento. Es recomendable utilizar el equipo de auto llenado cuando las condiciones del hueco se pueden deteriorar, lo cual exige circular de manera inversa y tener la habilidad de correr el revestimiento lo más ágilmente posible.

- *Equipo de Llenado Diferencial.* Este equipo reúne los beneficios del equipo de autollenado y el de flotación. Están diseñados para llenar y regular automáticamente el nivel de fluido en el revestimiento. Es comúnmente usado cuando se tiene una configuración extensa de la sarta para reducir los daños a formación asociados al equipo de flotación y los aumentos de presión. Estas herramientas también tienen la ventaja de ahorrar tiempo de taladro, lo que evita problemas de pegas. Su funcionamiento está basado en el diferencial de nivel establecido en el diseño entre los fluidos en el anular y el revestidor.

- *Tapones de Desplazamiento.* Los tapones de desplazamiento son barreras semirrígidas que se utilizan con el objetivo de separar la lechada de cemento de los fluidos de perforación; de limpiar el revestimiento y de indicar cuando el desplazamiento del cemento se ha completado. Los diseños actuales incluyen tapones inferiores y superiores construidos de nitrilo o elastómeros perforables moldeados sobre aluminio o de núcleos plásticos.

A pesar de tener apariencia externa similar, los tapones inferiores y superiores tienen diferencias significativas en el diseño interno y sus funciones, como se observa en la **Figura 15**. Los inferiores tienen un elemento que permite el flujo a través de ellos ya que su objetivo es preceder al cemento. El tapón superior tiene como función soportar las presiones y fuerzas generadas ante un asentamiento. Se debe tener cuidado de no confundirlos durante el procedimiento ya que esto puede traer problemas operacionales graves.

Figura 15. Configuración de tapón inferior (naranja) y superior (amarillo).



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Centralizadores.* Son herramientas mecánicas diseñadas para centrar la tubería en el agujero con el fin de reducir el esfuerzo de arrastre y las pegas diferenciales durante la corrida del revestimiento. Así como mejores resultados en la remoción del lodo y una distribución uniforme del cemento.

Los centralizadores deben ubicarse en función de un espaciado específico para cada sarta que se determina a partir de parámetros como el tamaño del revestimiento, tamaño del hueco y el perfil direccional del mismo. Existen

diferentes tipos que funcionan más eficientemente según las condiciones de trabajo. Se pueden ver dos de estos en la **Figura 16**.¹⁷

Figura 16. Centralizador en espiral y rígido.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Aptos para una operación sin movimiento de la tubería.* De estos accesorios existen algunos que presentan un mejor rendimiento en una operación estática, es decir, sin movimiento de la tubería. Estos aportan ventajas y un rendimiento adecuado durante la cementación.

Los recomendados para esta clase de procedimientos son los centralizadores de soporte de arco. Son una opción económica para pozos con una desviación moderada sin complicaciones mayores. Constan de arcos o secciones longitudinales de ancho constante que asisten en el desplazamiento uniforme del cemento, así como a la limpieza del hueco. Su resistencia a esfuerzos es baja debido a las fuerzas de inicio, funcionamiento y restauración con las cuales son diseñados. Estos son los expuesto en el costado derecho de la **Figura 16**.

- *Aptos para una operación con movimiento de la tubería.* Al rotar y reciprocar la tubería durante la operación de cementación, se ejercen esfuerzos adicionales en los centralizadores que pueden deformarlos ocasionando problemas por pega de tubería al quedarse estancados y evitar el movimiento de esta. Es por esta razón que los recomendados para realizar una operación dinámica son los centralizadores rígidos de cuerpo sólidos.

¹⁷ Schlumberger. Well Cementing. Erik B. Nelson; Dominique Guillot ed. Sugar Land, Texas.: 2006. p. 799978-097885300-6362-396.

Son adecuados para pozos con desviación alta y requerimientos de fondo de pozo complejos. Los materiales en los que son fabricados son resistentes a altas presiones y temperaturas, así como a ambientes corrosivos o de erosión. El cuerpo sólido del accesorio reduce el arrastre y facilita la protección del revestimiento hasta el fondo. Su ubicación con respecto a la tubería facilita el movimiento de esta, evitando que se atasque ya que se adhiere al cuerpo físico de esta. Permiten una distribución de cemento alrededor de la tubería y la formación debido a la forma y disposición de sus aletas.

Así mismo, rompen la gelificación del lodo mejorando el desplazamiento de fluidos durante la operación. Incrementan la turbulencia del fluido removiendo el revoque de lodo de perforación en la cara del pozo. Se pueden fabricar con longitud, diámetro externo, número, ancho y ángulo de las aletas según los requerimientos del cliente. Estos se pueden ver en el costado izquierdo de la **Figura 16**.

2.1.2 Pre-Flujos. Además del objetivo principal de los pre-flujos, que es evitar el contacto cemento/lodo con el fin de impedir la contaminación del cemento, estos también juegan un papel muy importante en la función de remover y desplazar el lodo gelificado y deshidratado. Esto se logra en función a la reología, química y densidad de los fluidos en cuestión.

Estos factores aseguran la limpieza adecuada de las paredes del anular, así como el humedecimiento del revestidor y la formación. Los fluidos utilizados para los pre-flujos no deben inducir daño de formación por la filtración excesiva ni cambios en la mojabilidad de la roca. Los pre-flujos, según Schlumberger (2006), deben tener los siguientes atributos.

- a). Deben ser compatibles con la lechada de cemento y el lodo.
- b). Deben asegurar la remoción del lodo mediante una reología y densidad optimas a condiciones de fondo.
- c). Deben tener la química adecuada para limpiar superficies solidad y dejarlas humectadas.¹⁸

CPVEN (2008) explica que existen tres tipos de pre-flujos que serán mencionados a continuación.

- *Lavadores.* Son fluidos con una densidad y viscosidad muy cercanas a las del agua o al aceite, según sea la base utilizada para elaborarlo. Esto permite que sean fácilmente bombeadas en flujo turbulento. Están perfectamente

¹⁸ Ibid. p. 184-187.

representados por el modelo de fluido newtoniano. Estos contienen surfactantes, dispersantes y adelgazantes de lodo.

Actúan mediante el adelgazamiento y dispersión de la capa de lodo para que sea más fácilmente removido, también previenen la formación de la interfase gelificada lodo-cemento. Su mecanismo de acción consiste en ejercer una acción dual sobre el lodo. Químicamente dispersan y diluyen las partículas de lodo y mecánicamente ejercen erosión producida por la turbulencia que alcanzan los fluidos a najo caudal de desplazamiento.

- *Espaciadores.* Estos fluidos cuentan con características reológicas cuidadosamente controladas. Forman un colchón entre el cemento y el lodo que arrastra al lodo fuera del anular durante la cementación. Los espaciadores poseen alto contenido de sólidos, lo que provoca una acción erosiva en las paredes del revestidor y de la formación.

Pueden ser bombeados en régimen laminar o turbulento. Es de suma importancia que la densidad del espaciador sea intermedia entre la del lodo y la del cemento, debido a que de esta manera actúa el efecto de flotación de los fluidos aportando a una remoción más efectiva.

Están compuestos principalmente por viscosificantes, como polímeros solubles en agua y arcillas inorgánicas; dispersantes, más específicamente sulfonatos; controladores de filtrado; agentes densificantes, como barita y hematita; surfactantes no iónicos y aniónicos y sales inorgánicas entre las cuales se encuentran el NaCl y KCl.

Los espaciadores se utilizan más comúnmente cuando se combate un lodo con una viscosidad y pesos elevados, o cuando la presión de la formación es alta y no es viable el uso de lavadores.

- *Lechadas Removedoras o Scavenger.* Son lechadas de cemento con densidades inferiores a las 11 libras por galón que pueden ser consideradas como espaciadores. Estas deben tener excelentes propiedades reológicas y controladores de filtrado con el fin de permitir su bombeo en flujo turbulento y así puedan cumplir sus funciones como fluidos erosivos y de transporte del lodo.

Presentan inconvenientes debido a la incompatibilidad que tienen, en muchas ocasiones, con el lodo; sin embargo, para solventar esta desventaja el bombeo de esta lechada se puede preceder de un lavador químico que reduzca el frente de contaminación.¹⁹

¹⁹ CPVEN. Seminario De Cementación. [Print(0)]: Seminario ed. Maracaibo, Venezuela.: 2008.

2.1.3 Lechada y Aditivos. El fluido utilizado para una operación de cementación es una mezcla con propiedades físicas y químicas controladas entre un fluido hidratante, el cemento seco y diferentes aditivos que ajustan la lechada a las condiciones del trabajo de cementación que será realizado. Esto depende de las condiciones en subsuelo como temperatura, presión, características de las formaciones, profundidad de interés, entre otros; así como de las herramientas en superficie y subsuelo que serán utilizadas durante la operación. Las lechadas de cemento se diseñan con el fin de brindarles la capacidad de cumplir sus funciones de asegurar el anular, dar sostén a la sarta, proteger el revestimiento de corrosión y desgaste, proveer aislamiento zonal efectivo tanto de otras formaciones como de acuíferos de agua fresca, sellar presiones anormales en la totalidad de profundidad de la sección de pozo que se ha perforado, entre otros.

Según CPVEN (2008), la lechada de cemento debe diseñarse para ser efectiva en un amplio rango de condiciones operacionales como temperaturas bajas o altas hasta 350°F, presiones desde la atmosférica en pozos someros, hasta más de 30000 lb/pulgada² en pozos de grandes profundidades, gradientes de fractura muy bajos en las formaciones, ambientes corrosivos, zonas con sobre presión u zonas ladronas.

Para sobrellevar estas condiciones que en algunos casos son extremas, durante el diseño de la lechada, se puede modificar su composición con el fin de alcanzar con éxito el desempeño necesario para asegurar la integridad del pozo. Este acondicionamiento de la mezcla se hace por medio de aditivos, sólidos o líquidos, de diferentes clases que alteran los mecanismos de acción de la lechada neta que se compone de agua y cemento seco. Existen diferentes familias de aditivos, como se mostrará a continuación.

- *Acelerantes.* Son aditivos que se agregan a la lechada de cemento con el objetivo de acortar el tiempo de espesamiento y aceleran el proceso de endurecimiento. También se utilizan como contraste al retardo causado por el uso de otra clase de aditivos, como los dispersantes o controladores de filtrado. Los más comunes son las sales inorgánicas como cloruro de calcio, cloruro de potasio y cloruro de sodio. En otras ocasiones, menos comunes, se utilizan los carbonatos, silicatos y aluminatos.
- *Retardantes.* Estos alargan el tiempo de esparcimiento y retardan el proceso de endurecimiento. Existen cuatro teorías que explican su mecanismo de acción: Teoría de la absorción, que atribuye el retardo a la absorción del retardador a través de la superficie de los productos hidratados, inhibiendo su contacto con el agua. Teoría de la precipitación, la cual dice que el retardador reacciona con los iones calcio e hidróxido en la fase acuosa formando una capa insoluble y

poco permeable alrededor de los granos de cemento. Teoría de la nucleación, que explica que el retardador es absorbido por el núcleo de hidratación envenenándolo e inhibiendo su crecimiento. Y por último se tiene la teoría de la complejación, que refiere el efecto a que los iones de calcio son recubiertos por el retardador, impidiendo la formación del núcleo de hidratación. Existe una gran posibilidad que la realidad del mecanismo de acción de los aditivos retardadores sea una combinación de las cuatro teorías mencionadas anteriormente. Los retardadores se pueden encontrar especializados para altas temperaturas (menores a 300°F), media temperatura (menor a 250°F) y bajas temperaturas (menor a 180°F).

Los productos químicos usados como retardadores se dividen en dos grupos. El primero son los materiales orgánicos, entre los cuales se encuentran los lignosulfonatos, como sodio y calcio; ácido cítrico, azúcares, polisacáridos y compuestos órgano fosforados. El segundo grupo son los materiales inorgánicos que está compuesto por ácidos y sales de boro, fósforo, flúor y cromo; cloruro de sodio con una concentración mayor al 20% y óxidos de zinc y plomo.

- *Extendedores.* Estos reducen el peso de la lechada e incrementan el rendimiento de la misma. Se utilizan con el fin de reducir el peso de la lechada o de incrementar el rendimiento. Existen tres tipos principales, clasificados de acuerdo a su mecanismo de acción, los cuales son: Materiales reactivos, que son principalmente viscosificantes del agua que permiten agregar un exceso de agua para alcanzar el peso deseado; materiales inertes de baja densidad los cuales, como su nombre lo dice, tienen densidades inferiores a las normales para el cemento lo que ocasiona que la densidad de la lechada en general disminuya cuando estos son agregados a la mezcla; y extendedores gaseosos, que se utilizan para hacer lechadas espumosas con densidades muy bajas (menores a 6.0 libras por galón) y con alta resistencia a la compresión.

Entre los materiales reactivos se pueden encontrar arcillas como la bentonita, principalmente, y la montmorillonita o atapulguita; silicatos de sodio; puzolanas como diatomáceas o cenizas volcánicas; y sílica, Dentro del grupo de los materiales inertes se tienen gilsonitas, perlita expandida y micro esferas. Y como gas inerte se usa comúnmente el nitrógeno.

El uso de arcillas como la bentonita trae consigo ventajas económicas, mejor control de filtrado y estabilidad a altas temperaturas, pero es inherente a ciertos inconvenientes como la disminución de la resistencia a la compresión, incremento de la permeabilidad del cemento y disminución de la resistencia a los sulfatos y agentes corrosivos.

- *Densificantes.* El objetivo de los aditivos densificantes es incrementar el peso de la lechada y disminuir el rendimiento de la misma. Se usan tres materiales

principales: Barita, Hematita e Ilmenita. Esos deben cumplir ciertos requisitos como poseer una gravedad específica mayor a la del cemento, su fineza debe compararse a la del cemento para no incurrir en decantación o aumentar la viscosidad de la lechada, deben tener bajo requerimiento de agua, y deben ser inertes y compatibles con otros aditivos.

Los escenarios en los cuales se requiere un aditivo densificante son, por ejemplo, cuando es necesario aumentar la densidad de la lechada para igualar el peso del lodo y así, mediante altas presiones hidrostáticas, controlar casos de presiones de poro incrementadas, pozos inestables y formaciones plásticamente deformables.

- *Dispersantes.* Estos aditivos, también conocidos como súper plastificantes o inductores de turbulencia, actúan sobre las cargas eléctricas de las partículas, que representan el 70% en concentración en la suspensión agua/sólidos presente en una lechada de cemento, con el fin de obtener una reología deseada. Estos aditivos tienen un efecto sobre el punto cedente y la viscosidad de la lechada. El primero varía inversamente a la concentración de dispersante y el segundo disminuye cuando aumenta la concentración del aditivo en cuestión.

Los compuestos usados como agentes dispersantes son sulfonatos como la polimelanina, polinapiealeno y el poliestireno; polisacáridos como el polisacárido hidroxilado; y químicos no poliméricos tales como los ácidos hidroxicarboxílicos.

- *Agentes Anti-Sedimentación.* Son los encargados de contrarrestar los efectos secundarios del uso de dispersantes en las lechadas de cemento, los cuales son la sedimentación (debido a la acción electrostática del dispersante, las partículas se repelen entre sí haciendo que se muevan y caigan por gravedad hasta depositarse en el fondo) y la presencia de agua libre (el agua se separa de las partículas sólidas que flotan en ella y se acomoda por gravedad en la parte superior).

El mecanismo de acción de estos aditivos es incrementando el punto cedente en la lechada, pero sin afectar la bombeabilidad de la misma; de esta manera se mantiene homogénea y se pueden evitar los problemas anteriormente mencionados. Los compuestos usados para este fin son la Bentonita, los Polímeros Hidrosolubles, los Silicatos y las Sales Metálicas (NiCl₂/ MgCl₂).

- *Controladores de Filtrado.* Evitan la pérdida de filtrado manteniendo estables las propiedades y reología de la lechada. Cuando una lechada de cemento es colocada a través de una zona permeable, se genera una filtración de la fase acuosa de la mezcla hacia la formación dejando las partículas sólidas de la lechada en la cara de la formación. Si este proceso no se controla, propiedades

como la densidad, tiempo de espesamiento, y otras características reológicas se ven afectadas dificultando o imposibilitando la operación.

Los agentes controladores de filtrado minimizan el filtrado de la fase acuosa mediante la reducción de la permeabilidad de la costra de cemento o incrementando la viscosidad de la fase acuosa. Existen dos tipos de estos aditivos; los materiales controladores de filtrado como la bentonita, materiales orgánicos (carbón, asfaltos, resinas) o el latex; y los polímeros solubles en agua como derivados de la celulosa y polímeros sintéticos iónicos o no iónicos.

- *Controladores de Pérdida de Circulación.* Estos aditivos crean puentes sobre fracturas, huecos o espacios débiles para evitar la pérdida de circulación en formaciones porosas, cavernosas y fracturadas. Se pueden utilizar obturadores como materiales granulados inertes (gilsonita o kolite) o recortes de celofán.
- *Antiespumantes.* El uso de distintos aditivos puede generar espuma en la lechada de cemento, esto puede provocar gelificación de la lechada, problemas al leer la densidad de la misma, y dificultades para la mezcla y bombeo por cavitación y pérdida de succión en las bombas. Es por esto que se usan aditivos antiespumantes sólidos o líquidos los cuales cambian la tensión superficial y/o alteran la dispersabilidad de los sólidos evitando la generación de la espuma. Se pueden utilizar éteres poli glicoles o siliconas.
- *Agentes Flexibles.* Se agregan a la lechada con el fin de incrementar la resistencia del cemento a los esfuerzos de flexión relacionados con la perforación, collares, entre otros. Se puede utilizar nylon o caucho molido. En algunas ocasiones el uso de látex brinda esta característica también.
- *Trazadores Radioactivos.* Estos aditivos permiten localizar determinada lechada detrás del revestidor, con el fin de determinar el nivel de llenado o tope del cemento. Los trazadores más comúnmente usados son el yodo 131, en estado líquido, y el iridio 102, en estado sólido.
- *Inhibidores de Contaminación del Cemento.* Para minimizar el efecto contaminante de ciertos componentes químicos presentes en el lodo, tales como almidón o celulosa, se utilizan inhibidores como para-formaldehído o mezclas de para-formaldehído y cromato de sodio.²⁰

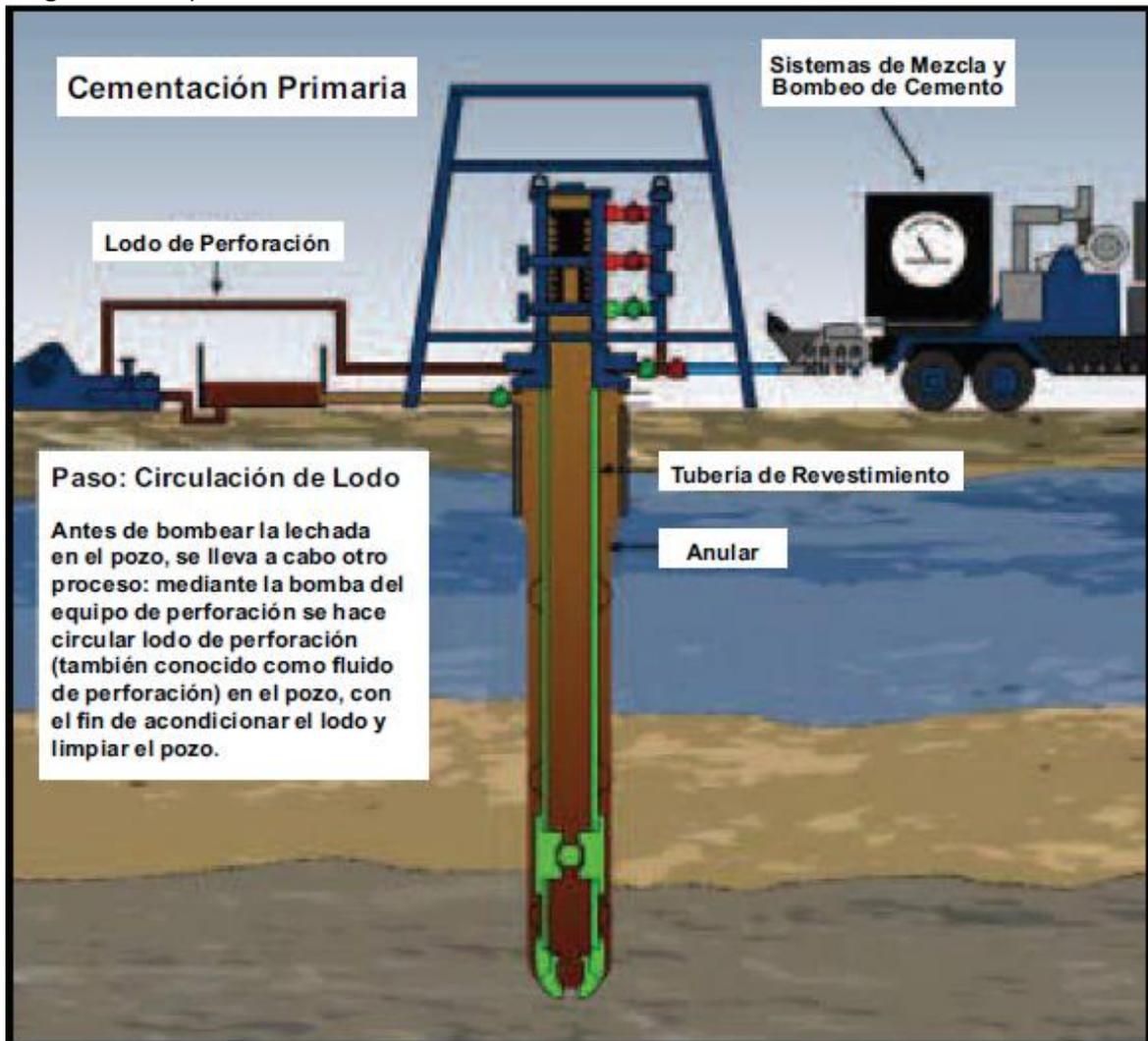
²⁰ Op. Cit. CPVEN. Pag. 42-49.

2.1.4 Descripción del Proceso. La mayoría de trabajos de cementación convencionales se realizan bombeando la lechada por el revestimiento hasta el fondo del hueco y esta luego vuelve a superficie por el anular. Otras técnicas se han desarrollado con el fin de resolver limitantes y problemas que se presentan en el pozo durante la cementación.

Diferentes factores como la longitud del intervalo o el revestimiento a cementar, así como las presiones o características geológicas del hueco influyen en la selección de la técnica a implementar durante el proceso. Según Schlumberger (2006), los procedimientos más comunes se describirán a continuación.

- *Cementación en una Etapa.* Este procedimiento redujo la necesidad de realizar procesos de cementación en múltiples etapas ya que gracias a la implementación de lechadas de cemento de baja densidad, estas se puede ubicar en el anular sin correr el riesgo de fracturar formaciones débiles debido a la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido.
- *Corrida de la Tubería de Revestimiento.* Se debe correr tramo a tramo de tubería. Estas tuberías tienen conexiones roscadas que se ajustan por medio de llaves de potencia. Por medio de la zapata guía acoplada al extremo del primer tramo, se posiciona el revestimiento en la profundidad deseada y se procede a realizar las conexiones necesarias en el cabezal.
- *Acondicionamiento del Lodo.* Después de ubicar el revestimiento en su lugar, se circula el lodo el tiempo necesario para remover bolsillos de lodo gelificados que se hayan formado durante el periodo semi-estático que comprende los procesos de sacar la tubería de perforación, tomar registros y correr el revestimiento. La circulación del lodo se desarrolla a través de la cabeza de cementación ya que esto evita que se deba detener la operación por largos periodos de tiempo ya que se puede incrementar el riesgo de gelificación y esto afecta directamente la eficiencia de remoción del lodo. (**Figura 17**)
- *Pruebas de Presión.* Para garantizar la integridad de las líneas por las cuales serán bombeados los fluidos al pozo, se realiza una prueba que consiste en llenarlas de agua y presurizar durante un determinado tiempo. De esta manera se puede verificar si existen fugas en el proceso para poder repararlas de inmediato, de lo contrario esto conllevaría graves problemas a la operación.

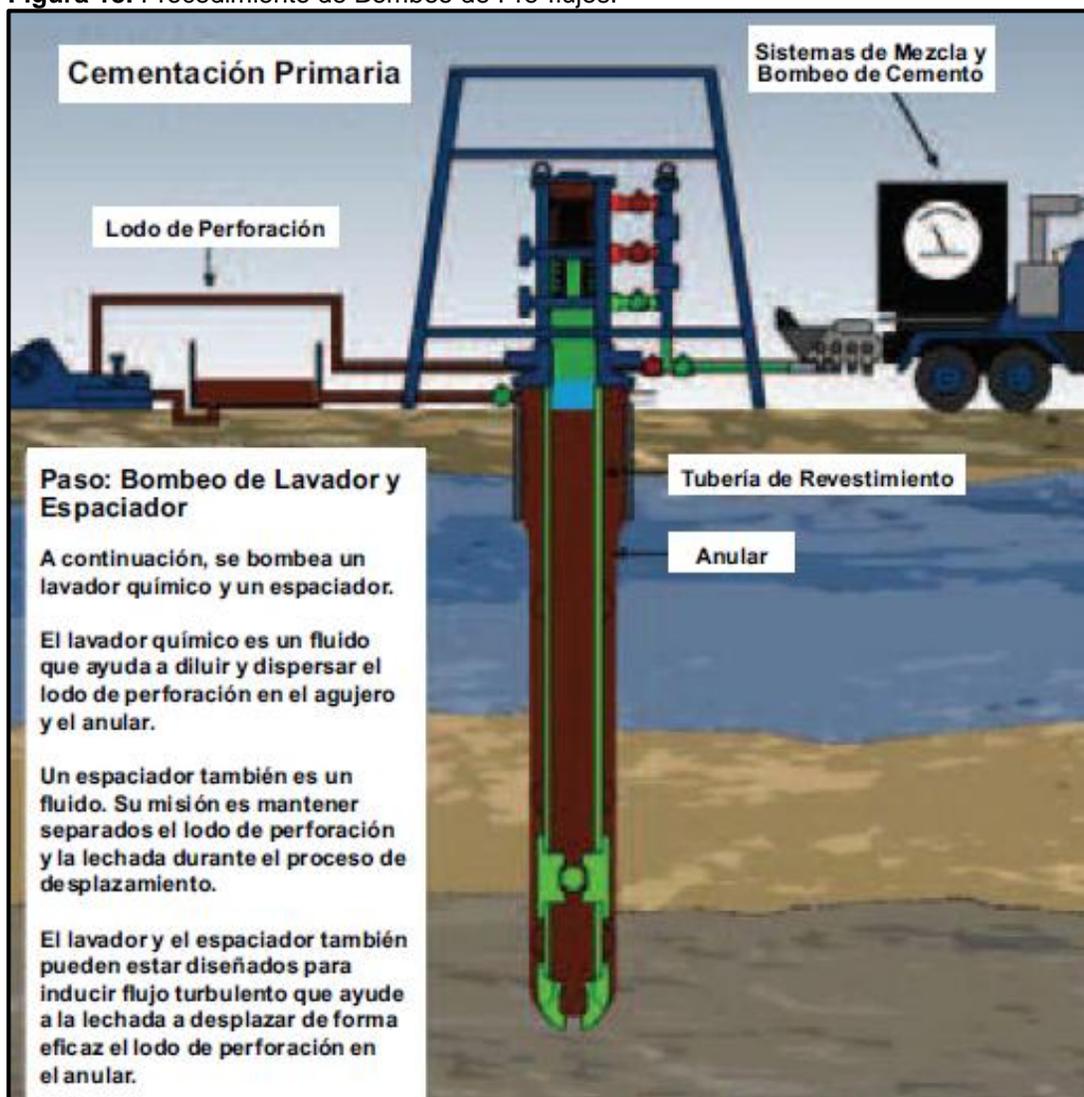
Figura 17. Etapa de Circulación del Lodo.



Fuente: Manual de Cementación. Schlumberger. 2006.

- Bombeo de Pre-flujos. El lavador y espaciador, que actúan como un colchón entre los fluidos remanentes en el pozo y los que serán bombeados para la operación de cementación, se bombean con el fin de generar un régimen de flujo turbulento para así eliminar completamente los fluidos de perforación del anular antes de bombear la lechada de cemento al hueco y evitar la contaminación de ésta. (Figura 18)

Figura 18. Procedimiento de Bombeo de Pre-flujos.

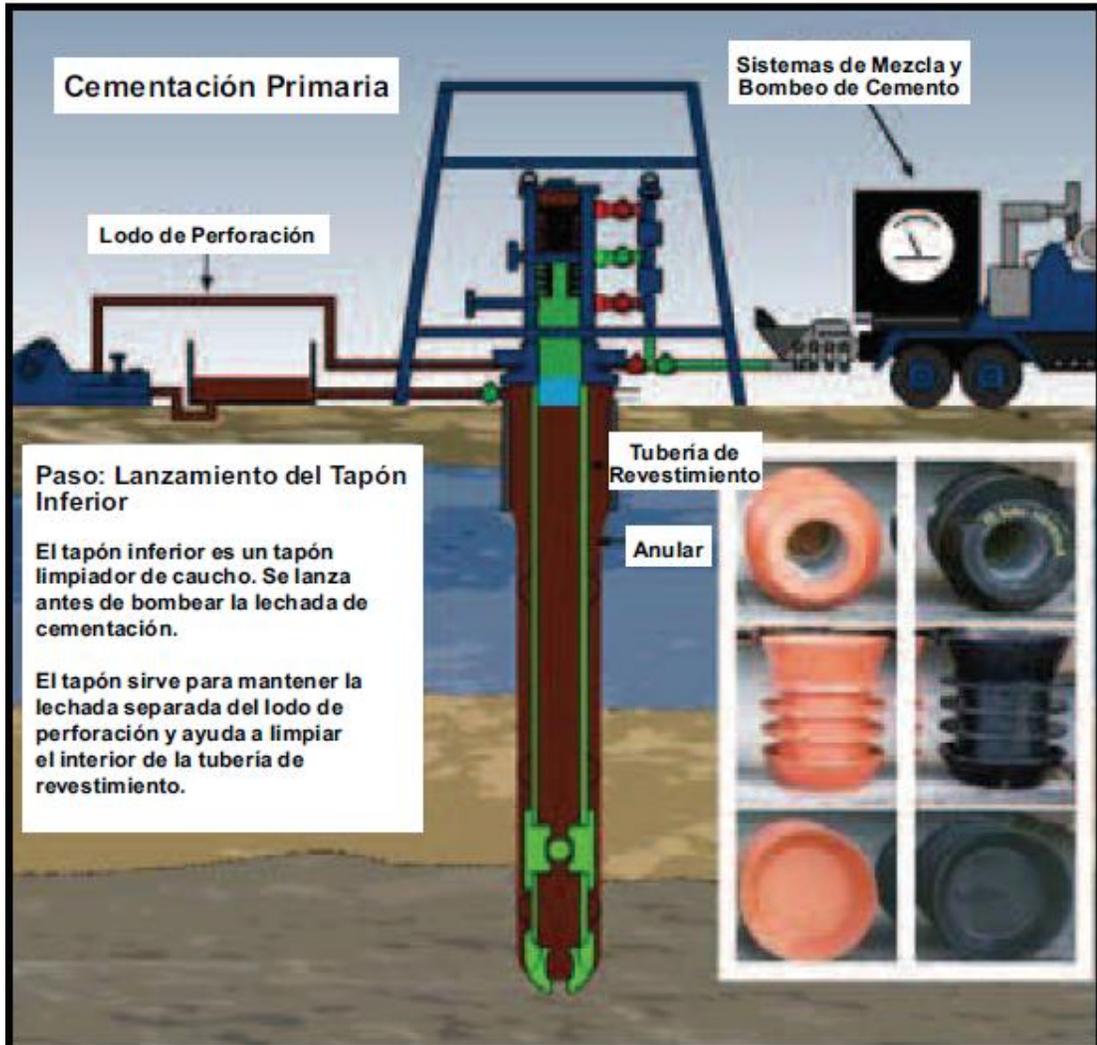


Fuente: Manual de Cementación. Schlumberger. 2006.

- Tapón de Fondo. Este es un accesorio que previene la mezcla o contacto entre los fluidos del hueco y hace un barrido de limpieza de la pared interna del revestimiento. El objetivo principal de éste tapón es prevenir la contaminación de la lechada de cemento por el contacto con el lodo. Para mayor eficiencia a la hora de separar los fluidos o realizar una limpieza, en ocasiones se utilizan dos o hasta tres tapones. Adicionalmente, esta herramienta provee una indicación positiva (aumento de presión) que indica que el cemento o fluidos están en posición. Este tapón es bombeado, según las practicas convencionales, entre los fluidos con el mayor diferencial de densidades y se debe proveer un volumen de sacrificio entre los fluidos restantes, los cuales deben ser reológicamente compatibles.

Este elemento es hueco y tiene una membrana de caucho en la parte superior, la cual estalla cuando el tapón se sienta y recibe la carga suficiente por presión diferencial. Este se lanza desde la cabeza de cementación ubicada en superficie, en la cual ha sido cargado previamente. **(Figura 19)**

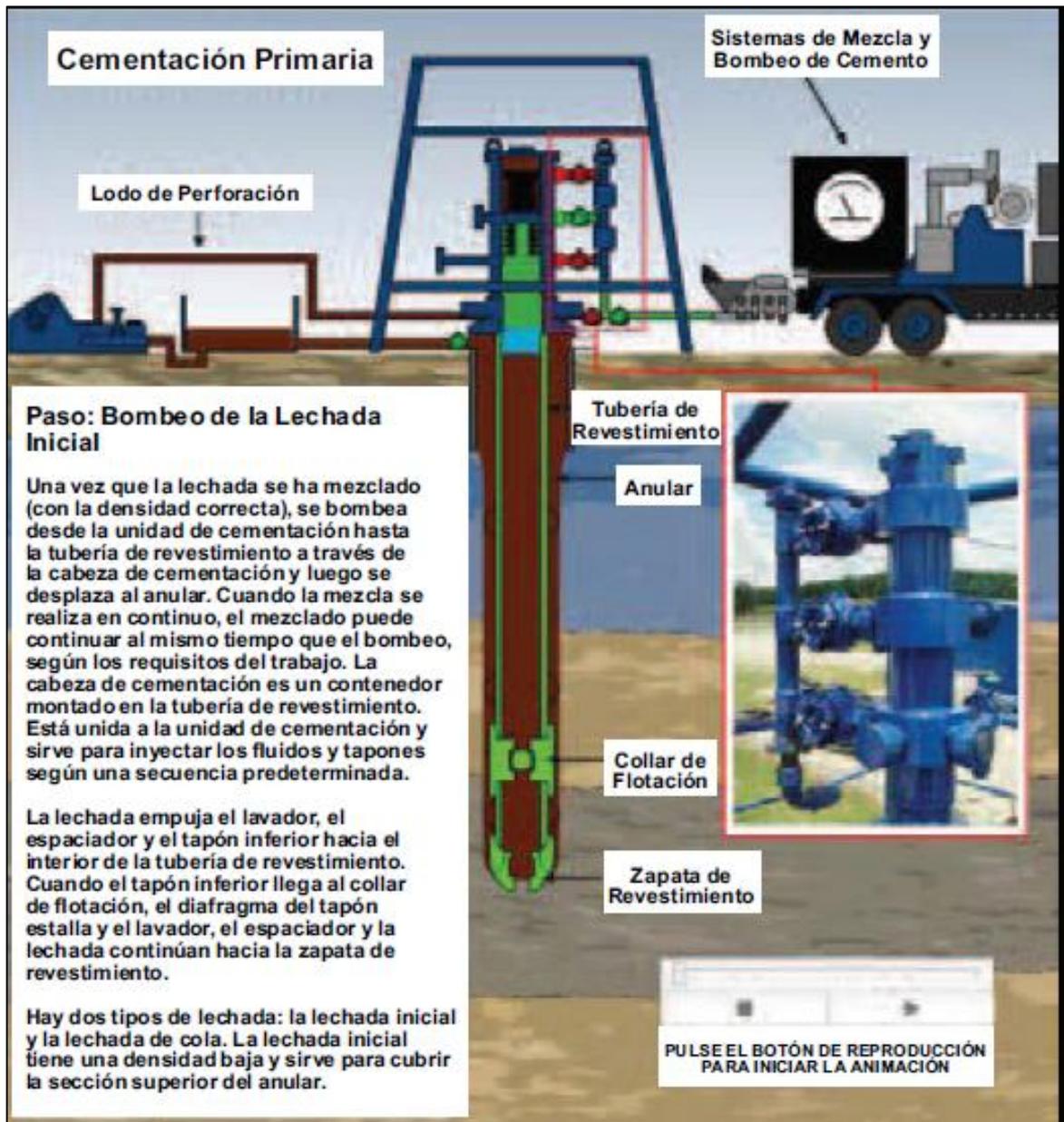
Figura 19. Lanzamiento de Tapón de Fondo.



Fuente: Manual de Cementación. Schlumberger. 2006.

- Procedimientos de Desplazamiento de las Lechadas. A continuación, las lechadas son desplazadas. Existen dos tipos: (a) La lechada inicial, que tiene como objetivo cubrir la sección superior del anular y cumple función, en cierta manera, de volumen de sacrificio. Tiene una baja densidad, lo que le otorga un alto rendimiento. Es la primera en ser bombeada, después del lavador y el tapón de fondo **(Figura 20)**. Cumple con la jerarquía reológica requerida.

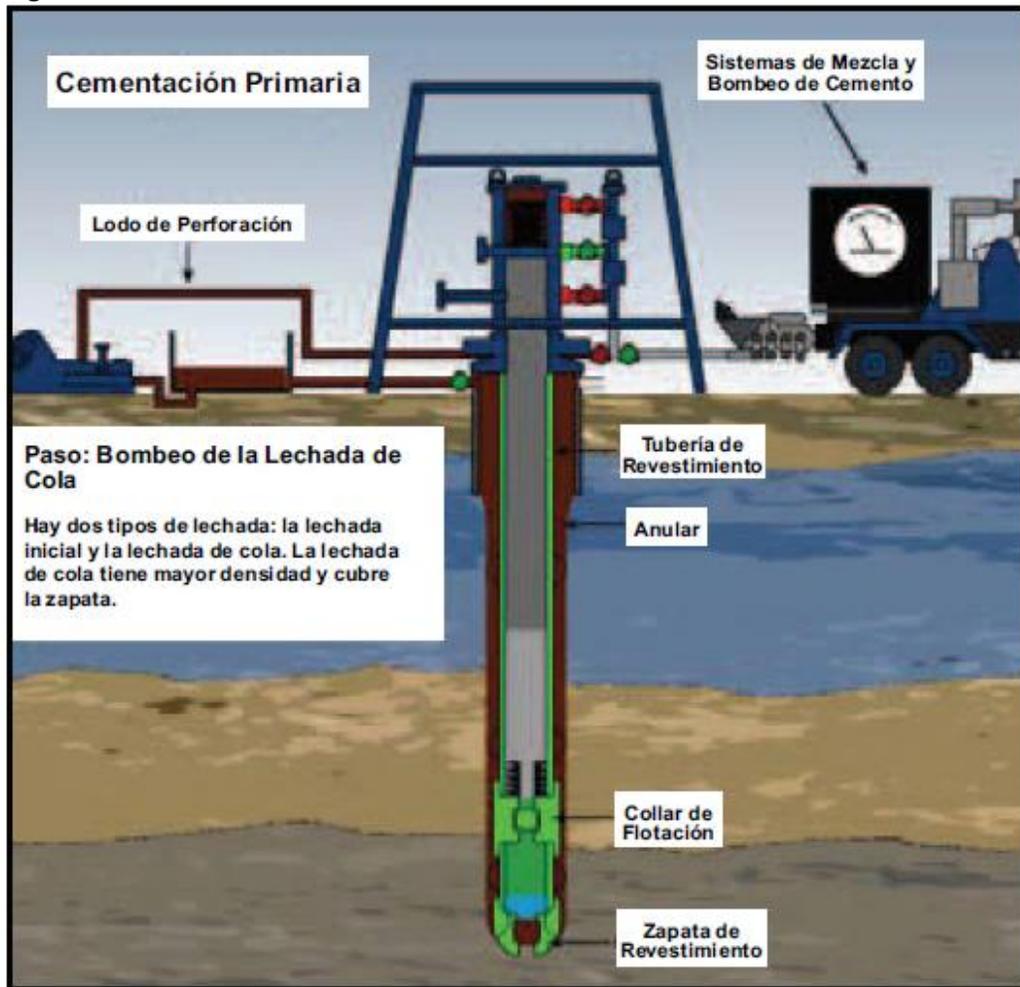
Figura 20. Procedimiento de Bombeo de Lechada Inicial.



Fuente: Manual de Cementación. Schlumberger. 2006.

(b) La lechada de cola, es la principal, y en complemento a la función de la lechada inicial, ésta busca cubrir la sección inferior del anular desde el fondo del agujero. Esta tiene propiedades reológicas superiores a la lechada anterior y su densidad es diseñada con sumo cuidado para que otorgue la eficiencia deseada en la operación. (Figura 21)

Figura 21. Procedimiento de Bombeo de Lechada de Cola.



Fuente: Manual de Cementación. Schlumberger. 2006.

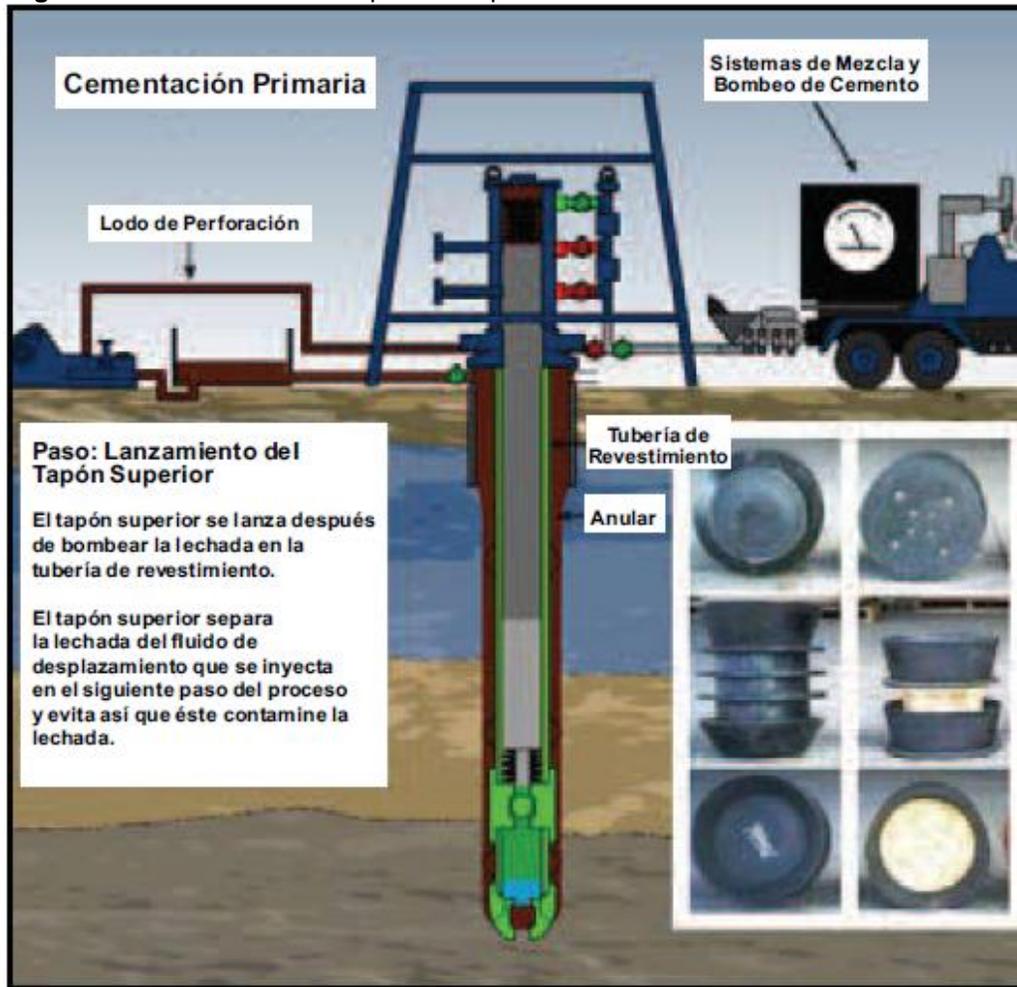
La tasa a la cual el cemento es desplazado dentro del anular es distinta a la tasa de bombeo y varía dependiendo de la densidad de los fluidos y el régimen de flujo establecido en el diseño de la cementación. Esto ocurre hasta que el nivel de fluido alcanza la superficie, y a partir de ahí, toma lugar un flujo continuo.

Una vez que el flujo continuo es reestablecido, la tasa de flujo anular es igual a la tasa de bombeo y la presión en superficie comienza a incrementarse durante la localización del cemento remanente detrás del revestimiento.

- Tapón Superior. Es una herramienta sólida, de las mismas características del tapón de fondo. Este tapón se lanza únicamente manipulando las válvulas en la cabeza de cementación las cuales habilitan u obstruyen el paso de este (**Figura 22**). Este tapón separa y evita el contacto entre los fluidos bombeados después de lanzar el tapón de fondo.

El bombeo de fluidos continúa a la tasa programada hasta que el tapón superior se asienta en el collar flotador, en este momento se reduce la tasa de bombeo para evitar un aumento abrupto de la presión.

Figura 22. Lanzamiento de Tapón de Superior.



Fuente: Manual de Cementación. Schlumberger. 2006.

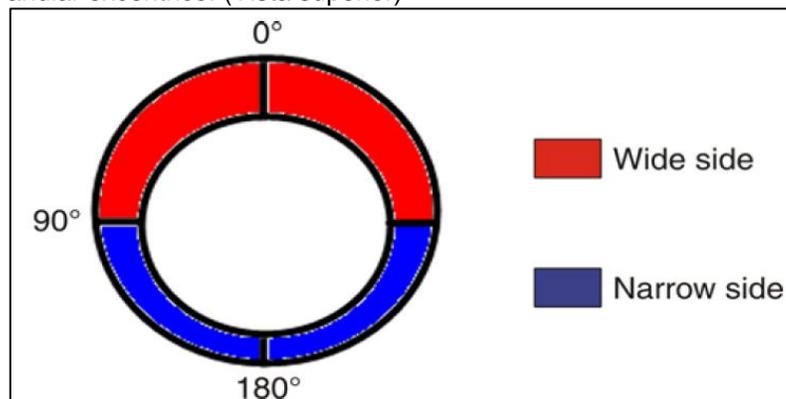
- Revisión de los Flujos de Retorno. Después de haber realizado el desplazamiento de las lechadas y los tapones con un fluido posterior al bombeo de estos, y de haber detenido el flujo, se debe comprobar que el collar de flotación o zapato flotador no presenten fugas (Retornos de los fluidos por la tubería). Esta comprobación se puede realizar cuando el flujo de retorno, que en condiciones normales debe ser de dos a cinco barriles y se detiene, sigue fluyendo a los tanques de desplazamiento.²¹

²¹ Schlumberger. Manual De Cementación: Introducción a La Cementación. p. 697-14.

2.1.5 Problemas y Limitaciones. Durante la operación de cementación convencional se pueden presentar diversos problemas que dificultan obtener los resultados esperados según la normatividad y los requerimientos de las empresas operadoras para lograr la integridad del pozo y garantizar su vida productiva. Como se ha explicado anteriormente, el objetivo principal de la operación de cementación primaria es emplazar el cemento alrededor de todo el anular y que éste después de solidificarse cree un sello efectivo sin canales que permitan cualquier flujo de fluidos detrás del revestimiento. Tal objetivo se ve afectado principalmente por condiciones del pozo como perfiles direccionales complejos, centralización del anular y zonas lavadas o “washout”. A su vez, la limpieza efectiva del tren de pre-flujos bombeados antes de la lechada de cemento, se ve afectada por factores como la jerarquía reológica de los pre-flujos y la gelificación del lodo. Tal limpieza es de crucial importancia para un desempeño efectivo de la operación de cementación primaria. A continuación, se detallan los problemas expuestos.

- *Condiciones del Pozo.* Al realizar la corrida de revestimiento en pozos desviados, se genera un efecto difícil de controlar a pesar del diseño de centralización que se realiza. Este efecto consiste en la fuerza que ejerce la gravedad sobre la tubería obligándola a recostarse contra la pared del hueco debido a la inclinación del mismo. Esto conlleva a la generación de un anular irregular que se divide en dos espacios de flujo; uno amplio y uno estrecho como se muestra en la **Figura 23**.

Figura 23. Ilustración del espacio de flujo amplio y estrecho en un anular excéntrico. (Vista superior)

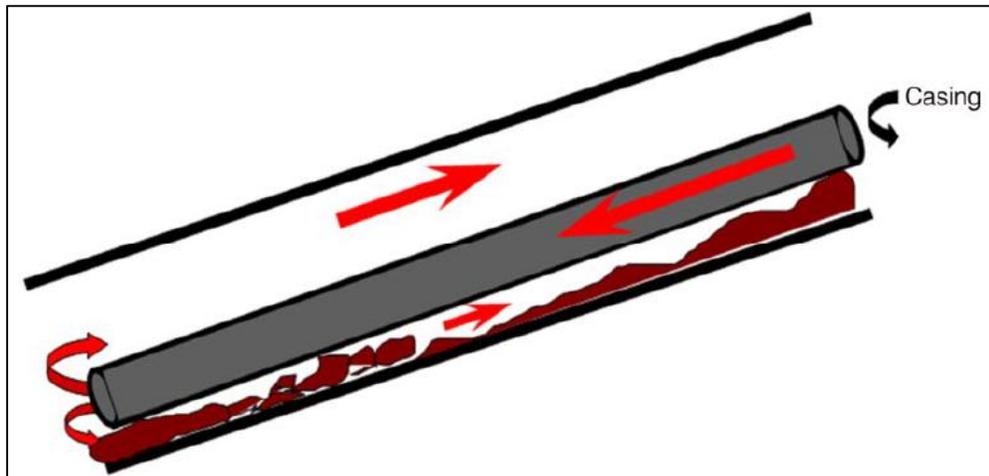


Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

Lo explicado anteriormente genera problemas de excentricidad, que es una condición de descentralización del eje central de la tubería con respecto al del hueco, debido a la cual se crea un patrón de flujo preferente a través del espacio amplio del anular, ocasionando que los fluidos tengan mayor resistencia a fluir

por el espacio estrecho. Adicionalmente, esto reduce la velocidad de flujo del fluido a través de este último. Razón por la cual, los pre-flujos bombeados con el objetivo de limpiar el pozo no logran desplazar el lodo de perforación en las zonas donde la tubería está más cercana a la pared del pozo, o lugares de acumulación de fluidos como cavernas o zonas del hueco con un diámetro mayor al de la broca debido a sobre esfuerzos ejercidos sobre la formación o inestabilidad de la misma; ocasionando contaminación de la lechada y un emplazamiento ineficiente de los fluidos en la zona estrecha como se muestra en la **Figura 24**.

Figura 24. Demostración del patrón de flujo preferente por un anular excéntrico.



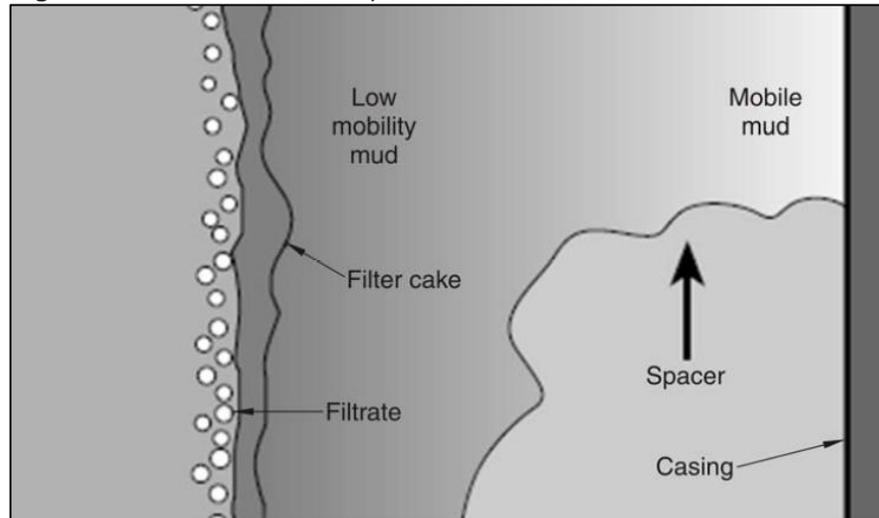
Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

- *Limpieza del Anular.* Como se ha mencionado anteriormente, una limpieza efectiva del espacio anular es esencial para obtener éxito en la operación de cementación y evitar la contaminación de la lechada de cemento debida al contacto con los pre-flujos bombeados. Esta contaminación es propiciada en gran magnitud por la gelificación del lodo de perforación.

Esto ocurre cuando se realizan operaciones de corrida de revestimiento y toma de registros a hueco abierto debido a que se incurre en tiempos prolongados en los cuales el fluido se encuentra estático ocasionando que una porción de éste se gelifique y presente mayor resistencia al desplazamiento, como lo muestra la **Figura 25**.²²

²² MORONI, Nevio, et al. Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 2009. 978-1-55563-261-8. P. 2-6.

Figura 25. Ilustración de la disposición de fluidos en el anular.



Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

- *Desplazamiento de Fluidos.* Como se ha explicado anteriormente, la intención de la operación de cementación es reemplazar la columna de fluido de perforación por cemento, con una eficiencia medida a partir de la **Ecuación 1**, la cual plantea una relación entre el área con cemento y el área de todo el anular. Esta eficiencia debería ser del 100% ya que todo el anular debería quedar cementado.

Ecuación 1. Eficiencia de Desplazamiento.²³

$$\text{Eficiencia de Desplazamiento} = \frac{\text{Área Cementada}}{\text{Área Anular Total}} \quad (1)$$

$$\text{Área Anular Total} = \text{Área Cementada} + \text{Área No Desplazada}$$

La eficiencia de desplazamiento se puede ver seriamente afectada por el efecto de los espacios anulares amplio y estrecho explicado anteriormente, ya que parámetros como el fluido de perforación gelificado y la excentricidad de la tubería ocasionan que un correcto desplazamiento de los fluidos en el anular se dificulte y de esa manera el área cementada no sea total.

²³ HOLT, Calvin y LAHOTI, Niles Nandkishor. Dynamic Cementation Improves Wellbore Construction and Reduces the Hazards of Groundwater Contamination in Shale Plays. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 2012. 978-1-61399-247-0. P. 2-5.

Estos parámetros pueden afectar la tasa, la velocidad y el régimen de flujo de los fluidos, tanto pre-flujos como lechada de cemento, provocando un obstáculo de flujo a través del anular evitando que los fluidos sean desplazados uniformemente a través del anular y como consecuencia se obtiene un tope de cemento irregular.

- *Migración de Gas.* Este es un problema de gran importancia en las operaciones de cementación primaria. Cuando el cemento es bombeado y comienza a desarrollar esfuerzos compresivos, hay una caída de presión hidrostática debida a la adhesión de la lechada tanto a la tubería como a la formación. Esta adhesión ocurre gracias al desarrollo de las fuerzas estáticas de gel en el cemento en adición a una pérdida de volumen de la lechada. La adherencia del cemento disminuye cuando la presión cae por debajo de la presión de la formación adyacente y aún está en un estado deformable, permitiendo de esta manera la migración de gas hacia el anular.

2.2 CEMENTACIÓN REMEDIAL

La cementación remedial, es aquel procedimiento que consiste en emplear fluidos cementantes para solucionar los problemas operacionales que se presentan durante las etapas de construcción, simulación, producción o abandono del pozo. En una definición más técnica se encuentra que “El forzamiento, es el proceso mediante el cual se aplica presión hidráulica para dirigir la lechada de cemento hacia un punto específico del pozo y mediante esta presión se deshidrata el cemento dentro de cavidades o contra una zona porosa y permeable de la formación.” (CPVEN, 2008)

Existen numerosos motivos por los cuales se deba recurrir a la cementación remedial, pero el objetivo general de esta operación es crear un sello efectivo entre la formación y el revestimiento mediante el posicionamiento del cemento en espacios libres (sin cemento) que afecten la efectividad del aislamiento.²⁴

Según Schlumberger (2006), la cementación remedial se divide comúnmente en dos categorías: “Plug Cementing” (Tapón de Cemento) o “Squeeze Cementing” (Cementación forzada o a presión). La operación de “Plug Cementing” consiste en bombear un volumen específico y formulado de lechada de cemento al hueco y permitir su fragüe. Y en la operación de “Squeeze Cementing” se realiza un forzamiento, mediante aplicación de presión, del cemento bombeado a través de

²⁴ CPVEN. Seminario De Cementación. [Print(0)]: Seminario ed. Maracaibo, Venezuela.: 2008. P. 567

agujeros, grietas, fracturas o fisuras en el revestimiento, en las paredes del pozo, o en el espacio anular entre estos.²⁵

2.2.1 Aplicaciones. Durante la vida útil de un pozo se puede presentar una gran variedad de problemas operacionales. En ocasiones, determinar la raíz del problema es complicado, para esto se debe tener un amplio conocimiento de la operación y todas sus derivaciones.

Con base en lo anterior, se podrá seleccionar el tratamiento remedial adecuado para obtener una alta probabilidad de éxito en la operación. A continuación, se expondrán los problemas típicos que, según Schlumberger (2006), se podrían presentar en las diferentes etapas de un pozo y su posible tratamiento remedial.

- *Construcción del Pozo.* Durante esta etapa, que comprende las operaciones de perforación, corrida del revestimiento, cementación y completamiento, se tiene a disposición en locación un taladro de perforación. Esto permite considerar los métodos estándar para solucionar problemas como los que serán mencionados a continuación.
- *Pérdida de Circulación.* Este problema ocurre normalmente cuando se tienen zonas captoras de fluidos, conocidas como “zonas ladronas”. Éstas, debido a su porosidad y permeabilidad, o por posible presencia de fracturas inducidas, cavernas o fisuras naturales, permiten que los fluidos bombeados al pozo circulen hacia las formaciones alterando así los niveles requeridos o deseados.

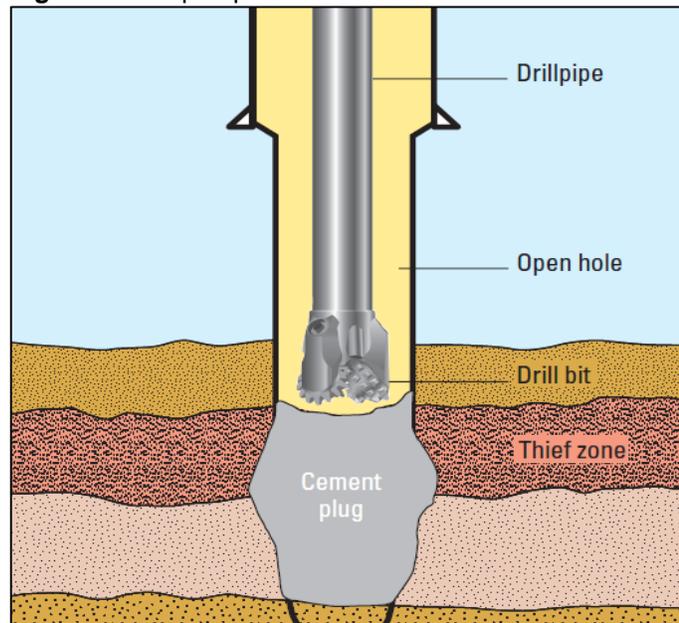
Este problema se puede identificar comparando los caudales de retorno y de bombeo del lodo (cuando el primero es menor al segundo, se puede evidenciar el volumen que se está perdiendo); o monitoreando el nivel de fluido en los tanques.

Usualmente para solucionar este problema se adicionan químicos, materiales contra la pérdida de circulación (LCMs) o fibras; sin embargo, cuando estas técnicas no son efectivas diferentes tipos de tapones de cemento pueden ser bombeados. Después que el cemento ha fraguado, la perforación podrá reanudarse.

Una lechada de cemento diseñada especialmente para la zona de pérdida de circulación se bombea y se ubica a través de ella. A pesar que un pequeño volumen de cemento se perderá en la “zona ladrona”, la lechada se encargará de consolidar la formación en cuestión, como se ve en la **Figura 26**.

²⁵ Schlumberger. Well Cementing. [Print(0)]; Erik B. Nelson; Dominique Guillot ed. Sugar Land, Texas.: 2006. p. 799978-097885300-6503

Figura 26. Tapón para Pérdida de Circulación.



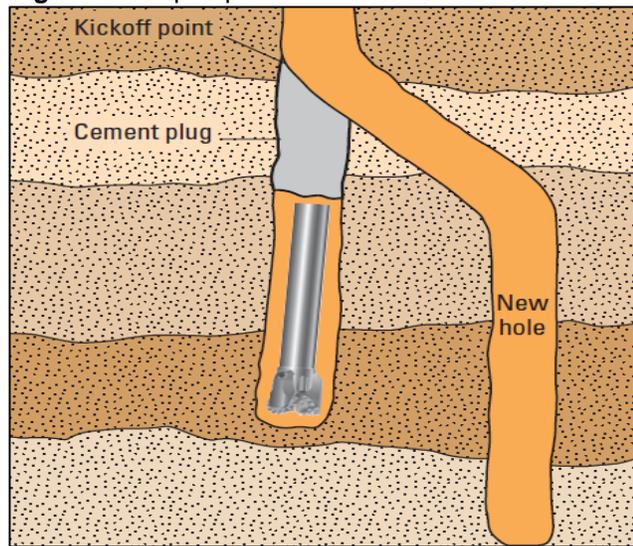
Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Perforación Direccional o Desvío del Pozo "Sidetrack"*. Cuando se requiere abandonar el hueco que se está perforando o se ha perforado anteriormente y abrir paso a uno nuevo, debido a la pérdida de herramientas en el agujero original o problemas que no permitan continuar con la perforación del mismo, se realizan procedimientos de "sidetrack". Cuando se realiza en formaciones poco consolidadas se puede complicar la construcción del ángulo de desvío que permita direccionar el pozo en la dirección e inclinación correcta. **(Figura 27)**

En este caso, se debe bombear un tapón de desvío, también conocido como tapón "kickoff" (hace referencia a la profundidad de desviación del trayecto del nuevo hueco perforado), en la zona correcta con el fin de alcanzar el curso u objetivo deseado. Esto sucede también cuando se tienen "pescados" (herramientas remanentes en fondo de pozo que no son económica o técnicamente recuperables); se bombea el tapón de cemento sobre el "pescado" y se desvía el pozo.

La manera para obtener efectividad con esta técnica es conseguir una fuerza de compresión del cemento usado en el tapón mucho mayor que la de la formación. De esta manera la broca toará como camino preferencial aquel que represente una menor resistencia al ser perforado.

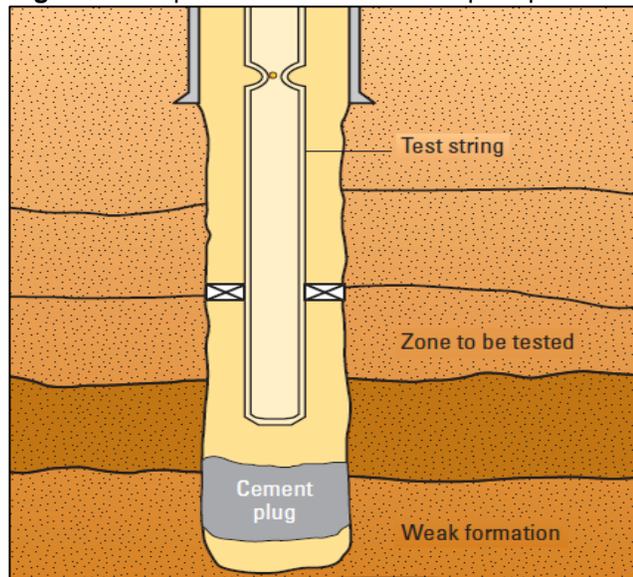
Figura 27. Tapón para “Sidetrack” o Desvío.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Tapón de Protección.* Es utilizado cuando se realizan operaciones de prueba a alta presión en zonas superiores a una zona débil que se quiera proteger en fondo de pozo. Son tapones temporales y se conocen como tapones “test anchor” o ancla de prueba. Lo anterior se puede ver en la **Figura 28**.

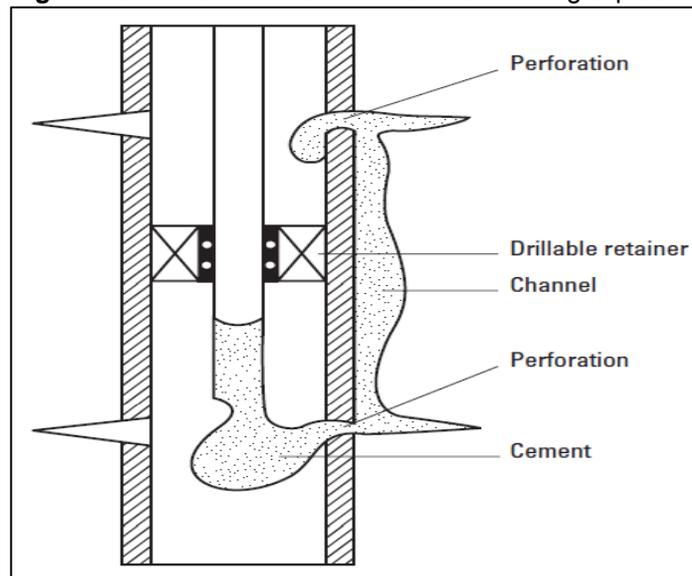
Figura 28. Tapón ubicado como ancla para prueba.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- “*Circulating Squeeze*” o *Forzamiento Circulante*. El forzamiento circulante, ilustrado en la **Figura 29**, consiste en bombear un intervalo de fluidos compuesto, en primera mano, por un lavador, para evitar contaminación, y después por la lechada de cemento. Estos fluidos se hacen circular entre dos perforaciones distantes entre sí, con el fin de cementar una zona que en la cementación primaria quedó libre de cemento. Debe asegurarse una exposición mínima de la tubería al cemento ya que existe el riesgo de que este se cimente y el revestimiento quede atascado, afectando la producción o inyección del pozo.

Figura 29. Forzamiento Circulante o “Circulating Squeeze”.



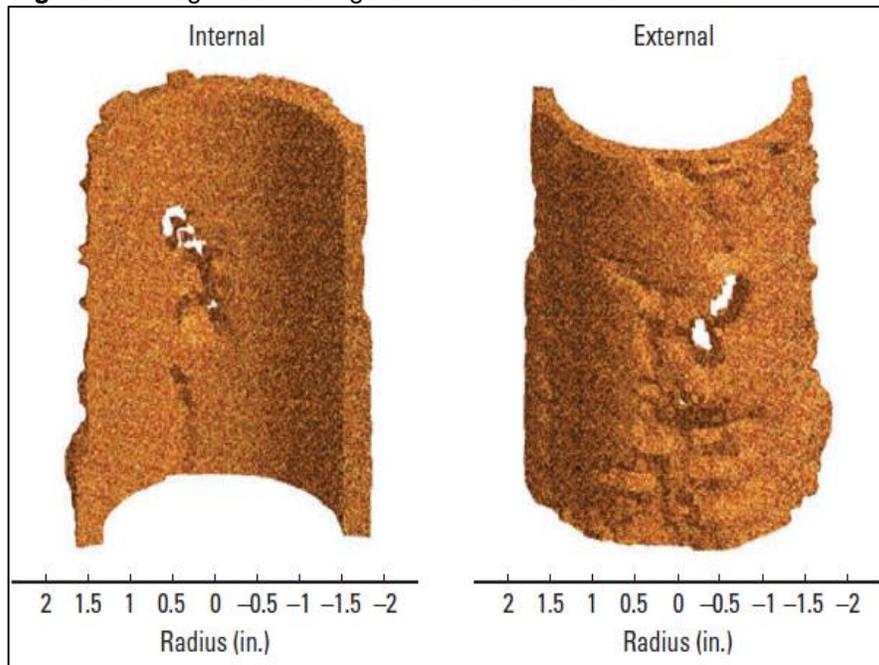
Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- “*Block Squeeze*” o *Forzamiento en Bloque*. Este es un método para prevenir la migración de fluidos en zonas superiores o inferiores a la productora, en lugares donde el registro de adhesión muestra un bajo aislamiento zonal. Este procedimiento consiste en perforar e inyectar cemento a presión a la zona permeable por encima y debajo de la de interés. El cemento restante en la zona de producción es re-perforado y se cañonea la zona para su producción. Este método ha mostrado resultados eficientes al evitar conificación de agua en los pozos.
- *Producción e Inyección*. En un pozo que presenta aislamiento zonal ineficiente entre la tubería y la formación, o cambios en la naturaleza de la producción o inyección del pozo, ligado a la necesidad de realizar trabajos de cementación remedial; se pueden presentar numerosos tipos de problemas, los cuales serán mencionados a continuación.

- *Antes de Tratamientos de Estimulación.* Cuando por medio de los registros de evaluación del cemento se evidencia un bajo aislamiento zonal, y se está planeando realizar un tratamiento de estimulación en el pozo, se debe realizar un trabajo de cementación remedial. Esto debido a que se debe asegurar que no existan fugas detrás del revestimiento para que los fluidos de tratamiento entren, como es debido, únicamente a la zona objetivo.
- *Presión de Revestimiento Mantenido.* Una señal de la existencia de un pobre aislamiento zonal en un pozo productor es que este muestre valores de presión de revestimiento en superficie. En estos casos, tratamientos remediales son necesarios. La zona productora de gas donde se evidencia la fuga debe ser ubicada por diferentes métodos para conocer el lugar exacto donde debe repararse el trabajo de cementación.
- *Fugas en el Revestimiento y Empaques.* Las salmueras o gases ácidos que migran desde la formación hacia la tubería causan corrosión en las tuberías de los pozos productores, como se puede ver en la **Figura 30**.

Estas fugas también pueden aparecer en los empaques, y en ambos casos se pueden producir problemas como flujo cruzado, producción de fluidos no deseados o pérdida de producción hacia otras zonas. Bajo estas circunstancias el tratamiento más adecuado es el bombeo de tapones de cemento.

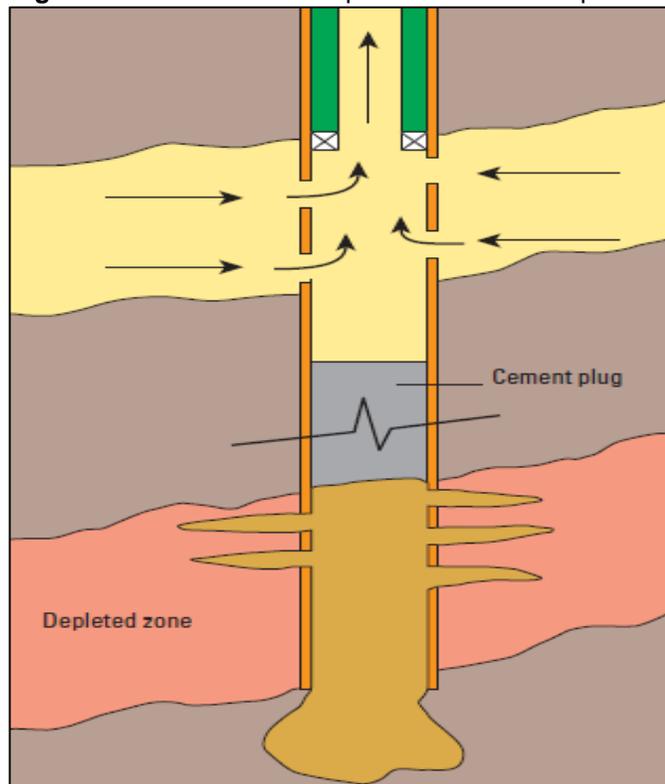
Figura 30. Imagen de una fuga en un revestimiento.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Control de Producción e Inyección.* La producción excesiva de agua provoca el desplazamiento del contacto agua/petróleo, esto trae consigo influjos o invasión de agua o gas en una zona productora de petróleo. Así mismo al momento de realizar procedimientos de inyección de agua o vapor, se incurre en diferentes problemas que pueden ser controlados por medio de trabajos de cementación remedial como los son la comunicación, las fisuras naturales o fracturas detrás del revestimiento, los canales o fracturas inducidos o el agotamiento de la producción. Un ejemplo de ello se ve en la **Figura 31**.

Figura 31. Bombeo de un tapón en una zona depletada.

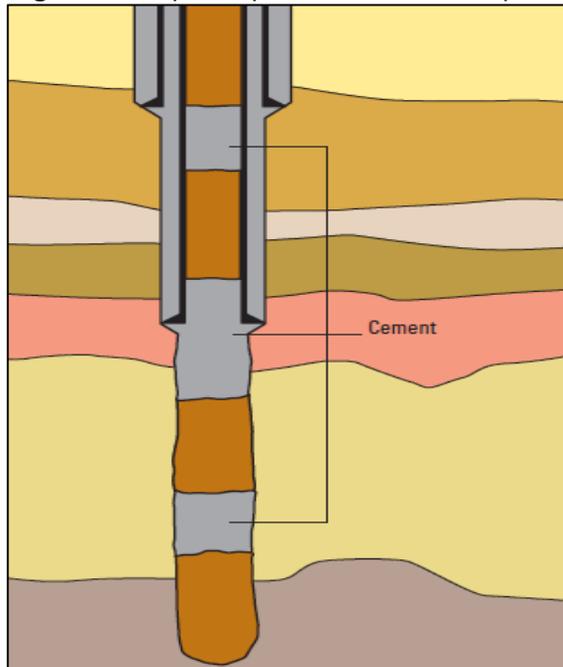


Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Abandono de Pozos.* El procedimiento comúnmente usado para realizar el abandono de un pozo es el bombeo de varios tapones de cemento a diferentes profundidades, lo que previene la comunicación interzonal y la migración de fluidos que pueden contaminar las fuentes de agua fresca en el subsuelo (**Figura 32**). El principal objetivo de estos trabajos remediales es restaurar la integridad natural de las formaciones o sección de subsuelo que sufrió afectación durante la perforación del pozo.²⁶

²⁶ Schlumberger. Well Cementing. Erik B. Nelson; Dominique Guillot ed. Sugar Land, Texas.: 2006. p. 799978-097885300-6505-512.

Figura 32. Tapones para el abandono de pozo.



Fuente: Well Cementing Second Edition.
Schlumberger. 2006.

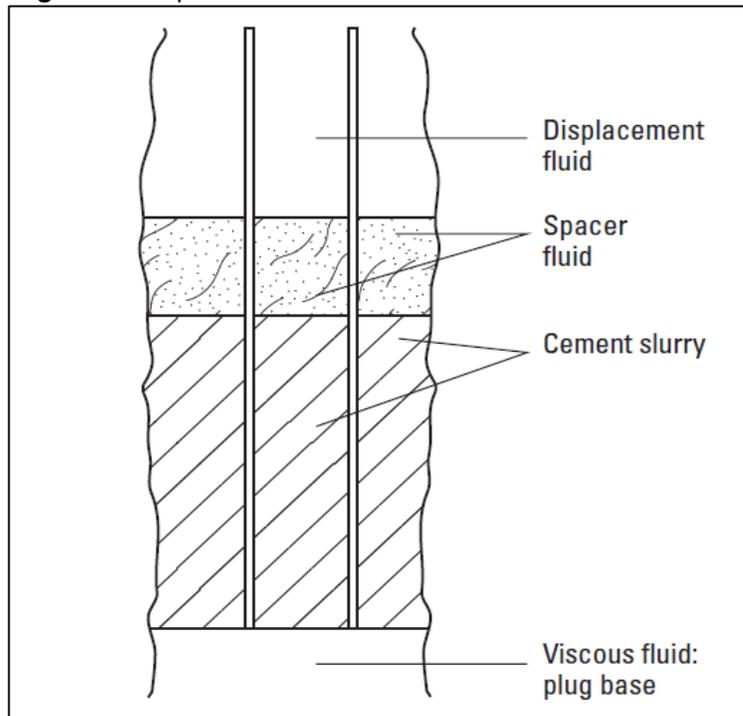
2.2.2 Herramientas y Técnicas de la Cementación por Tapones. Este procedimiento requiere de tiempos prolongados de taladro debido a que amerita numerosos viajes para correr la sarta de tubería. Las lechadas utilizadas en los tapones de cemento no deben presentar sedimentación o agua libre y el tiempo de fragüe debe ser suficientemente largo para permitir la limpieza de la sarta antes del posicionamiento del cemento.

En el procedimiento para la realización de tapones de cemento, buscando garantizar una eficiencia total ya que esta operación de corrección define la utilidad del pozo, se utilizan varias herramientas y técnicas según Schlumberger (2006), las cuales serán descritas a continuación.

- **Tapón Balanceado.** Como se muestra en la **Figura 33**, la tubería se corre dentro del hueco hasta la profundidad a la cual se desee sentar la base del tapón. El volumen de lechada que debe utilizarse debe ser previamente diseñado y mezclado para que alcance las alturas requeridas tanto en el anular como dentro de la tubería, a esto, junto al proceso de bombear la lechada con las propiedades necesarias y ubicarla según el diseño dentro del hueco, se le denomina balancear el tapón.

Después de ser balanceado el tapón, se retira lentamente la tubería hasta una profundidad superior a la que se sentó el tapón. Uno de los principales problemas de esta operación es la contaminación de fluidos tanto por el lodo de perforación como los fluidos que migran desde las formaciones o por la filtración de la lechada a zonas no deseadas. Para esto se deben bombear lavadores en las secciones superiores e inferiores a la de interés y se deben utilizar fluidos con fuerzas de gel altas en la base del diseño.

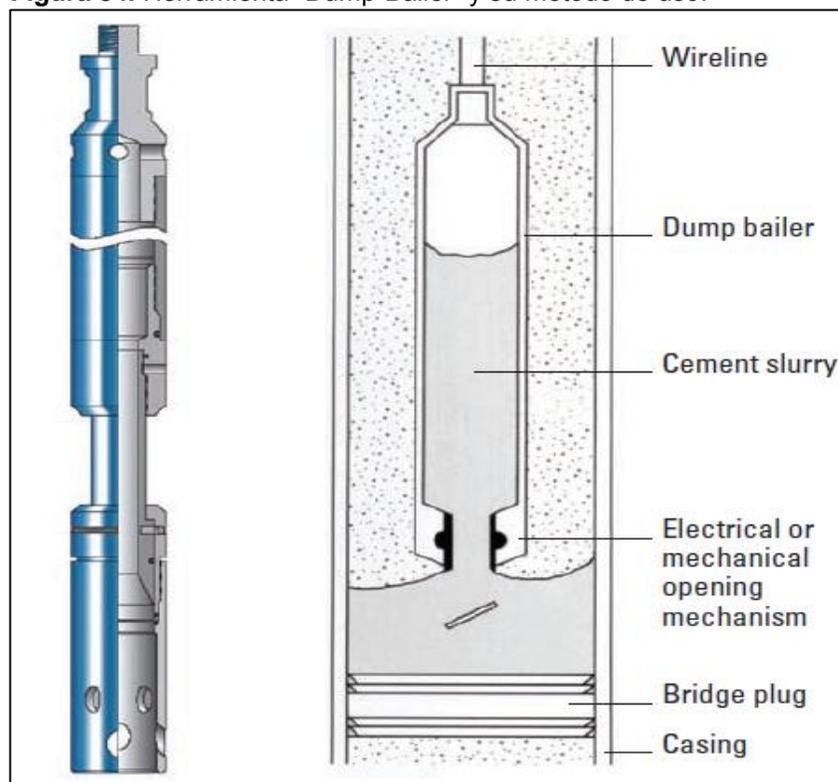
Figura 33. Tapón Balanceado.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Cubeta Vertedora o "Dump Bailer"*. Es una vasija que se baja al pozo con un cable y que cuando llega a la profundidad de un tapón previamente sentado bajo el intervalo en el cual se desea realizar la cementación remedial, se abre liberando una cantidad de lechada de cemento cuantificada, la cual se posiciona sobre el tapón de puenteo ubicado en el hueco como se ve en la **Figura 34**. Son usualmente usados en la cementación por tapones a profundidades someras, o en el caso de profundidades mayores puede utilizarse siempre y cuando la lechada de cemento esté debidamente preparada con aditivos retardantes para evitar problemas durante el proceso. Es un procedimiento económico, pero el volumen de lechada que se puede emplazar en el pozo se ve limitado a la capacidad de la herramienta, sin embargo, se pueden realizar varias corridas de la misma.

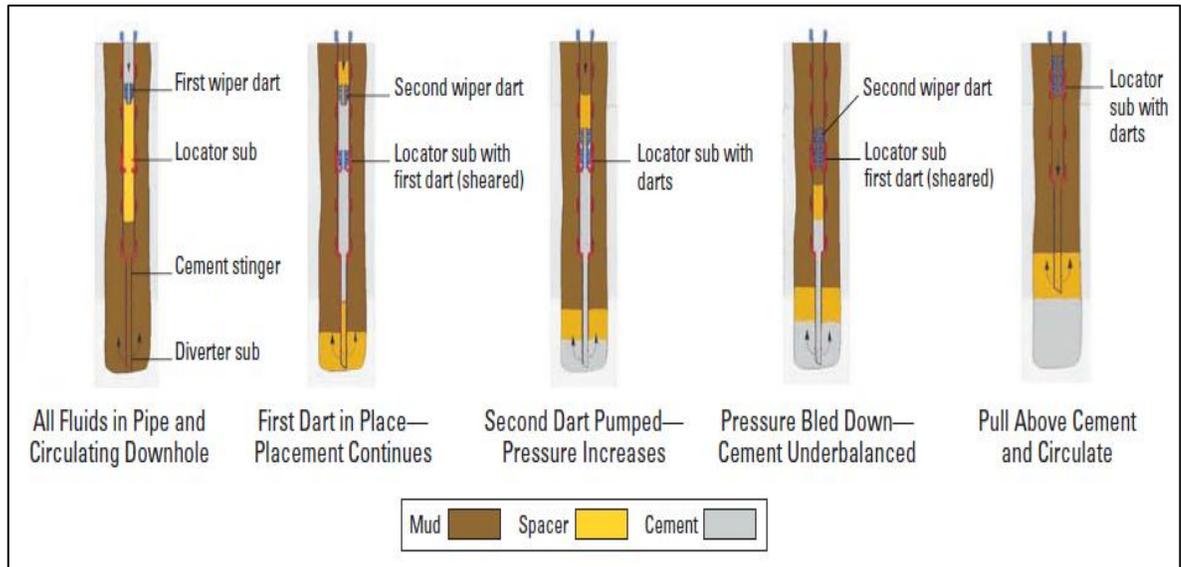
Figura 34. Herramienta "Dump-Bailer" y su método de uso.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Método de Dos Tapones.* Este método, utiliza una herramienta especial para sentar un tapón de cemento a una profundidad calculada con la mayor precisión posible y la menor contaminación de cemento. El procedimiento incluye los siguientes pasos (**Figura 35**):
 1. El tapón de fondo es bombeado antes de la lechada de cemento para limpiar la pared de la tubería y aislar el cemento del lodo.
 2. El pasador de seguridad que conecta el dardo al tapón se rompe cuando se incrementa la presión de bombeo y se bombea por el tubo de escape de aluminio de la herramienta.
 3. El tapón superior es bombeado después de la lechada de cemento para prevenir la contaminación con el fluido de desplazamiento. La presión en superficie aumenta cuando el tapón llega a la profundidad deseada.
 4. La tubería se saca mientras que la punta del tubo de escape alcanza la profundidad calculada para el tope del tapón de cemento.
 5. El pasador de seguridad entre el cuerpo del colector y la manga se rompe, permitiendo que la manga se deslice y abra el camino de circulación inversa.
 6. El exceso de cemento es entonces circulado desde el hueco.

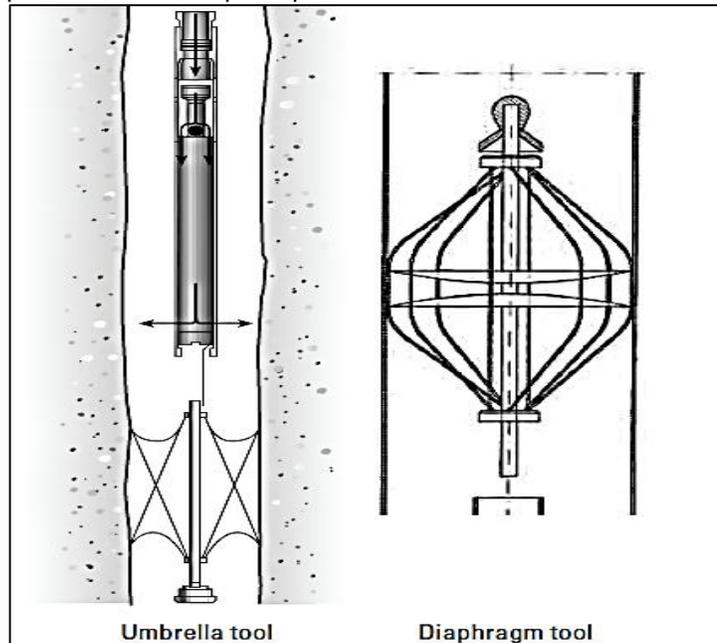
Figura 35. Método de Dos Tapones.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Empaques Inflables.* Es una herramienta que provee una barrera mecánica sólida en el agujero. Cuando la herramienta alcanza la localización objetivo, el empaque inflable se llena con una lechada de cemento y se expande con el fin de crear un soporte mecánico.

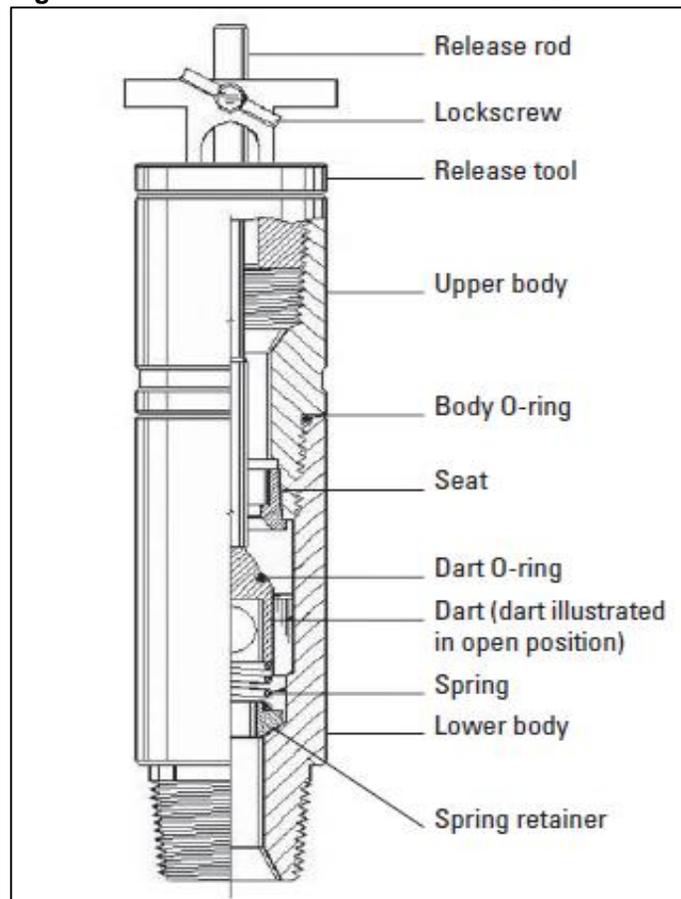
Figura 36. Herramienta en forma de sombrilla y de diafragma para cementación por tapones balanceados.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Membranas forma de Sombrilla*. Esta herramienta es desplegada bajo el tapón de cemento para asistir el emplazamiento de tapones balanceados. Después de desplegarla, mantiene la lechada de cemento separada del fluido de perforación que se encuentra debajo (**Figura 36**). Se debe tener en cuenta que ésta herramienta no es una barrera hidráulica y no se puede usar para controlar pérdidas de fluidos en zonas inferiores del pozo. Existe otra herramienta de diafragma que se expande cuando es bombeada como un tapón al fondo del pozo y que tiene como función principal prevenir la mezcla de los dos fluidos al hacer su emplazamiento e intercambio.
- *Preventor de Reventón Interno*. Es una herramienta que se inserta en la tubería de perforación cerca al piso del taladro cuando la tubería es ubicada por encima del tapón de cemento (**Figura 37**). Se corre con el objetivo de evitar contra-flujo en situaciones cuando, debido a un diferencial de densidad bajo, es difícil balancear el tapón. Esta herramienta se activa desde superficie.²⁷

Figura 37. Preventor de Reventón Interno o "IBOP".



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

²⁷ Ibid. P. 512-515.

2.2.3 Herramientas y Técnicas de la Cementación Forzada. Existe una clasificación tradicional y fundamental para la cementación forzada. La primera es el forzamiento a baja presión, en la cual la presión de fondo es mantenida por debajo de la presión de fractura de la formación y la segunda es el forzamiento a alta presión, el cual consiste en que la presión de fondo exceda la presión de fractura de la formación. Estos son explicados a continuación.

- *Forzamiento a Baja Presión.* El control preciso de la presión de bombeo y la presión hidrostática de la columna de cemento es esencial porque una presión excesiva puede resultar en un colapso de la formación. En los forzamientos a baja presión es esencial que los perforados y canales sean completamente limpiados del lodo u otros sólidos.

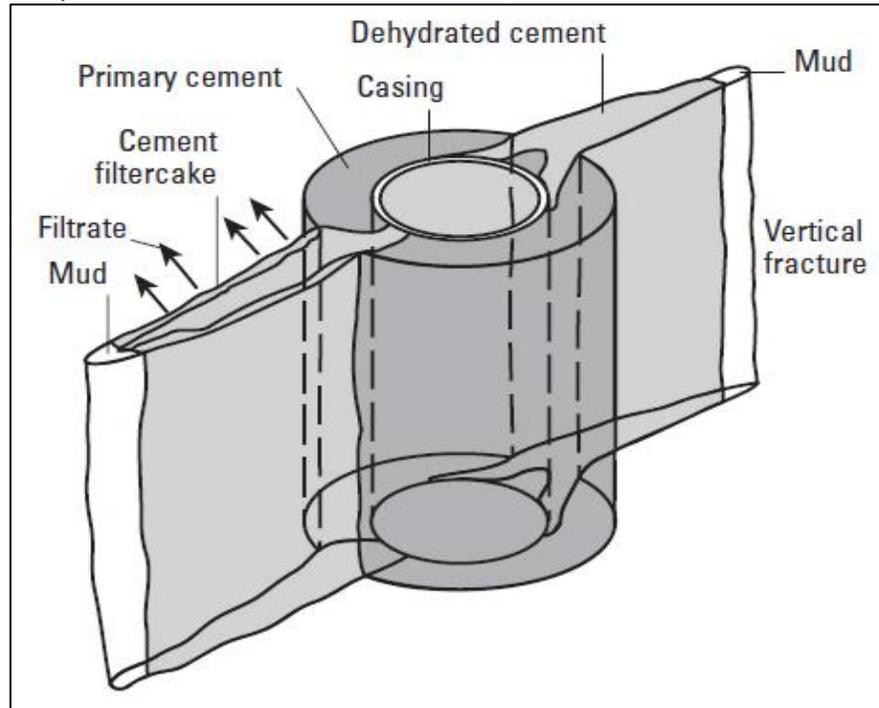
Si el pozo ha estado en producción, probablemente estos orificios ya estén libres de obstrucciones; sin embargo, se debe garantizar una limpieza total de los perforados antes de realizar una operación de forzamiento. Esta técnica es la que tiene mayor éxito y según la literatura es la que debería ser mayormente practicada en las operaciones.

- *Forzamiento a Alta Presión.* En algunas ocasiones, un forzamiento a baja presión puede no cumplir con los objetivos requeridos. Los canales detrás del revestimiento pueden no estar conectadas directamente con los perforados. Pequeñas fracturas o micro-anillos que pueden dar vía libre a la migración de gas o no permitir el paso de una lechada de cemento. Es por esto que un desplazamiento efectivo de una lechada de cemento se logra por medio del fracturamiento de la formación en/o cerca de los perforados (**Figura 38**).

Por otra parte, la localización y orientación de las fracturas creadas en este procedimiento no pueden ser controladas. A diferencia de la extensión de las mismas, que depende de la tasa de bombeo aplicada después de que la fractura ha iniciado. Entra mayor longitud tenga la fractura, mayor volumen de cemento será requerido para llenarla.²⁸

²⁸ Schlumberger. Well Cementing. Erik B. Nelson; Dominique Guillot ed. Sugar Land, Texas.: 2006. p. 799978-097885300-6525-527.

Figura 38. Fractura vertical creada por un procedimiento de forzamiento a alta presión.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

2.3 EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE CEMENTACIÓN

La evaluación del trabajo de cementación es un proceso que determina si los objetivos han sido cumplidos después de haber cementado un pozo o una sección de éste. Los propósitos de la cementación, varían según el revestimiento que se esté soportando. Para un revestimiento conductor, el propósito principal es prevenir la erosión de la formación debida a la circulación de los fluidos de perforación fuera de la tubería.

El revestimiento de superficie debe ser cementado para sellar y proteger las fuentes de agua natural en el subsuelo y para soportar el peso de la sarta de tubería más profunda. El revestimiento intermedio se cementa para sellar formaciones sobre presionadas, aislar formaciones que no son de interés en la operación y zonas de pérdida de circulación. Y finalmente el revestimiento de producción se cementa para prevenir la migración de fluidos al anular y para garantizar el aislamiento zonal.

Adicionalmente, el cemento provee protección contra la corrosión a toda la tubería. En la cementación remedial, como ya se ha explicado, los objetivos principales son

mejorar la calidad de un trabajo de cementación primaria, sellar los perforados en un pozo, reparar fugas en el revestimiento y aislar capas productivas.

Es por esto que es de crucial importancia evaluar la calidad de un trabajo de cementación. Según Schlumberger (2006), existen diferentes técnicas disponibles para realizar esta evaluación: pruebas hidráulicas; métodos no destructivos como registros de temperatura, ruido y nucleares; y registros de cemento acústicos, sónicos y ultrasónicos. Los principales utilizados en la industria son explicados a continuación.

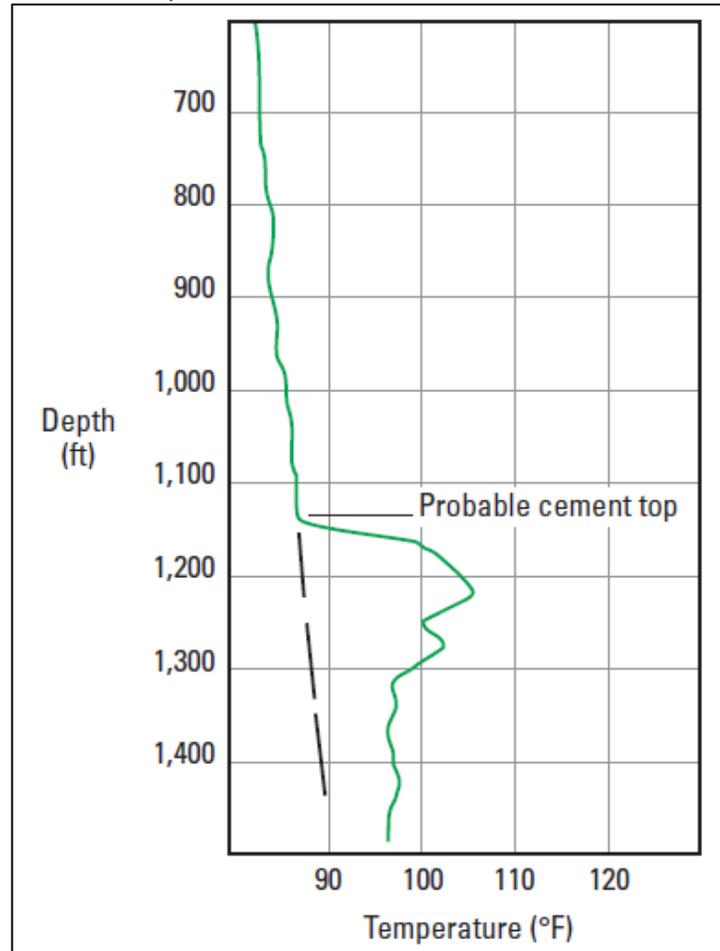
2.3.1 Pruebas de Presión. Es el método de prueba hidráulica más utilizado. Normalmente se ejecuta posterior a la cementación de los revestimientos de superficie o intermedio. Para realizar esta prueba, previamente se debe haber verificado la integridad mecánica de la tubería por medio de una prueba de presión a la misma, la cual debe realizarse después de bombear el tapón de superficie para evitar afectar el set de cemento o la adherencia entre este y la tubería.

Después de que el cemento ha adquirido el esfuerzo compresivo para el cual fue diseñado, se re-perfora el zapato y se aumenta la presión del revestimiento hasta que exceda la presión que será aplicada en este mismo punto durante la siguiente fase de perforación. Si el zapato del revestimiento no soporta la presión aplicada durante la prueba significa que hay una cementación ineficiente y se requerirá de una operación de cementación remedial.

2.3.2 Registro de Temperatura. Son comúnmente usados para detectar la ubicación del tope de la columna de cemento en el anular, también son útiles para detectar fugas o canales. Para este fin se usan fibras ópticas localizándolas en el anular a través de una línea de control o dentro de la tubería. La temperatura se registra contra tiempo y profundidad. Estas medidas proveen información importante relacionada con el emplazamiento del cemento.

Estos registros pueden utilizarse también para detectar cemento en el anular después de un tiempo prolongado de haberlo bombeado. La reacción exotérmica que ocurre durante la hidratación del cemento incrementa la temperatura, provocando una desviación del gradiente de temperatura normal. La **Figura 39** muestra una curva típica de temperatura registrada después de un trabajo de cementación primaria. Cuando estas medidas se combinan con el tamaño del hueco, los cálculos volumétricos pueden determinar la eficiencia de desplazamiento del cemento.

Figura 39. Perfil de temperatura posterior a la operación de cementación primaria.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

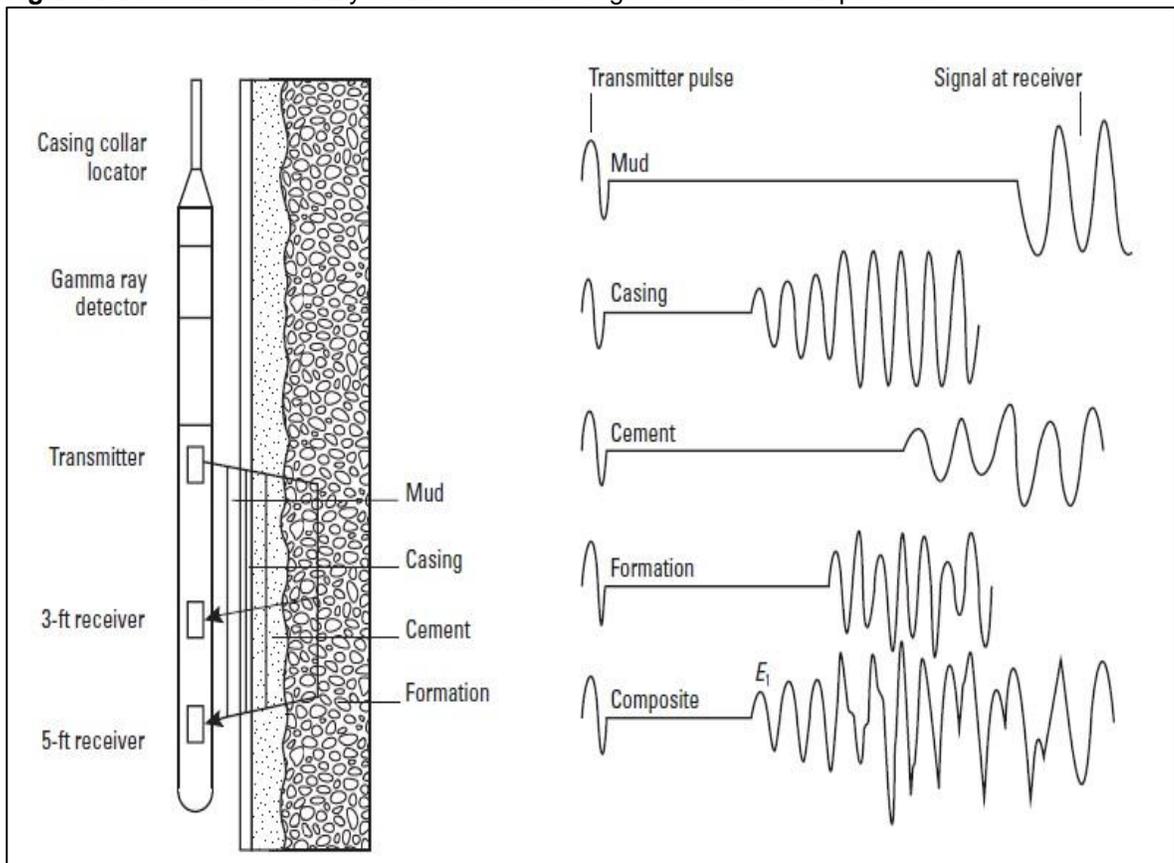
2.3.3 Registro de Ruido. Eventos como el flujo de fluidos (agua, gas, o aceite) detrás de la tubería, la entrada de fluidos al pozo, o la comunicación entre dos zonas con diferentes presiones de poro produce un sonido característico que puede ser detectado por una herramienta que analiza el espectro de frecuencia y la amplitud del ruido y permite localizar e identificar de qué fluido se trata. Adicionalmente, este registro otorga información concerniente a la magnitud del problema de comunicación de zonas más precisa que un registro de temperatura. Este registro es una serie de medidas de ruido estacionarias, ya que es difícil detectar los sonidos relacionados con la formación si la herramienta está en constante movimiento.²⁹

²⁹ Schlumberger. Well Cementing. Erik B. Nelson; Dominique Guillot ed. Sugar Land, Texas.: 2006. p. 799978-097885300-6.

2.3.4 Registro de Adherencia del Cemento. Según Smolen (1996), la herramienta para la toma de este registro está compuesta por un transmisor acústico omnidireccional y dos receptores ubicados uno a tres pies y el otro a cinco pies del transmisor. Esta herramienta debe ser precisamente centralizada y no funciona correctamente si hay presencia de gas o burbujas de gas en el anular. El transmisor funciona en el rango de 15.000 a 30.000 hertz y 15 a 60 pulsos por segundo.

La **Figura 40** muestra una herramienta CBL en el agujero y cómo la señal acústica del transmisor puede llegar al receptor por diferentes caminos. El primero es a través de la herramienta, por lo cual ésta cuenta con accesorios que evitan que esta señal sea detectada durante periodos de tiempo de interés. Para los cuatro caminos restantes, la señal se propaga a través del fluido del anular, el revestimiento, el cemento y la formación. La señal observada en el receptor es la base para la interpretación del registro. Cada camino representa un material diferente que tiene una velocidad acústica única, éstas se presentan en la **Tabla 1**.

Figura 40. Herramienta CBL y señales recibidas según el medio de dispersión.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

El efecto del cemento causa que la energía acústica en el revestimiento se disipe hacia la formación. Esto ocurre debido a que la propagación de la señal acústica se da en forma de onda compresiva a lo largo del revestimiento desde el transmisor hasta el receptor. Un contacto de cemento adecuado, también llamado buena adherencia, provoca que la onda se atenúe hasta que llega al receptor. Si el contacto es pobre o no existe, como en la tubería libre de cemento, la señal se disipa.

Tabla 1. Velocidades acústicas para diferentes materiales.

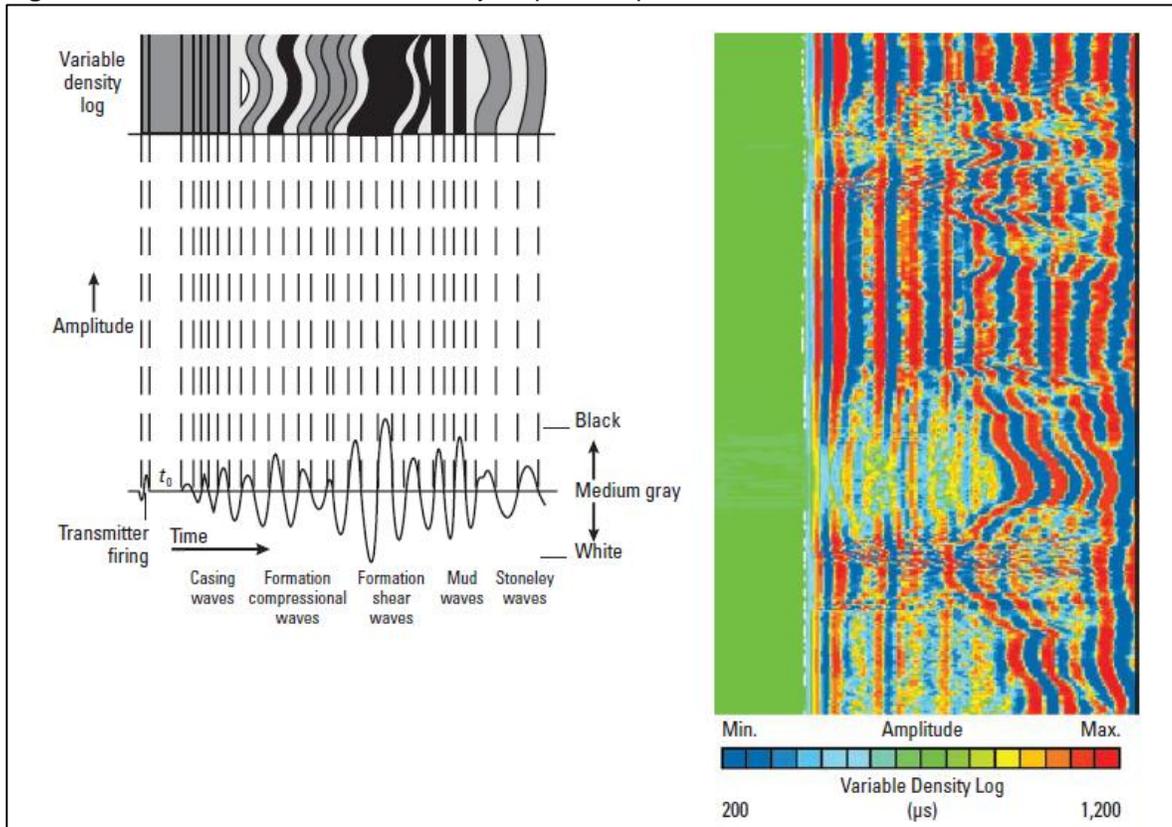
Nonporous Solids	
Material Type	Δt ($\mu\text{s ft}^{-1}$)
Steel (compression wave)	51.4
Plate wave in casing (CBL)	57.0
Dolomite	43.5
Anhydrite	50.0
Limestone	47.6
Calcite	49.7
Quartz	52.9
Gypsum	52.6
Halite	66.6

Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

El efecto que genera una variedad de condiciones en el pozo se puede ver reflejado en el tren de ondas ilustrado en la **Figura 41**. Cuando la tubería está libre de cemento vibra en una magnitud mayor, generando una señal dominante y arribos de formación inexistentes. Esto se debe a la gran impedancia acústica (producto de la densidad por la velocidad acústica). En contraste, una zona con una adherencia buena tiene una señal baja y los arribos de formación son fuertes y claros. Si la tubería está adherida parcialmente, las dos señales podrían verse.

La herramienta CBL consta de tres componentes principales que, en conjunto, brindan lo necesario para realizar una interpretación adecuada de un trabajo de cementación. Estos componentes son explicados a continuación.

Figura 41. Ilustración del tren de ondas y mapa de impedancia.



Fuente: Well Cementing Second Edition. Schlumberger. 2006.

- *Curva de Amplitud.* Es una medida de la amplitud de la señal de tubería en el receptor de tres pies. Cuando el registro de adherencia se corre, el camino acústico desde el transmisor hasta el receptor no debería cambiar. Si el fluido en el pozo, el tamaño, peso y material de la tubería no cambian y si la tubería está centralizada; la señal de tubería debería llegar al mismo tiempo con solamente la amplitud afectada por la presencia de cemento.

Generalmente, las amplitudes más altas están relacionadas con áreas sin cemento o de tubería libre. Las amplitudes más bajas están asociadas a la mejor adherencia. Se expresa en milivoltios y está en una escala de cero a 100 por ciento.

- *Registro de Densidad Variable o VDL.* Se deriva directamente del tren de curvas. Es un mapa de contornos que representa los valores positivos en color negro y los negativos en color blanco. La señal de tubería forma líneas rectas. La señal de formación, por el contrario, debe pasar a través de espesores variables de cemento y formaciones cuyas propiedades acústicas varían según la profundidad. Como resultado, esta señal forma líneas curvas en el mapa.

- *Curva de Tiempo de Transito.* El tiempo de transito es el tiempo que le toma a la señal para viajar desde el transmisor hasta el receptor. Se mide utilizando un nivel de detección de amplitud pre establecida. Cuando el transmisor se pulsa, un reloj inicia a contar y cuando la amplitud es detectada, el reloj se detiene. El tiempo de transito es medido en microsegundos. Esta curva provee una herramienta para monitorear la calidad y calibración del registro de integridad de cemento ya que, en la zona de tubería libre, el tiempo de transito debería tomar una medida de revestimiento que son 57 microsegundos/pie que es la medida de calibración.

2.3.5 Registro Ultrasónico. En esta categoría se identifica la herramienta de adherencia segmentada o STB, la cual está basada en una medida de adherencia por medio de soportes. Se diseña con seis soportes dotados de almohadillas, las cuales se cargan en un brazo centralizado y se retienen contra la pared del pozo durante las operaciones de registro. Cada soporte contiene un transmisor y un receptor acústico. Los soportes se numeran del uno al seis.

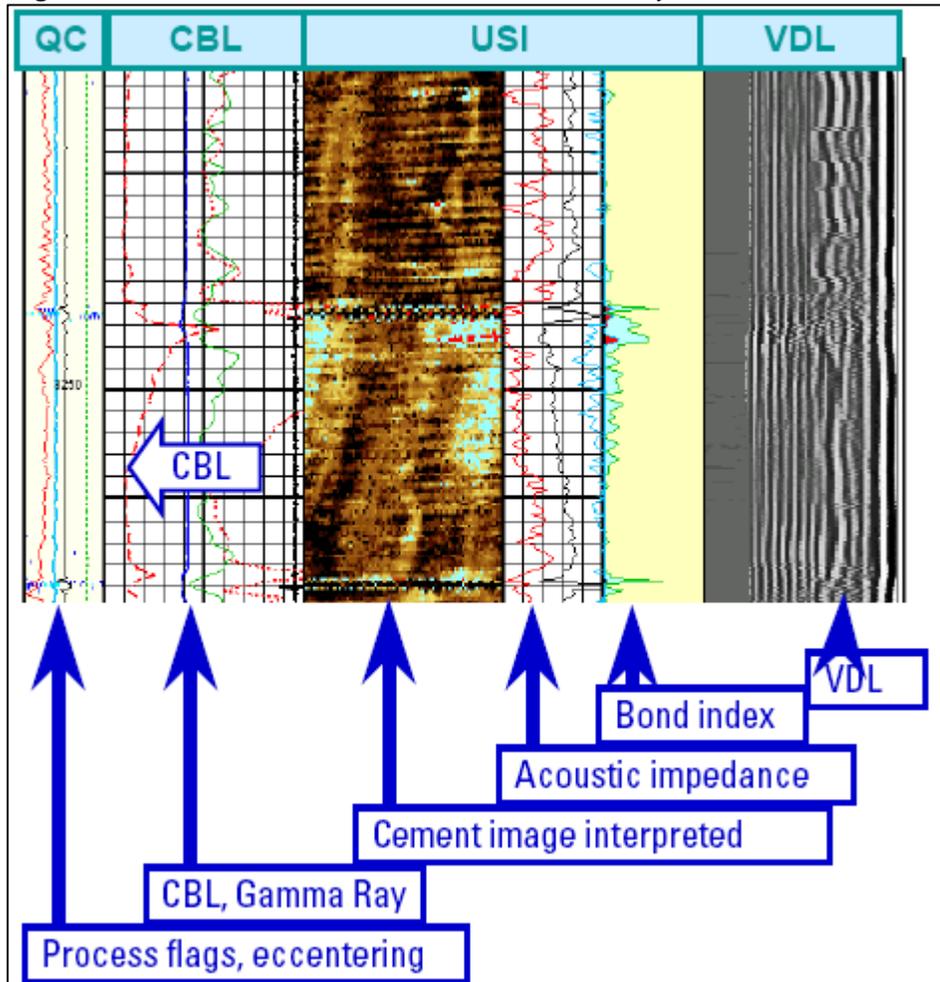
Cuando el transmisor emite una señal acústica, esta se propaga a lo largo de las paredes del revestimiento y es detectada por los receptores de los soportes vecinos. El mecanismo de acción de esta herramienta consiste en generar un mapa del interior del revestimiento, desarrollándolo y sombreando los segmentos cubiertos de cemento en color negro. Este mapa da una vista de cómo quedó distribuido el cemento alrededor de la tubería. Este mapa arroja una gama de colores que permiten identificar los fluidos detrás del revestimiento y la adherencia del cemento al mismo.

El registro STB mide el llenado del anular y reduce la incertidumbre de dónde una baja adherencia aparente es resultado de una fuga de cemento o un pobre llenado del anular. Este registro no se ve afectado por la centralización o la presencia de gas.³⁰

En la **Figura 42**, se puede apreciar un resumen de las curvas arrojadas por los registros explicados anteriormente. Se encuentra una curva para CBL acompañada del registro de rayos gamma. Después se presenta el mapa de un registro ultrasónico, seguido por las curvas de impedancia acústica y índice de adherencia. Por último, se presenta un mapa de impedancias o registro VDL. Estas medidas, en conjunto, permiten evaluar de manera integral el estado del pozo después de una operación de cementación.

³⁰ SMOLEN, James J. Cased Hole and Production Log Evaluation. Penn Well, 1996. p. 380185-189.

Figura 42. Combinación herramienta ultrasónica, CBL y VDL.



Fuente: Crain's Petrophysical Handbook. 2009.

3. CEMENTACIÓN DINAMICA

La vida productiva de un pozo depende en gran magnitud de la cementación del mismo, este proceso es tan crítico que de no resultar exitoso debe ser remediado de inmediato, razón por la cual se incurre en sobre costos y pérdidas de tiempo. Como se mencionó anteriormente, la cementación de un pozo sólo es posible una vez en su vida productiva y con el fin de mitigar los problemas que se pueden presentar en esta operación, alrededor del mundo se utiliza la técnica de cementación dinámica con antecedentes positivos, como se explicará en el presente capítulo, dando cumplimiento al segundo objetivo propuesto para este trabajo.

La técnica de cementación dinámica consiste en rotar, o rotar y reciprocarse el revestimiento en simultáneo, mientras se realiza el bombeo de cemento, lavadores, espaciadores y demás fluidos necesarios para cementar un pozo. La rotación y reciprocación se realizan desde que comienza la operación hasta que el cemento ha sido emplazado en su totalidad, siempre y cuando las condiciones del pozo y el torque lo permitan.³¹

Aunque rotar y reciprocarse durante la cementación de un pozo es incluso recomendado por las reglamentaciones del American Petroleum Institute (API), ésta técnica no es de uso común en la industria, ya que para aplicarla se necesita de herramientas con las que usualmente no se cuenta en los campos donde se realizan operaciones de cementación convencional.³²

Por ende, se deben realizar inversiones considerables para llevar a cabo ésta operación. Los elementos adicionales necesarios para llevar a cabo un trabajo de cementación dinámica son los siguientes:

- Top Drive
- Cabeza Rotativa de Cementación
- Anillos de Torque (opcionales)
- Modelo de Torque y Arrastre.

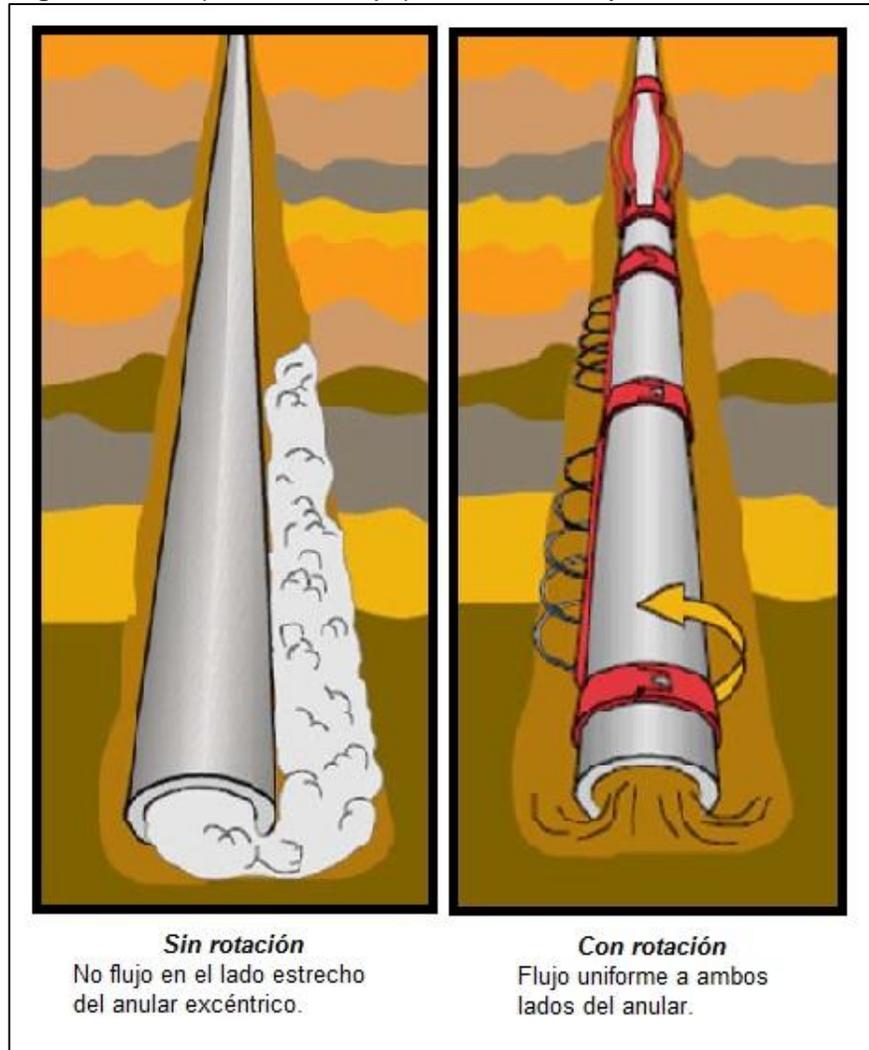
Es decir, que para realizar una operación de cementación dinámica se debe realizar una inversión monetaria adicional comparada con la inversión necesaria para hacer la operación de manera convencional.

³¹ Schlumberger. Manual De Cementación: Introducción a La Cementación. [Print(0)]: p. 69

³²Ibid. P. 2.

Para dar solución a los problemas y limitaciones que se pueden presentar durante una operación de cementación primaria convencional expuestos en el Capítulo 2 del presente trabajo, la cementación dinámica aporta un parámetro de rotación que trae consigo mejoras en el flujo de fluidos a través tanto del espacio anular estrecho como en el amplio, como se muestra en la **Figura 43**.

Figura 43. Comparación de flujo por el anular con y sin rotación.



Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

El efecto observado en la imagen se logra mediante la rotación del revestimiento durante el bombeo de los pre-flujos y el cemento hacia el pozo. La técnica de cementación dinámica aporta numerosas ventajas, gracias a las cuales se logra mejorar la limpieza del pozo y el emplazamiento del cemento.

3.1 VENTAJAS DE LA CEMENTACIÓN DINÁMICA

La técnica de cementación dinámica, como se explicó anteriormente, es una propuesta que pretende alcanzar los mejores resultados de cementación, logrando sellos efectivos y evitando de esa manera trabajos remediales a futuro. Además, alcanzando y cumpliendo sin inconvenientes las exigencias de las empresas para asegurar la integridad del pozo. A continuación, se explican las ventajas que ofrece realizar una operación de cementación dinámica y la forma en que ésta técnica consigue mejorar los resultados de cementación.

3.1.1 Parámetro de Centralización (Standoff) Dinámico. Realizar una operación de cementación con un parámetro de standoff del 100%, no es posible en la práctica. Esto se debe esencialmente a la desviación del pozo y la irregularidad del mismo. Por esta razón, cuando se cementa de forma convencional, el éxito de la operación recae solamente en la reología de los fluidos y la centralización diseñada.³³ Al rotar y/o reciprocarse el revestimiento durante la cementación del pozo, se introduce una condición dinámica que implica variación del parámetro standoff durante toda la operación. Tal condición genera los siguientes beneficios.

- El cambio constante del parámetro standoff le permite a los lavadores y espaciadores fluir tanto por el lado estrecho del anular como por el amplio esencialmente por dos razones. La primera se debe a que introduce una velocidad tangencial³⁴ que permite a los fluidos transportarse de forma circunferencial del espacio de flujo estrecho al amplio y viceversa. La segunda ocurre ya que el espacio anular varía constantemente, lo que momentáneamente permitirá que el tren de pre-flujos pase por el anular en su totalidad, en vez de fluir solo por el lado amplio cuando la tubería se encuentra recostada sobre las paredes del pozo. Tal ventaja, en conjunto con una buena jerarquía reológica de los fluidos, permitirá una limpieza de todo el anular tanto en el lado estrecho como en el amplio, evitando así la contaminación del cemento y las futuras canalizaciones.
- Así como la rotación y/o reciprocación ayudan en la limpieza del pozo previa al bombeo del cemento, lo cual es de gran importancia, esta condición de standoff dinámico también permite que la lechada se distribuya tanto en el lado estrecho del anular como en el amplio, logrando de esta manera mas uniformidad en los topes de cemento.

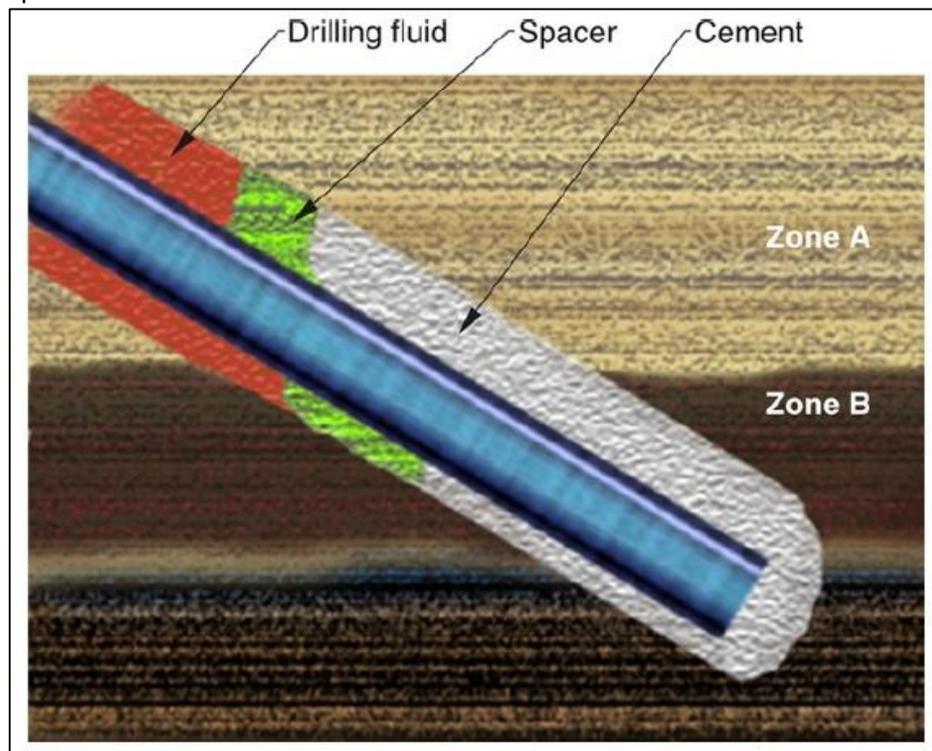
³³ Ibid. Pag 5.

³⁴ MORONI, Nevio, et al. Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 2009. 978-1-55563-261-8

Además, le permite al fluido alcanzar la altura esperada según el diseño de la cementación, el cual establece la cantidad de fluidos que deben ser bombeados con el fin de lograr la disposición de cemento que garantice la integridad del pozo en todo el anular, según los requerimientos de la empresa.

La **Figura 44**, ilustra cómo podría quedar distribuido el cemento en el anular cuando no se aplica rotación durante la operación de cementación. Esta diferencia de altura en el tope de cemento se debe a la dificultad que deben vencer los fluidos para pasar hacia el espacio de flujo estrecho en el anular. En los casos más críticos, el cemento podría fluir únicamente por el lado amplio del anular, como se mostró en la **Figura 43**, en la sección en la que no se aplica rotación al revestimiento.

Figura 44. Disposición irregular del cemento debido problemas en una operación de cementación convencional.



Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

3.1.2 Aumento del Esfuerzo de Corte. Como se explicó anteriormente en el Capítulo dos (2) del presente trabajo, remover el lodo gelificado es esencial para que evitar la contaminación del cemento por fluido remanente en el pozo y de esta manera evitar que se generen canales después del fragüe del cemento. Sin embargo, conseguir esto no es una tarea sencilla.

Para lograrlo, se requiere que el fluido limpiador circulante genere un esfuerzo de corte mayor al requerido para erosionar el lodo en la interface. Por lo tanto, un aumento en el esfuerzo de corte en el espacio anular es clave para obtener un buen desplazamiento del lodo de perforación.³⁵ Esto aplica sobre todo en el caso en el que el fluido de perforación esté gelificado, condición por la cual pierde en gran medida su movilidad.

Después de diferentes investigaciones acerca de los efectos hidráulicos en fondo de pozo cuando se rota la tubería, se han obtenido las siguientes relaciones matemáticas que permiten obtener los valores para los esfuerzos de corte locales y las caídas de presión en el anular.³⁶ Estos parámetros son de gran utilidad para demostrar cómo influye la rotación en la limpieza del pozo previa a la operación de cementación.

- Las velocidades tangenciales deben ser acopladas con las velocidades axiales.

Ecuación 2. Modelo de velocidad acoplada.

$$V_{acoplada} = (V_{axial}^2 + V_{tan}^2)^{0.5} \quad (2)$$

- A partir del modelo de velocidad resultante se obtienen las tasas de esfuerzos de corte locales para poder calcular la variación del esfuerzo de corte en función del azimut alrededor del anular y las propiedades reológicas del fluido de perforación. Las tasas de esfuerzo de corte locales están dadas por:

Ecuación 3. Tasas de cambio de esfuerzos de corte.

$$\gamma_{acoplada} = \frac{dV_{acoplada}}{dr} \quad (3)$$

- A partir de las tasas del esfuerzo de corte (3), se puede obtener esfuerzos de corte locales así:

Ecuación 4. Calculo de esfuerzos de corte locales. O modelo de fluido Herschel-Bulkley.

$$\tau_{acoplada} = \tau_o + K * (\gamma_{acoplada})^n \quad (4)$$

³⁵ Ibid. Pag 2.

³⁶ MORONI, Nevio, et al. Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 2009. 978-1-55563-261-8Pag 2.

Donde:

$V_{acoplada}$: Velocidad acoplada.

V_{axial} : Velocidad axial.

V_{tan} : Velocidad tangencial.

$\gamma_{acoplada}$: Esfuerzo de corte.

$dV_{acoplada}$: Variación del esfuerzo de corte.

dr : Variación del azimut.

$\tau_{acoplada}$: Esfuerzo de corte local.

τ_0 : esfuerzo de cedencia.

n : Índice de comportamiento de flujo.

K : Índice de consistencia

Las caídas de presión anulares son calculadas usando los esfuerzos de cizalla en la pared.

Lo expuesto anteriormente es planteado para un fluido que cumple el modelo de Herschel-Bulkley³⁷, que es un modelo de fluido no-Newtoniano en el cual las tensiones experimentadas por éste, están relacionadas a los esfuerzos generados en un entorno no lineal y complejo.³⁸

3.1.3 Prevención de Migración de Gas. Debido a la pérdida de presión hidrostática que ocurre durante el tiempo que se tarda el cemento en adquirir los esfuerzos compresivos para los cuales fue diseñado, se presenta la migración de gas o fluidos desde el yacimiento hacia el pozo. Este problema provoca la contaminación de la lechada y la generación de canales de flujo. Para dar solución a los efectos generados por esta migración indeseada hacia el anular, la cementación dinámica permite que la lechada esté en movimiento continuo hasta su fragüe, condición que provoca las siguientes ventajas.³⁹

- Retrasa el desarrollo de la generación de fuerzas estáticas de gel en el fluido
- Mantiene y extiende la fuerza de gel el mayor tiempo posible hasta que se fragüe el cemento.
- Contrarresta la reducción continua de presión hidrostática.
- Mantiene baja la permeabilidad del cemento durante la hidratación del mismo.

Gracias a las ventajas expuestas anteriormente, se logra retrasar la formación de los esfuerzos de gel del cemento, minimizando el tiempo de transición de 100 a 500 lb/100pie² de resistencia del cemento, lo cual disminuye el periodo en el que el pozo queda sometido a una baja presión hidrostática en el anular antes de cambiar de estado completamente de líquido a sólido. Por lo tanto, gracias al efecto de esta presión hidrostática, a la formación no le será posible aportar gases o fluidos al

³⁷ Ibid. Pag 1.

³⁸ Empresa Prestadora de Serivicos. Revisión Cementación Casing Intermedio 9 5/8". [Electronic(1)]: 2015d.

³⁹ Schlumberger. Manuel De Cementación: Introducción a La Cementación. [Print(0)]: p. 695

cemento o al anular.⁴⁰ Todo lo explicado debe realizarse con una velocidad de rotación baja, usualmente 10 rpm, es decir una velocidad menor a la de operación.

3.2. RIESGOS

La rotación continua del revestimiento durante la cementación dinámica, puede tener efectos adversos que ponen en riesgo la operación y, en efecto, el pozo. Por lo tanto, tales riesgos son enunciados a continuación con el fin de prevenir problemas operacionales que generan sobre costos y tiempos no productivos, o en el peor de los casos, incluso la pérdida del mismo.

La rotación continua a altas velocidades puede generar derrumbes en el fondo del pozo, sobre todo en zonas inestables. El derrumbamiento en el fondo del pozo puede causar un atascamiento parcial del revestimiento debido a los recortes suspendidos. Tal restricción, generaría un aumento excesivo en el torque que, de exceder la resistencia de la conexión entre los tubos, causaría el colapso de la sarta de tubería, lo cual obligaría a realizar operaciones de pesca para recuperar el pozo. Estas últimas implican tiempo no productivo y por ende sobrecostos.

Por otro lado, estos derrumbes, debido al material que se suspende en el pozo, podrían generar pegas del revestimiento, las cuales impiden el flujo de fluidos por una parte del anular y la rotación de la tubería. Por lo tanto, se requerirá de tiempo no productivo en técnicas adicionales que permitan despegar la tubería para poder moverla, ya sea hacia arriba o hacia abajo.

Reciprocación por su parte es lo que más genera riesgos a la operación de cementación dinámica. Esto ocurre debido a que subir y bajar el revestimiento de forma constante hace más probable un derrumbamiento de las formaciones derivadas de una excesiva presión de suabeo (succión) en el hueco abierto, lo cual podría provocar una obstrucción total del pozo, en ese caso la tubería subiría pero al momento de bajarla nuevamente esta no podría pasar debido a las obstrucciones causadas por la reciprocación, por lo tanto en ese caso se requeriría re perforar la sección para poder cementar el pozo. Por otro lado, el revestimiento podría atascarse por completo en la subida, caso en el cual se requeriría exponer el revestimiento a esfuerzos adicionales para poder desbloquearlo. Es por estas razones principalmente que, para efectos del presente trabajo, no se recomienda realizar reciprocación y rotación en una sola operación.

Una vez se termina la perforación del pozo se recomienda, en lo posible, no generar esfuerzos excesivos. Es por esto que al realizar la técnica de cementación dinámica se es preferible no excederse en la frecuencia de rotación de la tubería y tener cuidado en caso de requerir reciprocación del revestimiento ya que, a pesar de las

⁴⁰ Ibid. Pag 5.

posibles mejoras en los resultados de la cementación que se obtienen, existe un gran riesgo para el pozo, herramientas y maquinaria debido a movimientos excesivos, lo cual generaría sobre costos en tiempos no productivos e incluso materiales adicionales para su recuperación.

3.3 CABEZA ROTATIVA DE CEMENTACIÓN

La cabeza rotativa de cementación es el elemento esencial para realizar un trabajo de cementación dinámica. Su diseño y características permiten que la tubería de revestimiento sea rotada y reciprocada por tiempos prolongados durante el bombeo de la lechada, aditivos y pre-flujos necesarios para la cementación. Sus características y especificaciones son explicadas en el presente capítulo, con el fin de entender el funcionamiento y ventajas de esta herramienta.

3.3.1 Fundamentos de la Tecnología. La tecnología cumple las funciones básicas que cualquier cabeza de cementación podría cumplir, es decir, funciona como conexión de la parte superior del revestimiento, conducto de entrada de lechada y aditivos al pozo, además de almacenamiento y bombeo de las bolas, dardos y tapones de cementación. Sin embargo, posee una característica especial que la hace completamente diferente y con ventajas frente a las cabezas utilizadas durante las operaciones convencionales. Esta característica es un swivel giratorio hermético con conexión a la línea de cementación, que hace posible rotar la tubería de revestimiento por tiempos prolongados mientras se bombea la lechada de cemento, los aditivos y pre-flujos necesarios para el trabajo en cuestión.

3.3.2 Descripción de la Tecnología. La cabeza rotativa de cementación (RCH) funciona conectada a un sistema de Top Drive, para el cual fue diseñada inicialmente. Si bien es relativamente liviana y compacta, tiene el índice más alto de levantamiento/presión en la industria. Además, sus accesorios opcionales le añaden una versatilidad considerable.

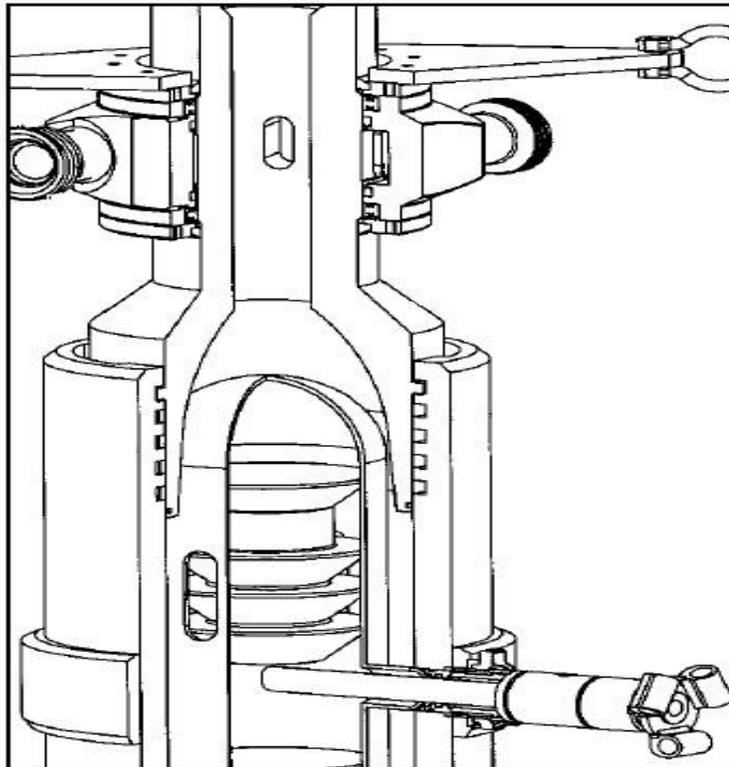
La RCH permite la rotación continua e independiente del revestimiento, además de reciprocación y el bombeo de altos caudales de flujo de cemento simultáneamente. Los tapones de cemento pueden ser cargados antes de la realización del trabajo y lanzados al pozo manualmente o con un pasador manual o remoto. La jaula de tapones posee ranuras por las cuales es posible someter al tapón o dardo de cementación inferior a la presión de flujo, con el fin de garantizar que, al remover el pasador, el tapón baje hacia el pozo.⁴¹

⁴¹ HYBRID TECHNOLOGY. Top drive universal Lipieing Cement Head, operations & maintenance manual. Estados Unidos, San Bernardino CA. P.1

Debido a que es una pieza integral, las capacidades de carga son incrementadas ya sea con carga de gancho o la combinación de gancho/presión. Su construcción sin soldaduras contribuye a la simplicidad, compacidad y ligereza de la misma. Posee un sistema seguro de bloqueo y tiene la habilidad de realizar trabajos con mínimo inventario de piezas usadas ya que lo único que se desensambla es la jaula de tapones.⁴² La cabeza rotativa de cementación utiliza un diseño de flujo que rodea la jaula, esto mantiene el tapón fuera del área de flujo del fluido, como se puede observar en la **Figura 45**. Se pueden utilizar jaulas de tapones de diferentes tamaños, las cuales se seleccionan dependiendo del tamaño del tapón que se va a utilizar. La cabeza es diseñada con una amplia área anular alrededor de la jaula para permitir el flujo a una velocidad razonable.

Las jaulas de tapones utilizan un expulsor elástico ajustable en longitud para asegurar que el tapón superior sea empujado hacia el flujo de fluidos al momento de su lanzamiento. Con el fin de informar el lanzamiento del tapón o dardo, un resorte cargado acciona una palanca que libera una bandera, la cual alerta sobre la salida del mismo.

Figura 45. Corte transversal del cuerpo de la RCH y jaula de tapones.

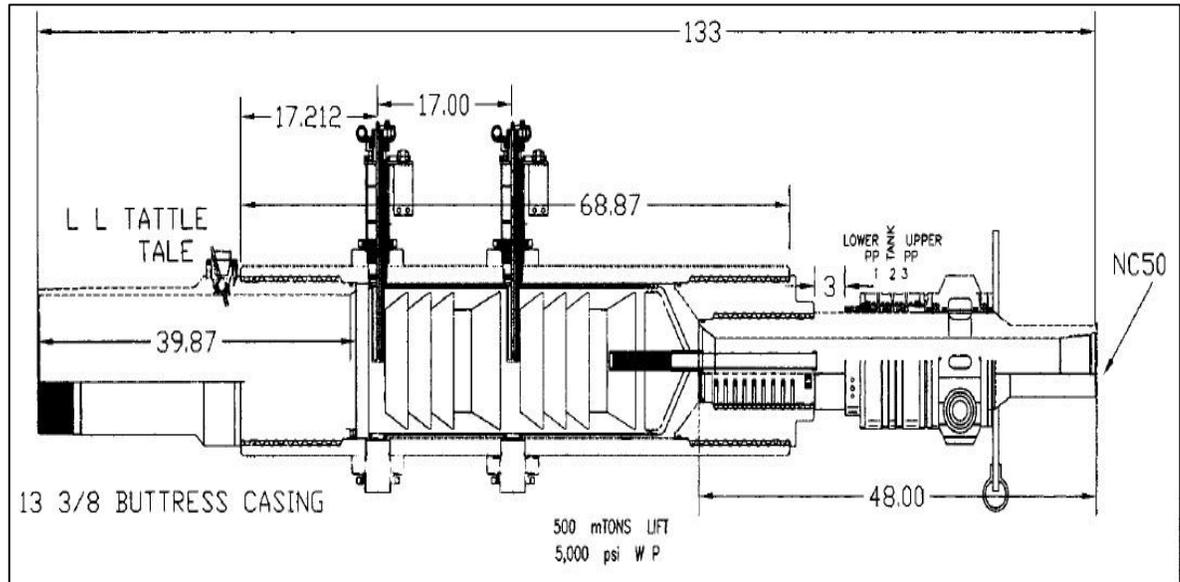


Fuente: Top Drive Universal Lipieing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

⁴² Ibid. Pag 1

3.3.3 Partes y Accesorios. A continuación, se muestran los ensamblajes y partes que componen la RCH, los cuales, en conjunto, hacen posible la realización de una cementación dinámica. El plano general de la herramienta puede verse en la **Figura 46**.

Figura 46. Plano general de la Cabeza Rotativa de Cementación.



Fuente: Top Drive Universal Lipeing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

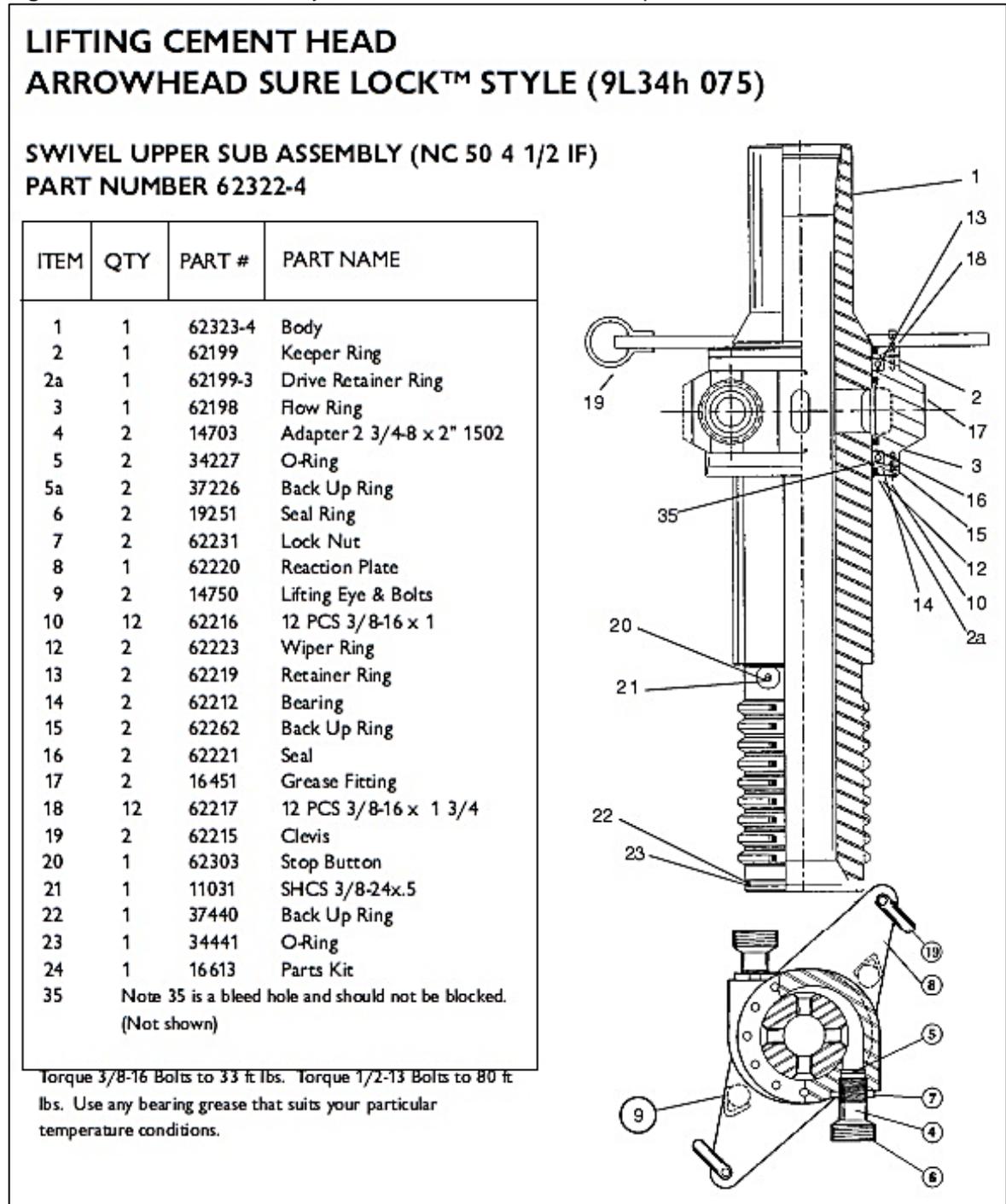
Esta herramienta consta principalmente de tres secciones, las cuales se detallan a continuación, exponiendo sus partes y funcionamiento.

- **Ensamblaje de Swivel.** En la parte superior se encuentra el ensamblaje de Swivel, el cual, para una operación de cementación dinámica, es el elemento más importante, ya que permite la rotación de la tubería de revestimiento simultáneamente con el flujo de cemento a través de la misma. El ensamblaje de este sistema se muestra en la **Figura 47**.

El swivel es un ensamble mecánico sencillo que consta de un rodamiento unido herméticamente al cuerpo de la cabeza de cementación. El rodamiento puede variar su configuración según las necesidades y exigencias del sistema.

Usualmente en su interior contiene balineras, sin embargo, también puede contener rodillos cilíndricos, rodillos cónicos o cilindros esféricos. El objetivo de un rodamiento es reducir la fricción entre un eje y una pieza conectada a este. En este caso el cuerpo de la cabeza de cementación.

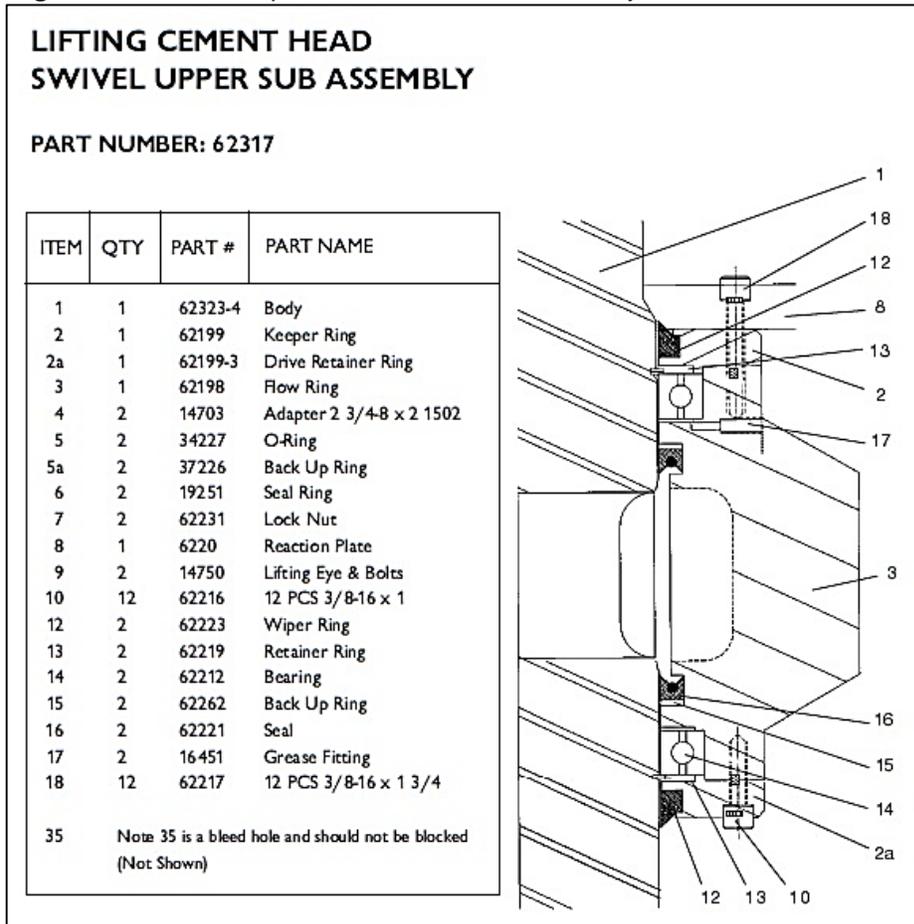
Figura 47. Plano de ensamble del sistema Swivel, sección superior de la herramienta.



Fuente: Top Drive Universal Lifting Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

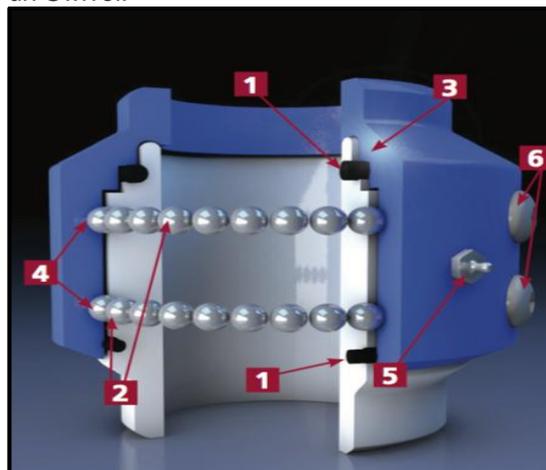
A continuación, en la **Figura 48** y **Figura 49**, se ilustran las partes internas de un swivel.

Figura 48. Unión cuerpo-rodamiento en el ensamble del Swivel.



Fuente: Top Drive Universal Lifting Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

Figura 49. Ilustración de las partes básicas de un Swivel.



Fuente: Swivel Joints Catalog. OPW Engineer Systems. 2010.

Las partes de un swivel mostradas en la **Figura 49** se describen en detalle a continuación.

- (1) *O-Rings*. Estos dispositivos proveen un sello ajustado, sin provocar problemas al funcionamiento del Swivel. Las ranuras en las que se encuentran son hechas de manera muy precisa y con micro-terminados los cuales proveen el mínimo roce durante su funcionamiento.
- (2) *Canaleta de Bolas del Rodamiento*. La parte móvil y el cuerpo se unen y aseguran mediante dos canales con hileras de bolas. Se usan dos canales para asegurar la estabilidad de la unión y la alineación de la misma.
- (3) *Compartimiento Protector del Rodamiento*. El *O-Ring* que se encuentra dentro de éste compartimiento previene la entrada de contaminantes y agentes extraños al Swivel. Además de esto, protege el mecanismo de suciedad y lluvia. Es de gran importancia la lubricación de éstos elementos lo cual será explicado más adelante.
- (4) *Bolas de Larga Duración*. Estas bolas son muy resistentes y fabricadas con alta precisión, en aras de lograr uniformidad en su forma para que giren sin problemas. Usualmente fabricadas en acero.
- (5) *Grasera (entrada de fluido lubricante)*. Mediante este elemento es posible bombear fluidos lubricantes que ayudan a proteger las partes del mecanismo, ya que se ven afectadas por fricción durante largos tiempos de operación. Usualmente estos elementos vienen engrasados de fábrica, sin embargo, es de gran importancia lubricarlos constantemente, lo cual le dará mejor vida útil al mecanismo.
- (6) *Tapones Canaleta*. Las bolas son mantenidas en su lugar desde el momento de fabricación, estos dos elementos las mantienen en su lugar y no deben ser manipulados para no dañar el rendimiento del mecanismo.⁴³
- *Jaula de Tapones*. Más abajo del ensamblaje de Swivel y dentro del cuerpo de la RCH se encuentra la jaula de tapones, la cual posee un sistema cuya función es realizar el lanzamiento de los mismos hacia el fondo del pozo. Este sistema puede variar según el fabricante de la cabeza, para el caso de la presente explicación el sistema de lanzamiento es mediante pines que se retraen permitiendo el paso de los dardos y/o tapones hacia la salida de la jaula en la parte inferior de la misma. Allí, con ayuda del flujo, se dirigen al fondo del pozo. En la **Figura 50** se ilustran las partes del ensamblaje de este accesorio.

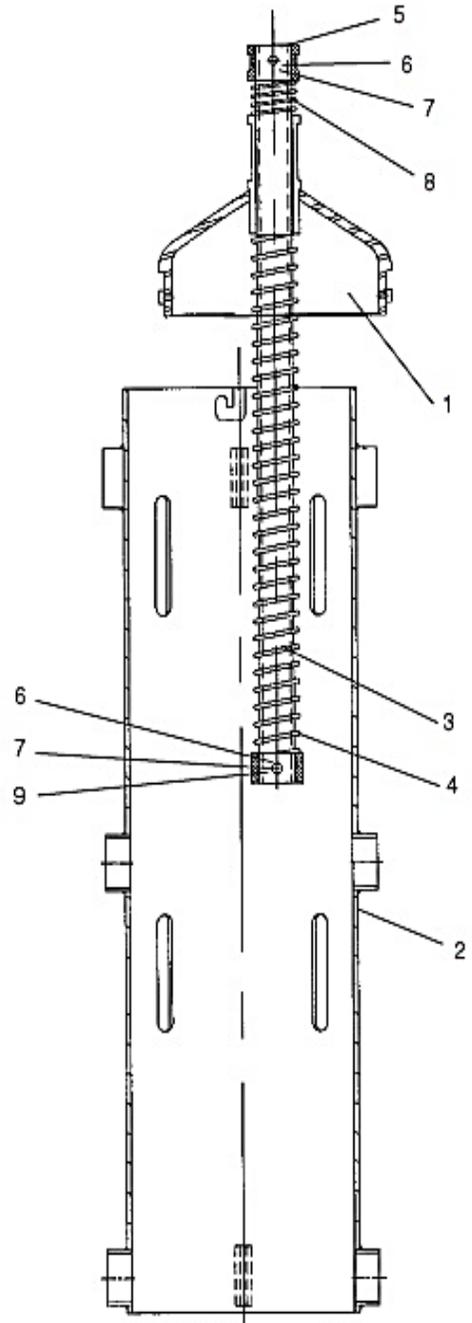
⁴³ OPW engineered systems. Swivel Joints catalog. USA. Lebanon OH.

Figura 50. Plano y ensamble de la jaula de tapones de una Cabeza Rotativa de Cementación.

LIFT FLOW CEMENT HEAD PLUG CAGE

SIZES: 7 9 5/8 13 3/8

ITEM	PART NAME	SIZE	PART NO.
0	Assy	13 3/8	16729-1
		9 5/8	16729-2
		7 in	16729-3
1	Cap	13 3/8	16723
		9 5/8	16639
		7 in	16641
2	Cage	13 3/8	16720
		9 5/8	16721
		7 in	16722
3	Guide Tube		62254
4	Spring (3 ea)		62255
5	Top Collar		62259
6	Cap Screw (2 ea) 5/16x2.25 GR8		62267
7	Lock Nut (2 ea) 5/16		62268
8	Top Spring		62270
9	Bottom Collar		62260



Notes:

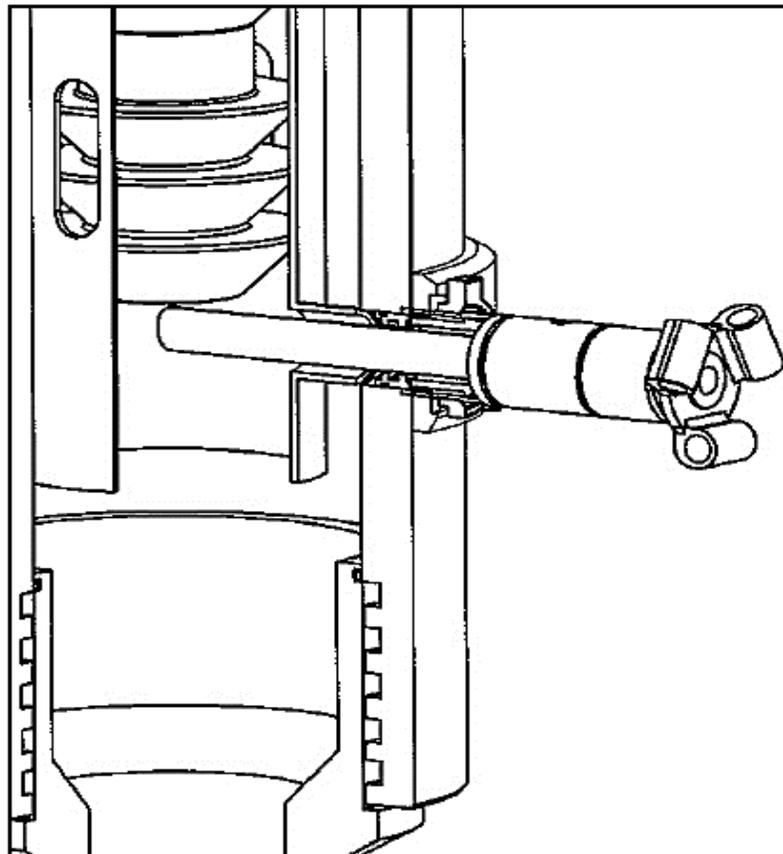
- 1) The cage can be assembled from top or the bottom of the body of the cement head in vertical or horizontal positions.
- 2) Assemble Cage into Head Body. Install Pin Puller and Blanking Plug. Center port of the head with port of the cage. Their lips will hold cage in place.
- 3) Cement Plugs can be loaded from the top or the bottom of the head.

Fuente: Top Drive Universal Lipieing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

Como se observa en la **Figura 50**, la jaula de tapones posee ranuras que permiten que estos sean sometidos a la presión de flujo del paso del fluido alrededor de la jaula, lo cual garantiza que cuando se retire el pin retenedor de los tapones estos avancen y salgan de la misma con el fluido hacia el fondo del pozo cumpliendo su función. En la parte superior del plano se puede observar un resorte (Parte (4)) el cual, al momento de retraer el pin que sostiene el tapón superior ayuda a empujarlo hacia el flujo, asegurando que no se quede atrapado y sea bombeado justo en el momento que se necesita.

Las jaulas de las RCH, aunque cumplen una misma función, que es almacenar y liberar los tapones de cementación, según el fabricante varían su sistema de lanzamiento. Básicamente varían en la manera en que se liberan los tapones de la jaula. Para el caso de esta investigación se tiene una Cabeza Rotativa de Cementación que funciona por medio de pines que pueden ser extraídos de forma manual o remota. A continuación, un corte que muestra el ensamble de un pin pasando por el cuerpo de la RCH y la jaula se ilustra en la **Figura 51**.

Figura 51. Corte de la RCH ilustrando el ensamble del pin liberador.

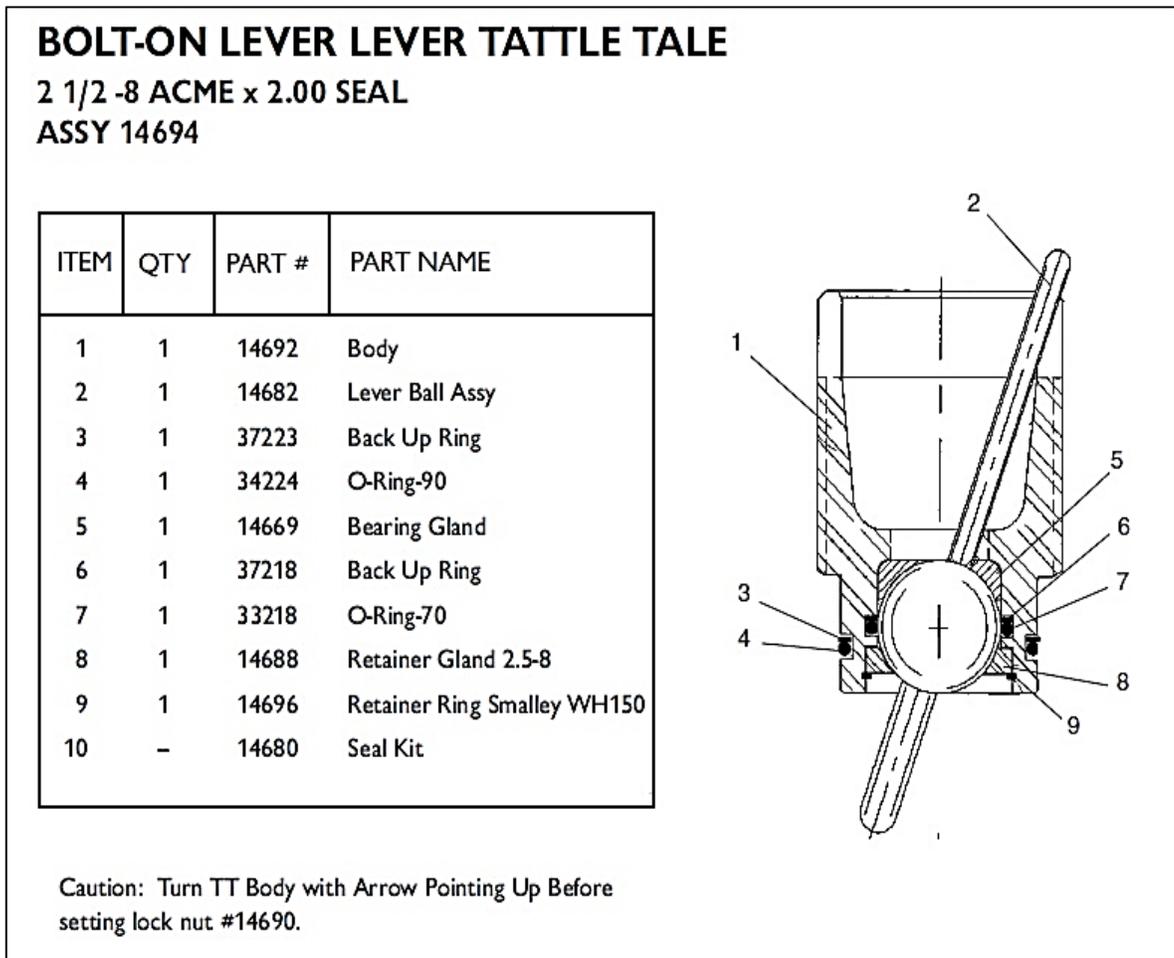


Fuente: Top Drive Universal Lifting Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

- *Sistema de Aviso del Paso de Tapones.* La RCH posee un sistema que avisa el momento en que el tapón de cementación, los dardos, o las bolas pasan efectivamente de la cabeza hacia la tubería y se encaminan hacia el fondo del pozo. Gracias a este sistema se tiene seguridad del bombeo de estos elementos ya que es accionado automáticamente en el momento que estos pasan por la línea para ser bombeados.

Dentro de la cabeza de cementación se encuentra una palanca que al ser accionada por el paso del tapón o dardo libera un brazo cargado con un resorte el cual muestra la bandera fuera de la cabeza. La carrera del brazo es de 3 pulgadas/76mm. La palanca se encuentra montada en una bola que inicialmente indica la posición de la palanca abajo, cuando el tapón pasa el indicador se levanta a su posición arriba. El sistema se ilustra en la **Figura 52**.

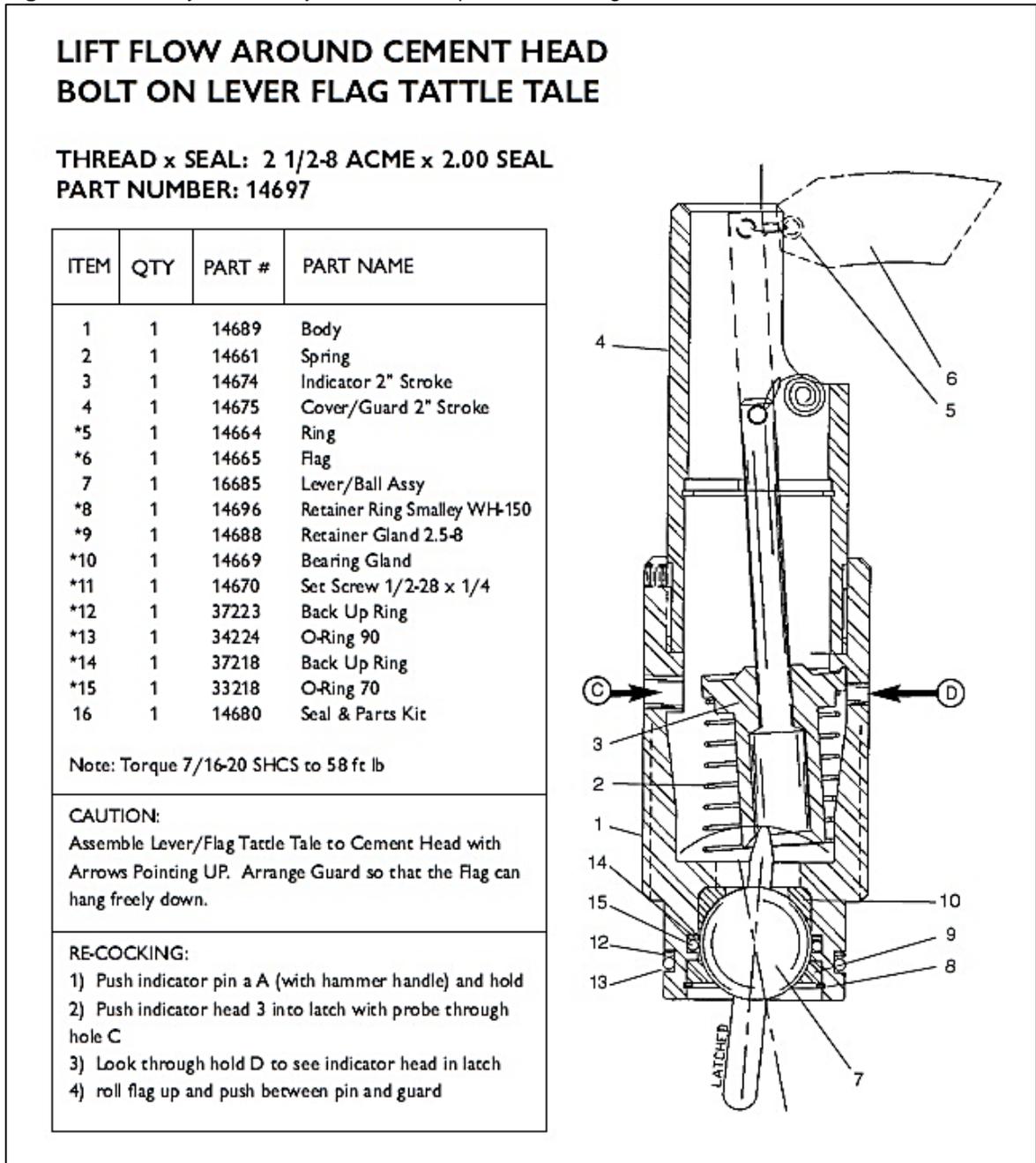
Figura 52. Plano y ensamblaje de testigo de lanzamiento de tapones.



Fuente: Top Drive Universal Lipieing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

En la **Figura 53**, se puede observar el brazo que expulsa la bandera fuera del cuerpo de la RCH, gracias al resorte cargado que se puede observar en el punto número (2). “Spring”.

Figura 53. Plano y ensamblaje del brazo expulsor del testigo.



Fuente: Top Drive Universal Lipieing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

- *Adaptador Inferior y Sistema de Seguros.* Con el fin de conectar la RCH con la tubería de revestimiento para realizar el trabajo de cementación, la herramienta posee un ensamblaje de nueve seguros alineados además de un seguro final que fija el adaptador inferior con el cuerpo de la RCH. Todos los sistemas explicados anteriormente son conectados a un adaptador inferior (crossover), el cual en ésta investigación tiene un diámetro de 9 5/8 pulgadas. Estos seguros tienen como fin asegurar la conexión entre la Cabeza Rotativa de Cementación y la tubería de revestimiento. De esta manera se espera que toda la operación se realice bajo condiciones seguras evitando posibles fugas o incluso que se desensamble el acople, causando graves problemas operacionales. En la **Figura 54** se puede observar el conjunto de anillos de seguridad y el sistema final de acople, cuyo modo operacional será explicado más adelante.

Figura 54. Ensamble del adaptador inferior y el sistema de seguros.

LIFT FLOW AROUND CEMENT HEAD

LOWER ADAPTOR ASSEMBLY (9L 34h 134)

PART NUMBER:

16716	13 3/8 BTC Bottom Adapter
16727	9 5/8 BTC Bottom Adapter
16728	7 inch BTC Bottom Adapter
16717	9 5/8 53lb Vam Bottom Adapter
16718	7 29lb Vam Bottom Adapter

ITEM	QTY	PART #	PART NAME
1	1	—	Bottom Adaptor
2	1	34456	O-Ring
3	1	37455	Back Up Ring
4	2	14747	Lifting Eye and Bolts, 2500 lbs
5	1	14691	Bolt On Housing
6	1	14690	Lock Nut 2 1/2-8 Acme
7	4	14694	Soc Hd Cap Scr 7/16-20x1 3/8
8	1	16699	Button
9	1	11031	SHCS 3/8-24x1/2

Please Note: Tattle Tales Not Included in Assembly

10	1	14694	Bolt on Lever Tattle Tale
----	---	-------	---------------------------

Note: torque 7/16-20 SHCS to 58 ft lb
Caution: Assemble TT Body to Bottom Sub before torqueing SHCS

Fuente: Top Drive Universal Lifting Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

3.3.4 Modo Operacional. Gracias a los componentes y ensamblajes explicados anteriormente, la RCH es capaz de rotar y reciprocarse la tubería de revestimiento mientras se bombean de forma continua los pre-flujos y la lechada de cemento. Todo esto en aras de conseguir un sello hidráulico efectivo entre la formación y el revestimiento. Además de esto, que la herramienta cuente con una jaula de tapones que puede ser pre-cargada antes de iniciar la operación, hace posible bombearlos al fondo del pozo sin interrumpir el bombeo de fluidos. A continuación, se describe el proceso de operación de la herramienta.

- *Carga de Tapones.* Antes de poner en operación la Cabeza Rotativa de Cementación se deben cargar los tapones o dardos que se necesiten bombear para llevar a cabo la operación. Para cargar el primer tapón en la jaula, se debe poner el pin liberador inferior el cual lo sostendrá. Este se enrosca, pasando por el cuerpo de la cabeza hasta llegar a la jaula asegurándose que encaje de forma precisa y del lado opuesto al pin se pone un tapón cuya función es mantener la jaula en posición. Posteriormente se inserta el pin liberador superior de igual manera como se inserta el inferior y se carga el tapón superior.

Los pines tienen una tuerca de seguridad, la cual, después de poner los pines en su posición operacional, debe ser golpeada ligeramente con un martillo para asegurar herméticamente la conexión. Finalmente, se pone en posición la tapa de la jaula y de esta manera se tienen listos los tapones para la operación.

- *Ensamblaje del Swivel Superior.* Una vez han sido cargados los tapones, se puede proceder a enroscar el swivel en la parte superior del cuerpo de la RCH. No se requiere desensamblar el swivel después de cada trabajo que se realice, a menos que se haya observado fugas a través del agujero de purga. En caso de haberse observado fugas, se debe desensamblar el swivel en su totalidad y reemplazar los empaques en su interior. A su vez, se deben limpiar los rodamientos en caso de una posible contaminación debido a la fuga. En el caso que no se presenten fugas después de un trabajo previo, se debe limpiar exhaustivamente todo el ensamblaje mientras se gira. Posteriormente, se deben engrasar las uniones a través de las graseras (entrada de fluido lubricante).

Para este procedimiento, se debe tapar la grasera opuesta con el fin de asegurar que la grasa entre en toda la unión antes de salirse. Después de completar el flujo de grasa, se debe asegurar que ésta salga por la grasera que se tenía tapada y así se podrá garantizar que toda la pieza fue lubricada. Al terminar el engrasado, se debe girar continuamente el swivel y comprobar que gire con normalidad y sin restricciones.

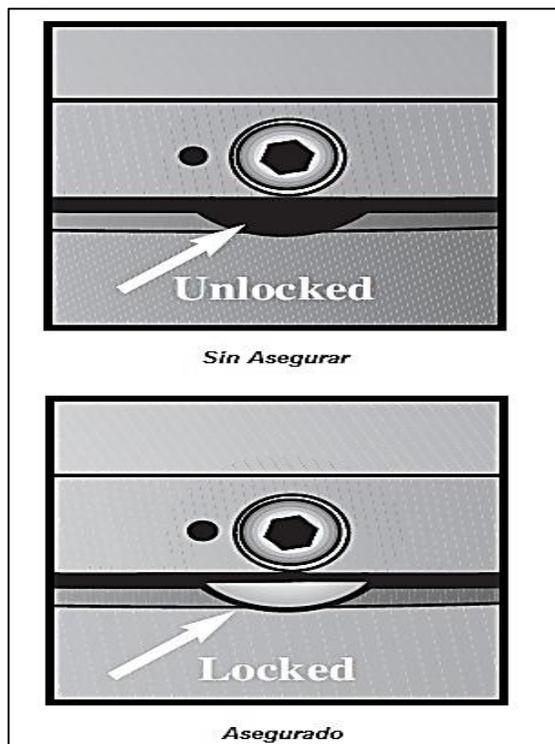
El mantenimiento de esta sección de la RCH es esencial para la vida útil de la misma. Debido a los tiempos prolongados que debe girar esta conexión y a las

cargas que soporta, su desgaste es acelerado si no se lubrica y se limpia correctamente.

- *Ensamblaje del Adaptador Inferior Crossover.* Para poder conectar la RCH al revestimiento y llevar a cabo el trabajo de cementación dinámica, se debe conectar un adaptador o conector (crossover), el cual se encuentra disponible en los tamaños estándares de diámetro de revestimiento, para el caso de la presente investigación se toma el de 9 5/8 pulgadas, ya que esta es nuestra sección de estudio.

Para este procedimiento primero se debe lubricar el O-ring y descargar todo el montaje superior (cuerpo con jaula y swivel) y ensamblar. Cuando esté totalmente encajado se debe girar 60° a la derecha el cuerpo de la RCH hasta que el seguro final esté alineado con la cuña que posee el adaptador inferior, como se muestra en la **Figura 55**. Posteriormente, con una llave brístol se debe girar el seguro, hasta que llegue a la posición de bloqueo. De esta forma, los nueve anillos aseguradores estarán en funcionamiento y se podrá llevar a cabo el trabajo sin inconvenientes, previniendo que se desensamble cualquiera de las secciones durante la operación.

Figura 55. Seguro de conexión RCH-adaptador final.



Fuente: Top Drive Universal Lifting Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

3.3.5 Ficha Técnica y Especificaciones. La información operacional necesaria de la herramienta, como capacidad de carga, presiones de trabajo y prueba, torque que soporta, velocidad máxima de rotación, temperatura de operación, entre otros; se expone en la **Tabla 2**.

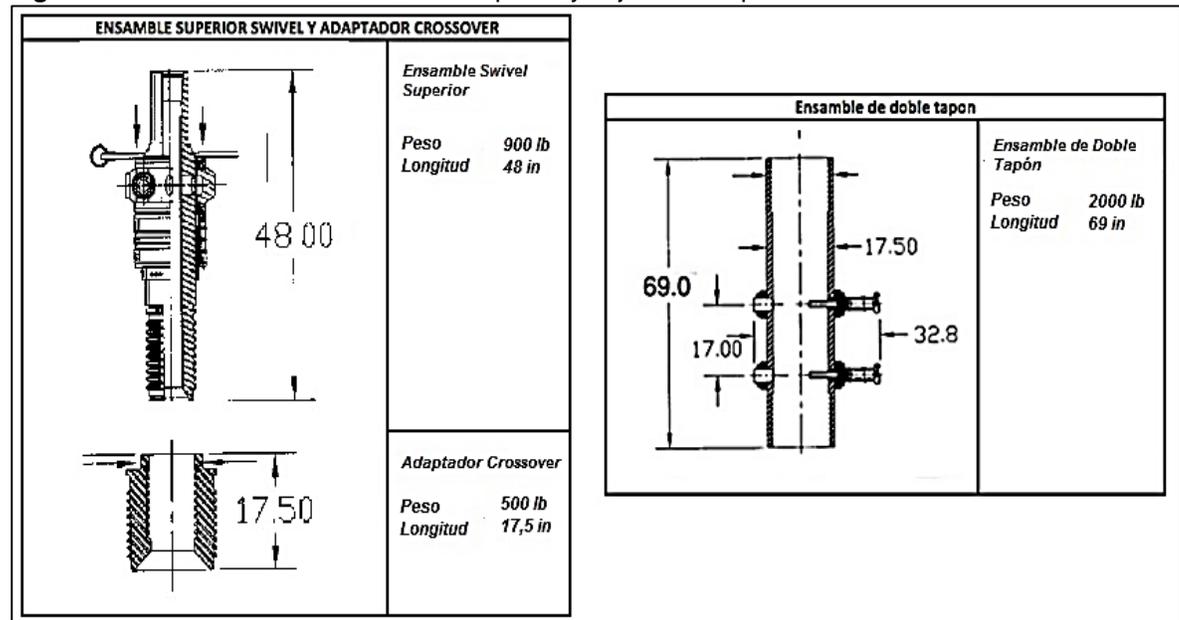
Tabla 2. Ficha de especificaciones técnicas de la Cabeza Rotativa de Cementación.

ESPECIFICACIÓN	VALOR	UNIDADES	
Capacidad de Elevación de Carga con Gancho	500	m-tons	
Presión de Trabajo	5.000	Lb/pulgada ²	
Presión de Prueba	7.500	Lb/pulgada ²	
Torque a través del Seguro Final	70.000	Pie/lb	
Rotación Swivel (velocidad máxima)	40	rpm	
La placa de reacción debe estar bien ajustada a la plataforma para evitar que las líneas se tuerzan y se enreden.			
Temperatura Mínima de Operación	32	°F	
Capacidad de los Anillos de Levantamientos	5000	lbs	Cuerpo de la Cabeza
	2500	lbs	Acople Inferior

Fuente: Top Drive Universal Lipieing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

3.3.6 Dimensiones. En la **Figura 56**, se exponen las dimensiones del ensamble superior (swivel y adaptador crossover) y del cuerpo y la jaula de tapones.

Figura 56. Dimensiones del ensamble superior y la jaula de tapones.



Fuente: Top Drive Universal Lipieing Cement Head. Hybrid Technology. 2008.

3.4 ANILLOS DE TORQUE

Es de gran importancia realizar una predicción precisa del torque que se genera cuando se rotan tuberías a profundidad en un pozo debido a la fricción que se genera entre la tubería y la pared del hueco, sumado al peso de toda la sarta que se está rotando.

El torque no es más que la fuerza que se requiere para rotar la tubería en fondo proyectada en las conexiones de los revestimientos. Cada tipo de revestimiento necesita un torque específico para ser conectado a la siguiente tubería, pero soporta un torque máximo sobre el cual la conexión entre los tubos no soportaría el esfuerzo y fallaría.

El arrastre es la fuerza incremental requerida para mover la tubería hacia arriba o abajo en el pozo. Estas dos condiciones normalmente ocurren simultáneamente y son por lo general directamente proporcionales.⁴⁴

Por esta razón, es sumamente importante que, en la planeación del pozo a perforar y cementar, se realice una predicción lo más precisa posible del torque y arrastre que se generará en ciertas condiciones, ya que los revestimientos utilizados normalmente, no resisten el torque requerido para girar toda la hilera de tubería hasta el fondo.

Es debido a esto que es un parámetro de alta importancia para la operación de cementación dinámica. De no resistir este torque, se puede incluso perder el pozo ya que podría colapsar la tubería, generando sobre costos en trabajos de pesca y tiempos no productivos.

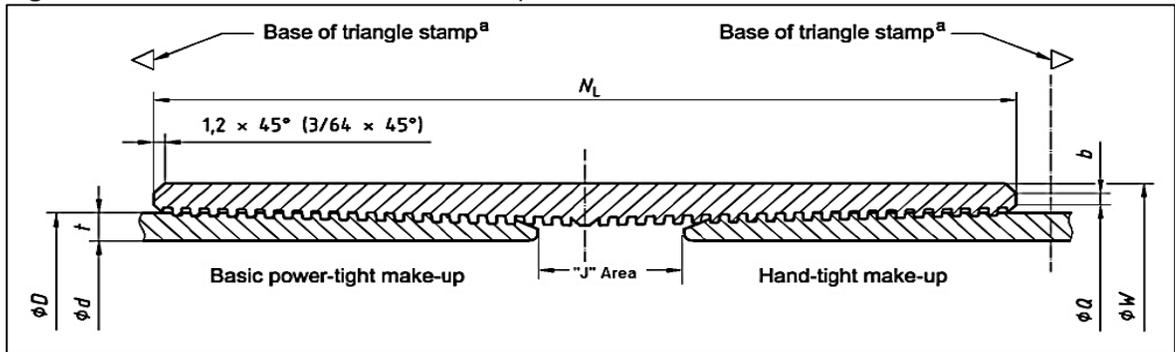
Teniendo en cuenta la importancia de los aspectos explicados anteriormente a la hora de realizar una operación de cementación dinámica, después de un riguroso análisis y planeación de cada uno de ellos; se recomienda hacer uso de anillos de torque para aumentar la resistencia de la conexión al momento soportar los esfuerzos generados por la rotación.

La razón por la cual las conexiones normales de la tubería no tienen gran resistencia al torque es que un punto de contacto dentro del acople de estas es inexistente. En reemplazo de este contacto necesario para que la conexión soporte los esfuerzos de torque, estas tienen un espacio vacío llamado "Área J" como se puede observar en la **Figura 57**.⁴⁵

⁴⁴ Ecopetrol S.A. Investigación Incidente Pozo De Estudio: Lecturas De Registros De Evaluación De Cementación. [Electronic(1)]: 2015.

⁴⁵ JUTTEN, J. J. y HAYMAN, A. J. Microannulus Effect on Cementation Logs: Experiments and Case Histories. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 1993. 978-1-55563-497-1

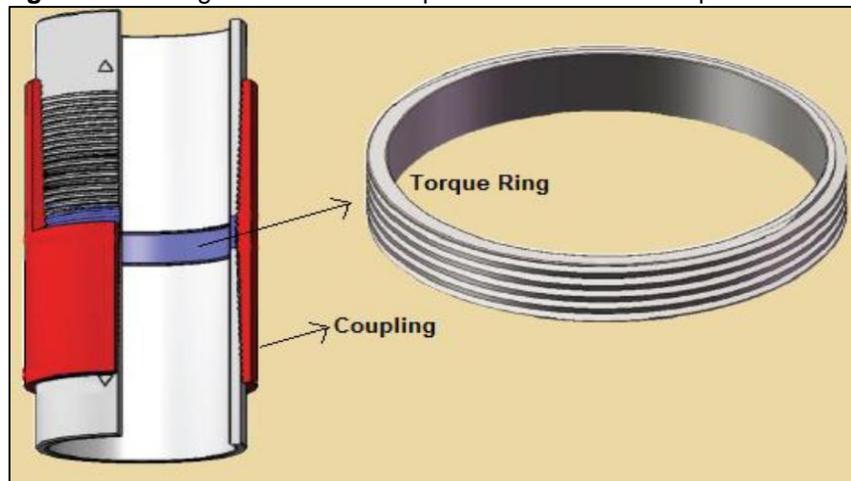
Figura 57. Plano en vista horizontal del acople entre dos tuberías.



Fuente: Propuesta Técnico Económica De Anillos De Torque Y Cabeza Rotativa. Maple Oil Tools. 2015.

Para poder realizar una operación de cementación dinámica se requiere usualmente de conexiones con mayor resistencia que las convencionales, esto debido no solo a la corrida del revestimiento, sino también a la rotación constante desde que empieza el bombeo de pre-flujos y cemento, hasta que el cemento se solidifica, lo cual genera esfuerzos de torque durante toda la operación. Con el fin de dar solución a este problema, diferentes compañías fabrican accesorios llamados anillos de torque. Estos accesorios se diseñan con el fin de ocupar el “Área J”, como se muestra en la **Figura 58**. Este anillo ofrece un punto de contacto en el pin que permite aumentar el torque estándar de la conexión hasta tres veces, lo cual hace posible la corrida del revestimiento rotando y reciprocando. Así como, para el interés del presente trabajo, hace posible realizar una operación de cementación dinámica.⁴⁶

Figura 58. Configuración de un acople con un anillo de torque.



Fuente: Propuesta Técnico Económica De Anillos De Torque Y Cabeza Rotativa. Maple Oil Tools. 2015.

⁴⁶ JUTTEN, J. J. y HAYMAN, A. J. Microannulus Effect on Cementation Logs: Experiments and Case Histories. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 1993. 978-1-55563-497-1

3.4.1 Ventajas. Al ser una conexión roscada, ofrece un área de contacto superficial más amplia, lo cual, según el fabricante, ofrece una mayor capacidad para soportar el torque.

En la **Tabla 3**, se muestra una comparación de la resistencia al torque de una tubería estándar, sin anillo de torque, con respecto a la tubería con anillo de torque instalado. Como se puede observar, cuando se utilizan los anillos de torque, la resistencia de la conexión aumenta significativamente.

Tabla 3. Comparación de resistencia de las tuberías al esfuerzo, con y sin anillos de torque.

Pipe OD	Weight	Grade	Wall	ID	Estimated Torque (no ring)	Minimum Torque with PTR™ Ring	Maximum Torque w/ PTR™ Ring	
9 5/8	36.0	P-110	0.352	8.921	9,625	19,985	51,799	
	40.0	J-55	0.395	8.835	8.835	9,625	13,048	34,231
		K-55	0.395	8.835	8.835	9,625	13,048	34,231
		L-80	0.395	8.835	8.835	9,625	14,166	45,415
		N-80	0.395	8.835	8.835	9,625	14,166	45,415
		C-90	0.395	8.835	8.835	9,625	14,614	49,888
	43.5	K-55	0.435	8.755	8.755	9,625	13,372	37,473
		L-80	0.435	8.755	8.755	9,625	14,638	50,131
		N-80	0.435	8.755	8.755	9,625	14,638	50,131
		C-90	0.435	8.755	8.755	9,625	15,144	55,194
		P-110	0.435	8.755	8.755	9,625	15,877	62,521
	47.0	L-80	0.472	8.681	8.681	9,625	15,071	54,455
		N-80	0.472	8.681	8.681	9,625	15,071	54,455
		C-90	0.472	8.681	8.681	9,625	15,631	60,059
		P-110	0.472	8.681	8.681	9,625	16,752	71,266
53.5	L-80	0.545	8.535	8.535	9,625	15,913	62,879	
	N-80	0.545	8.535	8.535	9,625	15,913	62,879	
	C-90	0.545	8.535	8.535	9,625	16,579	69,535	
	P-110	0.545	8.535	8.535	9,625	17,910	82,849	

Fuente: Propuesta Técnico Económica De Anillos De Torque Y Cabeza Rotativa. Maple Oil Tools. 2015.

3.4.2 Instalación. La instalación de un anillo de torque es sencilla y ágil, además no requiere de herramientas adicionales. Sencillamente, como se mostró en la **Figura 58**, se enrosca el anillo hasta obtener un ajuste perfecto en el espacio J.

Lo importante a tener en cuenta es el tamaño del anillo, ya que según el tipo de tubería varía el tamaño del espacio J y el acople debe quedar preciso para garantizar resultados efectivos.

3.5 ANTECEDENTE DE UNA OPERACIÓN DE CEMENTACIÓN DINÁMICA

En el Pozo Ripalta, en Italia; se logró mejorar la limpieza y el emplazamiento del cemento gracias a la rotación del revestimiento durante el bombeo de pre-flujos y lechada al pozo.⁴⁷

Es decir, por medio de una operación de cementación dinámica. La operación se hizo para cementar un liner de producción de 9 5/8 pulgadas, en cuyo plan de perforación se estimó un diámetro promedio del hueco de 10,625 pulgadas. Los fluidos utilizados se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Propiedades de los fluidos de la operación en el Pozo Ripalta.

FLUIDO	Densidad, lb/gal	K, lbf secn/pie ²	n	10-min Gel Strength, lbf/100 pie ²
Lodo	10.85	0.0096	0.608	16
Espaciador	12.52	0.0091	0.547	—
Cemento	13.94	0.0440	0.735	—

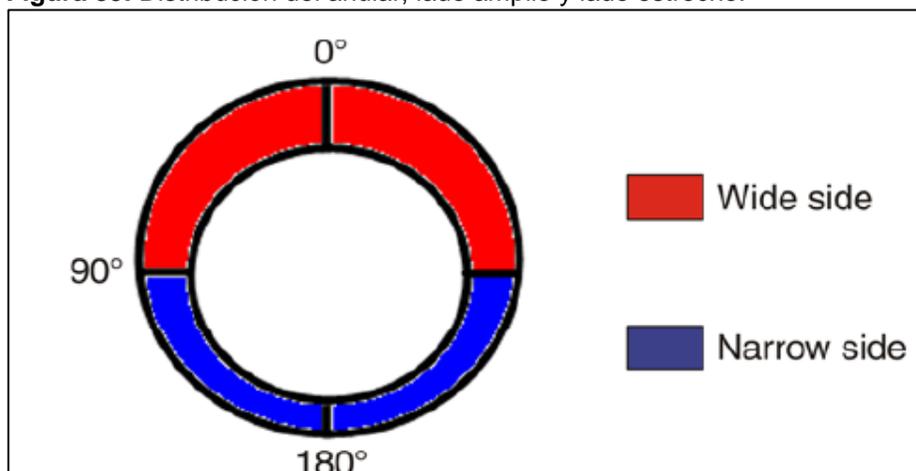
Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

Donde K y n son los factores de índice de comportamiento de flujo e índice de resistencia, respectivamente; explicados en el numeral 3.1.2 del presente trabajo.

El flujo axial puro del espaciador fue estudiado a una tasa de bombeo de 3.2 barriles por minuto hacia el anular, el cual es excéntrico y con un standoff de 74,5%. Para el estudio en cuestión, se dividió el anular excéntrico en dos partes, como se muestra en la **Figura 59**, formando dos áreas diferentes. El anular amplio de 0° a 90° y de 90° a 180° el anular estrecho.

⁴⁷ MORONI, Nevio, et al. Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 2009. 978-1-55563-261-8

Figura 59. Distribución del anular, lado amplio y lado estrecho.



Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

Se calcularon las tasas de flujo axiales integrando las velocidades locales de 14.400 nodos alrededor del anular. Posteriormente, se realiza una simulación y se obtienen los resultados que se muestran en la **Tabla 5 y Tabla 6**. Como se puede notar en las tablas, tan solo el 21.6% del flujo de espaciador y el 25% del flujo de cemento lograron entrar en el lado estrecho del anular.

Tabla 5. Tasas de flujo de espaciador en el anular, sin rotación.

Región del Anular	Área, in ²	Tasa de flujo bbl/min	Volumen de fluido, bbl	Altura Representativa de Fluido en el Anular
Amplia	9.34	2.5	25.65	1,665.42
Estrecha	6.57	0.7	7.06	651.55
Total	15.91	3.2	32.71	—

Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

Tabla 6. Tasa de flujo de cemento en el anular, sin rotación.

Región del Anular	Área, in.2	Tasa de flujo bbl/min	Volumen de fluido, bbl	Altura Representativa de Fluido en el Anular
Amplia	9.34	2.4	24.69	1,603.35
Estrecha	6.57	0.8	8.02	739.71
Total	15.91	3.2	32.71	—

Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

Es claro que, debido a la geometría irregular del anular, los fluidos se movilizan con facilidad en el espacio de flujo amplio, pero no logran moverse en el lado estrecho en su totalidad. Tal situación finalmente acarrea las consecuencias que se mencionan a continuación.

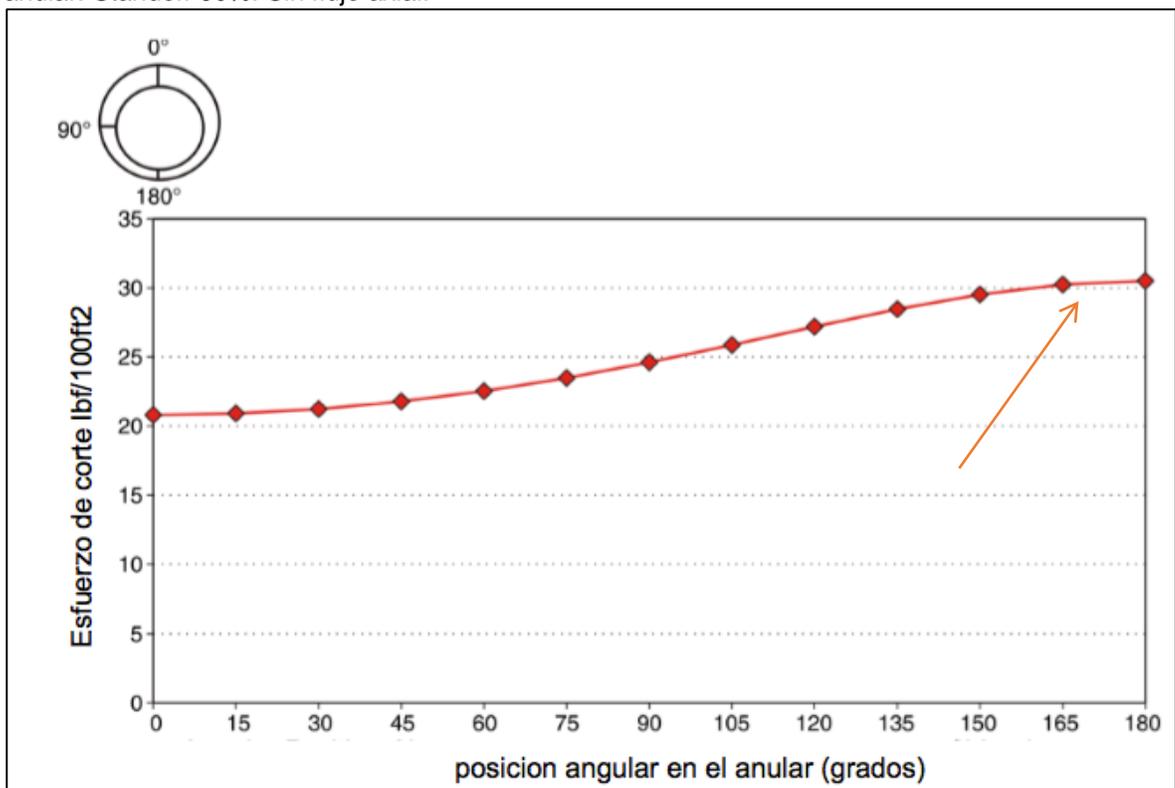
- *Mala Limpieza del Pozo.* La baja tasa de flujo y el poco volumen de fluido circulante en el anular estrecho, dificulta el desplazamiento del lodo de perforación que se encuentra allí alojado. Por lo tanto, una vez termine la limpieza del pozo, quedará lodo de perforación sin remover, el cual, como se ha explicado anteriormente, es un gran contaminante del cemento que finalmente causará canales de flujo cuando la lechada fragüe.
- *Desplazamiento Limitado de Fluidos.* Análogamente, debido a la dificultad de flujo en el lado estrecho del anular, sólo una parte del cemento requerido para la integridad del pozo, logrará emplazarse en esta área. Por lo tanto, el tope de cemento no quedará en la profundidad requerida en el lado estrecho, y la mayor parte del cemento se emplazará en la parte amplia del anular.

Sin embargo, cuando se rota el revestimiento durante la cementación, como se explicó anteriormente, se aplica una velocidad tangencial en el espacio anular. Esto permite que el espaciador y el lavador circulen por la totalidad del anular tanto en el lado estrecho como en el amplio. Pero la presencia de ésta velocidad no asegura que los fluidos mencionados desplacen y limpien efectivamente el lado estrecho, también se quiere que el esfuerzo de corte en la dirección tangencial sea suficiente

para desplazar el lodo de perforación allí alojado.⁴⁸ Por lo tanto, significa que se requiere de una buena combinación entre la reología del espaciador y la rotación del revestimiento, con el fin de lograr un esfuerzo de corte que supere el punto de cedencia del lodo que se debe desplazar.

Teniendo en cuenta lo explicado anteriormente, en el Pozo Ripalta, en Italia; se tiene un lodo con un punto de cedencia de 3,9 lbf/100pie² y mediante la simulación se obtiene el grafico de la **Figura 60**, que muestra el esfuerzo de corte rotando el revestimiento a 10 revoluciones por minuto, en función de la posición angular del anular (amplia y estrecha). Como se puede apreciar en la sección más estrecha del anular (180°) se tiene un esfuerzo de corte de 5,8 lbf/100 pie², es decir mayor al punto de cedencia del lodo, por lo cual es claro que la rotación ayuda a incrementar este esfuerzo y ayudaría a la limpieza efectiva del pozo en cuestión, además de esto el flujo axial ayuda a la limpieza del lodo gelificado.

Figura 60. Gráfico de esfuerzo de corte del espaciador en función de la posición angular del anular. Standoff 60%. Sin flujo axial.



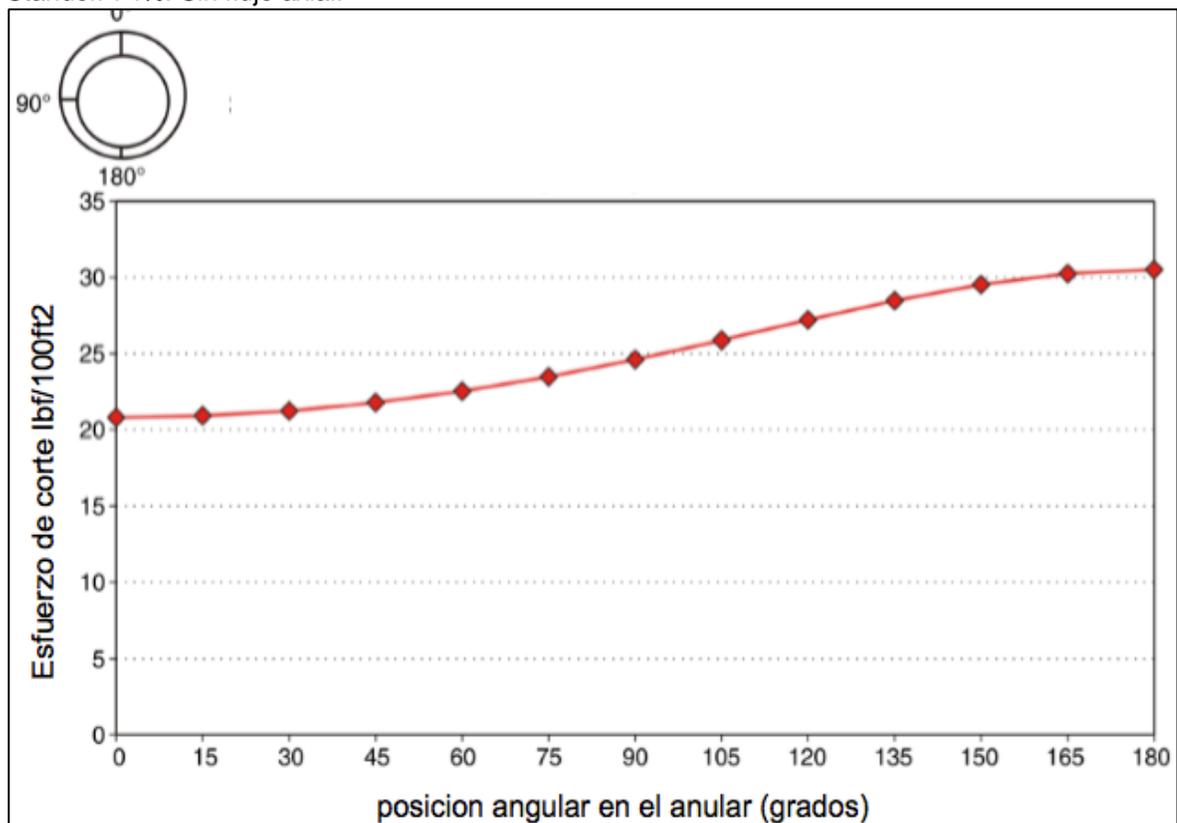
Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

⁴⁸ MORONI, Nevio, et al. Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 2009. 978-1-55563-261-8

Por otro lado, la simulación arroja la gráfica mostrada en la **Figura 61**, que corresponde al esfuerzo de corte en el emplazamiento de cemento en función de la posición angular del anular, medida en la pared del revestimiento. Como se puede observar, el esfuerzo de corte con el efecto de rotación en el lado más estrecho (180°) es de 30 lbf/100 pie², lo cual indica que el cemento debería lograr distribuirse alrededor de todo el anular sin problemas. Finalmente, esto permitirá que el anular quede cementado en su totalidad, lo cual, como se explicó al comienzo del presente capítulo es uno de los objetivos principales para tener una buena integridad del pozo.⁴⁹

Además de esto, el cemento debería quedar en la profundidad planeada, tanto en el lado estrecho como en el amplio, ya que se distribuye homogéneamente. Eso demuestra de manera clara y concisa los beneficios de la aplicación de la técnica de cementación dinámica.

Figura 61. Gráfico de esfuerzo de corte de cemento en función de la posición angular del anular. Standoff 74%. Sin flujo axial.



Fuente: Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Halliburton. 2009.

⁴⁹ Ibid. Pag 8.

4. ANÁLISIS DEL ANTECEDENTE DE CEMENTACIÓN EN UN POZO DE ESTUDIO

En el presente capítulo se describe y explica de manera detallada la operación de cementación realizada en un pozo de estudio (Pozo X). Inicialmente, se exponen las generalidades del pozo, para después describir cómo se realizó el diseño de cementación, cómo se llevó a cabo la operación y finalmente los resultados obtenidos en esta. Con esto se da cumplimiento al segundo objetivo propuesto para este trabajo.

4.1 GENERALIDADES DEL POZO

El pozo de estudio que será analizado en la presente investigación fue perforado con el objetivo de disponer agua de un campo, ubicado en la Cuenca Llanos Orientales, en la unidad operacional T2 también conocida como Formación Mirador; la cual, como se explicó anteriormente, es un conjunto de areniscas masivas con granulometría decreciente de base a tope. Esta unidad se encuentra supra yacida por la unidad Lutita E4, que representa su sello natural.

En esta última se proyectó el punto de asentamiento del revestimiento intermedio de $9 \frac{5}{8}$ pulgadas donde se buscaba un sello hidráulico efectivo durante la cementación de dicha fase para garantizar la integridad del zapato, asegurar la vida productiva del pozo inyector y cumplir con la normatividad establecida por el Ministerio de Minas y Energía en la Resolución 9 0341 de 2014 que reglamenta que los pozos inyectores deben ser cementados 500 pies por encima del zapato del revestimiento intermedio, que adicionalmente debe ser evaluado por medio de una prueba de presión que de no arrojar resultados de sello efectivo conlleva a realizar acciones correctivas a la cementación.⁵⁰

El pozo fue perforado en tres secciones, la de superficie e intermedia revestidas y cementadas; y la última fase con un liner (revestimiento de producción) ranurado y set de empaques.

La primera fase se perforó con broca de $17 \frac{1}{2}$ pulgadas hasta 1.004 pies, sentando el revestimiento de $13 \frac{3}{8}$ pulgadas a una profundidad de 999 pies, dejando así 5 pies de bolsillo. Para la cementación se utilizaron dos lechadas; la primera una

⁵⁰ Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 9 0341 De 2014. (Marzo 28 de 2014). Por la cual se establecen requerimientos técnicos y procedimientos para exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales. Bogotá, Colombia, 2014. P. 12.

lechada de relleno de 13.6 libras por galón (lpg) para cubrir una longitud de 699 pies y una segunda lechada de 15.6 lpg con una longitud de 300 pies.

La sección de 12 ¼" fue perforada hasta 7.867 pies de profundidad medida (MD) (7.283 pies de profundidad total verdadera (TVD)) alcanzando una inclinación máxima de 50.28°. Para la sección intermedia, se llevó el tope de cemento desde el zapato del revestimiento 7.862 pies MD hasta 4.954 pies MD, de la siguiente manera: 1.200 pies de longitud en el anular con una lechada principal de 15.8 lpg y 1.500 pies de longitud en el anular con una lechada de relleno de 13.6 lpg, calculando su volumen con el tamaño de broca de 12 ¼ pulgadas, más un exceso del 50 % para éste propósito.

La fase de inyección se perforó con un BHA de 8 ½ pulgadas con un lodo de perforación de 9,0 lpg, desde 7866 pies hasta 9882 pies donde se sentó el zapato del liner con una inclinación aproximada de 50°. Se utilizó una sarta combinada de donde se ubicaron 500 pies aproximadamente de liner ciego de 7 pulgadas, seguido de un empaque hinchable que se encargó de sellar la conexión entre las tuberías y la zona de inyección. Por último, se bajaron 1500 pies de liner ranurado de 7 pulgadas desde el entry point registrado (punto de entrada) hasta el fondo del pozo.

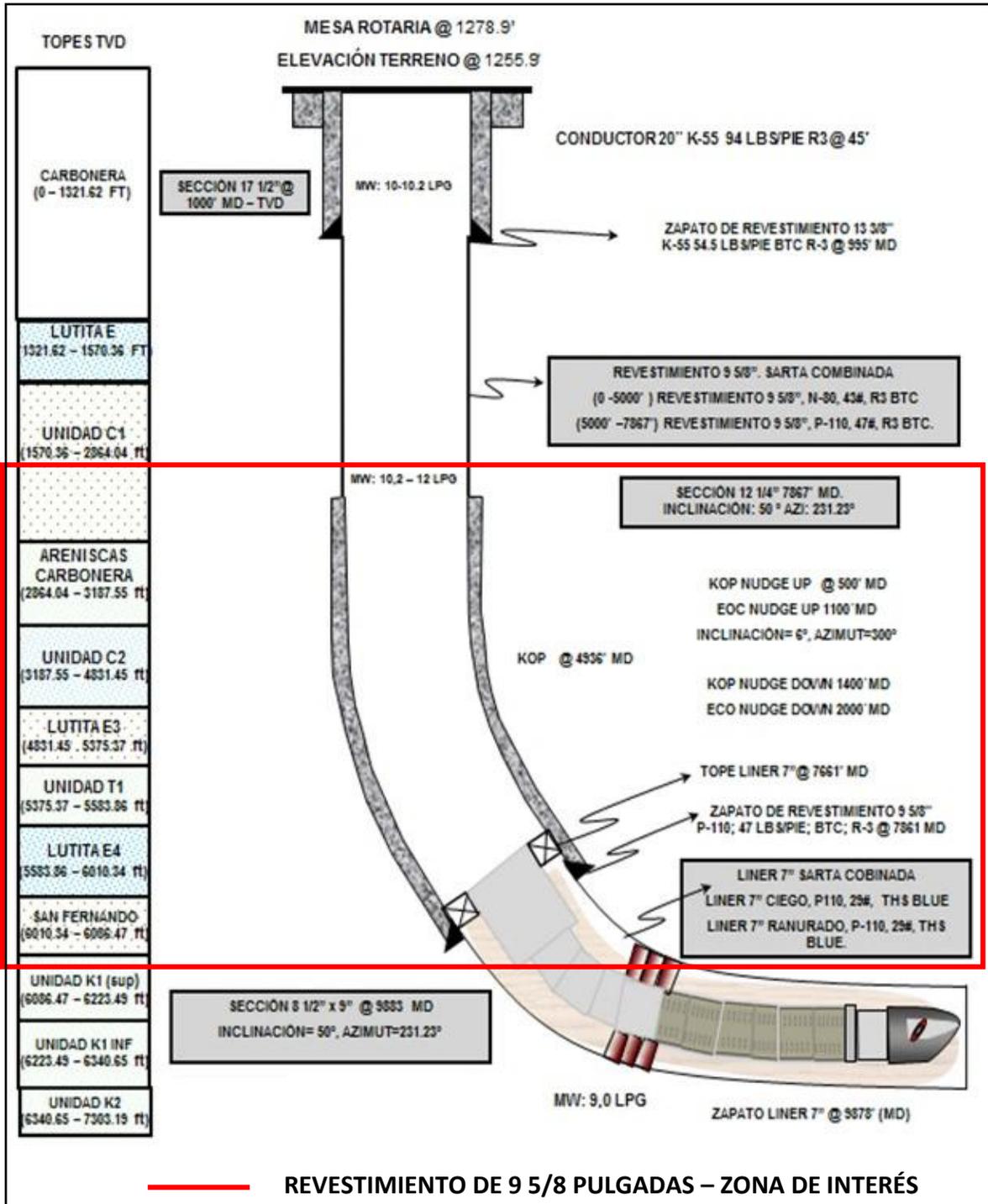
Después de realizar todas las pruebas de inyektividad e integridad requeridas por la empresa y la normatividad correspondiente, se pone en operación el pozo, el cual inyecta agua con el fin de disponerla a un caudal de aproximadamente 40.000 barriles por día.

El estado mecánico del pozo de estudio se muestra en la **Figura 62**, donde se puede observar con detalle todo lo expuesto anteriormente para las tres secciones descritas.

Adicionalmente, el diseño de revestimiento para la fase intermedia del pozo de estudio, la cual es de interés en el presente trabajo, reflejado en la **Tabla 7**, donde se exponen detalladamente las clases de revestimiento utilizados para cada sección, sus diámetros internos y externos, el peso, grado y tipo de rosca de cada tubería, así como las profundidades en las cuales fueron ubicadas.

Estas características son de gran importancia para determinar la resistencia de las tuberías utilizadas a los esfuerzos ejercidos durante una operación de cementación. Diferentes cálculos y simulaciones deben realizarse durante el diseño del esquema de un pozo, ya se productor o inyector, como se explica más adelante en el presente trabajo.

Figura 62. Estado mecánico final del pozo inyector de estudio.



Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

Tabla 7. Propiedades de las tuberías de revestimiento del pozo de estudio.

Casing de Superficie de 13 3/8"	Superficie - 999 ft (MD)	
	Diámetro Externo	13.375 in.
	Diámetro Interno	12.615 in.
	Peso Lineal	54.5 lbm/ft
	Grado del Casing	K-55
	Tipo de Rosca	BTC
Hueco Abierto - Sección 12 1/4"	999 ft – 7867 ft (MD)	
	Diámetro de la Broca	12.25 in
	Exceso del trabajo	50%
Casing Intermedio de 9 5/8" -5 - 7861 ft (MD). Revestimiento Combinado	(-5 – 3692.77 ft)	
	Diámetro Externo	9.625 in
	Diámetro Interno	8.755 in
	Peso Lineal	43.5 lbm/ft
	Grado del Casing	N-80
	Tipo de rosca	BTC
	(3692.77 – 5000 ft)	
	Diámetro Externo	9.625 in
	Diámetro Interno	8.681 in
	Peso Lineal	47.0 lbm/ft
	Grado del Casing	N-80
	Tipo de rosca	BTC
	(5000 – 7861 ft)	
	Diámetro Externo	9.625 in
	Diámetro Interno	8.681 in
	Peso Lineal	47.0 lbm/ft
	Grado del Casing	P-110
	Tipo de rosca	BTC

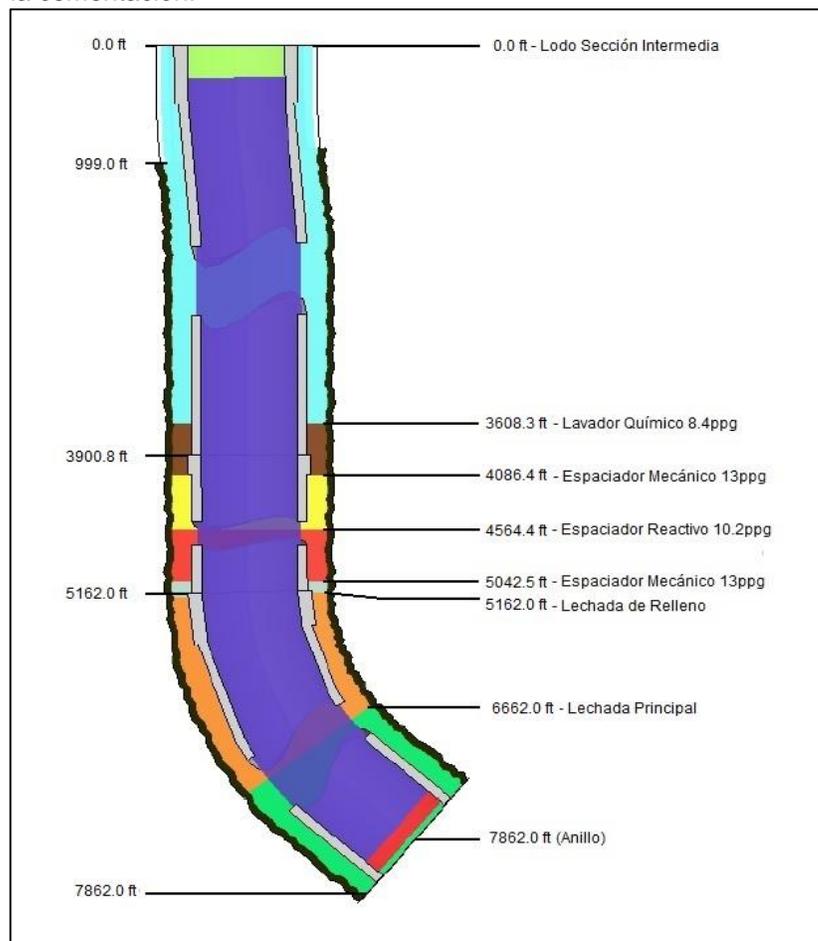
Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

4.2 GENERALIDADES DEL DISEÑO DE CEMENTACIÓN

Como se ha explicado a lo largo de este capítulo, el objetivo principal de la operación de cementación del revestimiento intermedio del pozo de estudio era proveer aislamiento zonal a través del intervalo cementado con una lechada principal mezclada con cemento fino en una concentración (80/20) para cubrir una longitud de 1.200 pies y una lechada de relleno de una longitud de 1.500 pies; y de esta manera también reforzar la resistencia del revestimiento contra el colapso o efectos de pandeo (Buckling).

La disposición de los fluidos en el anular según el diseño de la cementación se planeó como se muestra en la **Figura 63**, donde adicionalmente se pueden ver las profundidades estimadas a las cuales serían posicionados cada uno de los fluidos bombeados.

Figura 63. Disposición de los fluidos en el anular según el diseño de la cementación.



Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

En el mes de Abril del año 2015, el departamento de perforación de la empresa operadora Ecopetrol S.A suministró la siguiente información a la empresa prestadora de servicios con el fin de diseñar el programa de cementación:

- La sección intermedia fue perforada con broca de 12 ¼ pulgadas hasta una profundidad de 7.867 pies MD (7.154.82 pies TVD). Con una inclinación máxima de 50.28° y un azimut de 232.30°.
- La temperatura estática (BHST) usada para correr las pruebas de laboratorio fue calculada usando el gradiente de temperatura del área: 1.15 °F/100pie (grados Fahrenheit por cada cien pies).
- Survey del Pozo
- Estado Mecánico
- Reporte de Lodo
- Cálculo de volumen considerando el diámetro de la broca (12 ¼ pulgadas) mas 50% de exceso.
- Tope de Cemento @ 5162 pies solicitado por Ecopetrol.

Además de la información anterior, hay varios aspectos críticos considerados en el diseño de la operación de cementación del pozo de estudio. Estos determinan que tan correctos o errados son los calculos realizados y permiten tomar decisiones acerca de los aditivos apropiados para la operación. Estos factores serán explicados a continuación.⁵¹

4.2.1 Sistemas de Fluidos Propuestos. Para el pozo de estudio y según los parámetros de diseño, se propone el uso de los siguientes fluidos con características específicas que satisfacen los requerimientos de la operación.

- *Lechada de Relleno.* Fluido con aditivos extendedores de agua. Este sistema ofrece un lechada liviana de resistencia a la compresión moderada, con propiedades reologicas suficientes para ayudar a remover el lodo del anular y dar paso a la lechada principal. Bombeada al vuelo con un peso de 13,6 lpg para cubrir una extensión de 1500 pies de profundidad.
- *Lechada Principal.* Sistema diseñado con un controlador de filtrado adecuado a las condiciones del pozo y retardador suficiente para realizar la operación de manera segura. Se realiza el proceso de pre-mezclado antes de comenzar con la operación de desplazamiento y se le ajusta una densidad de 15,8 lpg para una extensión de 1200 pies que cubran el zapato del revestimiento intermedio. Se recomienda el uso de fibra de vidrio hidrofílica en una concentración de 1,0 libras por barril con el fin de mejorar la fuerza de cohesión y ayudar a minimizar las pérdidas hacia las arenas de baja presión.

⁵¹ Empresa Prestadora de Servicios. Reporte Final Del Servicio De Cementación Para Ecopetrol S.A. [Electronic(1)]: 2015c.

- *Lavador Químico*. Pre-flujo que actúa como dispersante y surfactante para remover fluidos de perforación y dejar las superficies de contacto preferiblemente mojadas al agua. Estas propiedades ayudan a asegurar compatibilidad con los fluidos de perforación y las lechadas que entran con el lavador en fondo. Se bombea con una densidad de 8,4 lpg.
- *Espaciador Mecánico Pesado y Viscoso*. Es un espaciador a base agua cuyas propiedades reológicas pueden ser diseñadas para cada caso específico. Su principal objetivo es desplazar completamente el fluido de perforación y eliminar el revoque de lodo formado y así preparar el pozo para recibir el cemento y asegurar un apropiado aislamiento. Su densidad es de 13,0 lpg.
- *Espaciador Reactivo*. Utilizado antes de la cementación primaria para ayudar a mejorar el desplazamiento del lodo y la adherencia del cemento. También ayuda a controlar la pérdida de fluidos en el pozo. Puede ser usado en un rango de temperatura entre 60^o hasta 450^o F. El fluido se diseña con un peso de 10,2 lpg.⁵²

4.2.2 Centralización. Es un aspecto crucial para lograr una cementación efectiva, especialmente en pozos inclinados como el del presente trabajo. Su gran importancia radica en el papel que un buen diseño de centralización juega a la hora de mitigar parcialmente los problemas que se pueden presentar durante la operación de cementación debido a la excentricidad y standoff de la tubería. Para la cementación del pozo de estudio se instaló el primer centralizador a 5 pies del zapato y los otros de acuerdo a la distribución de las formaciones y perfil direccional para obtener el mejor parámetro de centralización posible. Con el fin de mejorar el desplazamiento y evitar canalización de los fluidos para obtener buenos resultados de la operación, en el diseño se recomendó el uso de centralizadores 9 5/8 pulgadas x 12 1/4 pulgadas distribuidos de la siguiente manera:

- Dos (2) centralizadores cada junta los primeros 500 pies.
- Un (1) centralizador cada junta los siguientes 1000 pies.
- Un (1) centralizador cada dos juntas hasta el TOC (1200 pies).

Como puede verse en la **Tabla 8**, la disposición de los centralizadores en el pozo de estudio se realizó según los requerimientos de la empresa mencionados anteriormente. De la profundidad del zapato (7762 pies) hasta 500 pies por encima, se colocaron los accesorios de centralización a 10 y 30 pies del zapato de cada tubería, utilizando dos stop collar y en el resto del pozo, hacia superficie, se colocaron en la conexión de la junta.

⁵² Empresa Prestadora de Servicios. Diseño Del Servicio Cementación Casing Intermedio 9 5/8". [Electronic(1)]: 2015a.

Tabla 8. Disposición y características de tubería y centralizadores en el pozo de estudio.

TALLY CASING									
TAMAÑO	GRADO	PESO (lb/ft)	CONEXIÓN	D.I.	CAPACIDAD (bbl/ft)	DESPLAZAMIENTO (bbl/ft)	PRESION DE COLAPSO (psi)	PRESION DE ESTALLIDO (psi)	TENSION (lb)
9 5/8	P-110	47	BTC	8,681	0,0732	0,0168	5.300	9.440	1.493.000
9 5/8	N-80	47	BTC	8,681	0,0732	0,0168	4.750	6.870	1.493.000
9 5/8	N-81	43,5	BTC	8,755	0,0740	0,0160	3.811	6.331	1.493.000

DIAMETRO	PROFUNDIDAD	BOLSILLO	PESO LODO	B.F	PESO BLOQUE (lbs)
12 1/4	7667	5	12	0,817	40000

C: CENTRALIZADORES					
JUNTA CORRIDA #	C	LONGITUD TOTAL	LONGITUD ACUM	TOPES	COMENTARIOS
ZAPATO		2,71	2,71	7.659,29	
1	⊕	42,20	44,91	7.617,09	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
COLLAR		1,22	46,13	7.615,87	
2	⊕	42,54	88,67	7.573,33	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
3	⊕	42,31	130,98	7.531,02	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
4	⊕	43,03	174,01	7.487,99	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
5	⊕	42,39	216,40	7.445,60	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
6	⊕	42,32	258,72	7.403,28	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
7	⊕	42,54	301,26	7.360,74	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
8	⊕	42,61	343,87	7.318,13	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
9	⊕	42,59	386,46	7.275,54	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
10	⊕	43,03	429,49	7.232,51	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
11	⊕	42,96	472,45	7.189,55	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
12	⊕	42,62	515,07	7.146,93	A 10' Y 30' DEL ZAPATO + 2 STOP COLLAR
13	⊕	42,27	557,34	7.104,66	EN LA CONEXIÓN
14	⊕	43,06	600,40	7.061,60	EN LA CONEXIÓN
15	⊕	42,49	642,89	7.019,11	EN LA CONEXIÓN
16	⊕	43,01	685,90	6.976,10	EN LA CONEXIÓN
17	⊕	42,46	728,36	6.933,64	EN LA CONEXIÓN
18	⊕	42,40	770,76	6.891,24	EN LA CONEXIÓN
19	⊕	42,52	813,28	6.848,72	EN LA CONEXIÓN
20	⊕	42,60	855,88	6.806,12	EN LA CONEXIÓN
21	⊕	42,38	898,26	6.763,74	EN LA CONEXIÓN
22	⊕	43,07	941,33	6.720,67	EN LA CONEXIÓN
23	⊕	42,71	984,04	6.677,96	EN LA CONEXIÓN
24	⊕	42,31	1.026,35	6.635,65	EN LA CONEXIÓN
33		43,06	1.069,41	6.592,59	
34		43,01	1.112,42	6.549,58	
35	⊕	43,11	1.155,53	6.506,47	EN LA CONEXIÓN
36		43,00	1.198,53	6.463,47	
37		43,05	1.241,58	6.420,42	
38	⊕	43,03	1.284,61	6.377,39	EN LA CONEXIÓN
39		42,43	1.327,04	6.334,96	
40		42,96	1.370,00	6.292,00	
41	⊕	43,02	1.413,02	6.248,98	EN LA CONEXIÓN
42		43,07	1.456,09	6.205,91	
43		43,06	1.499,15	6.162,85	
44	⊕	43,06	1.542,21	6.119,79	EN LA CONEXIÓN
45		42,99	1.585,20	6.076,80	
46		41,12	1.626,32	6.035,68	
47	⊕	40,66	1.666,98	5.995,02	EN LA CONEXIÓN
48		42,89	1.709,87	5.952,13	
49		42,98	1.752,85	5.909,15	
50	⊕	43,19	1.796,04	5.865,96	EN LA CONEXIÓN
51		40,60	1.836,64	5.825,36	
52		42,48	1.879,12	5.782,88	

Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

4.2.3 Potencial de Flujo. Conocer este factor causa un gran impacto en el diseño de la cementación. Después de bombear el fluido y posicionarlo en el espacio anular a la altura deseada, se debe conocer el potencial de flujo que podría presentarse durante el tiempo en el que la lechada se solidifica y adquiere los esfuerzos compresivos para los cuales fue diseñado. Este factor, derivado de la pérdida de presión hidrostática ocurrida durante el tiempo de transición (fase líquido a fase sólido) podría resultar en percolación del cemento.

Este potencial indica cómo actúan las presiones en el pozo en el lugar donde fue ubicado el cemento según el diseño. Dependiendo de si el anular está con respecto a la formación en sobre balance o bajo balance, se deben tomar acciones correctivas. Las implicaciones del potencial de flujo según la empresa operadora pueden verse en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Rangos e implicaciones del potencial de flujo.

POTENCIAL DE FLUJO	CONDICIÓN	DESCRIPCIÓN
Menor a 0	Bajo Balance	Puede ser necesario cambiar el tratamiento para apuntar a tener un sobre balance.
0 -1	Buena	El flujo anular no será un factor. No se requieren técnicas especiales anti migración de fluidos si se utilizan técnicas de desplazamiento óptimo de lodo.
1-3	Menor	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Considerar aditivos controladores de pérdida de fluido para limitar la reducción de volumen. ▪ Considerar modificar el diseño mediante el uso de presión de respaldo, columna de cemento más corta y/u otros parámetros.
3-8	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Considerar el uso de controladores de migración de gas para retrasar la fuerza de gel con un tiempo de transición corto. ▪ Considerar uso de cementos tixotrópicos para desarrollar rápidamente fuerzas de gel que minimicen el tiempo evitando la percolación del fluido en el anular.
8-15	Severo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Considerar el uso de aditivos de control de migración de gas para hacer la lechada compresible. ▪ Considerar el uso de cementos espumados para obtener una lechada de cemento compresible.
Mayor a 15	Crítico	<p>Deben realizarse cambios que permitan bajar el potencial de flujo por debajo de 15. Algunos pueden ser:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cementación en múltiples etapas. ▪ Reducir el peso del cemento. ▪ Mantener la presión de respaldo.

Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

En este caso se consideró información de presión de poro, proporcionada por Ecopetrol S.A; geometría del pozo estimada, ya que no se cuenta con registro caliper; y presión hidrostática evaluada con base a la posición final de los fluidos en el anular.

Para la etapa a cementar de 9.625 pulgadas en el pozo de estudio se obtuvo un potencial de flujo menor a 1 (más específicamente 0,77), lo que refleja una condición *Buena*, razón por la cual no existe la necesidad de incluir aditivos anti-migratorios ni controladores de filtrado. El riesgo de potencial de flujo no es un factor considerado.

4.2.4 Jerarquía Reológica. Este parámetro tiene una gran influencia sobre el desplazamiento de fluidos durante la operación. Debido a que las características de los fluidos se ven afectadas por la temperatura y la presión a las cuales están expuestos, se deben considerar a la hora de evaluar el esfuerzo y tasa de corte a las que son sometidos los fluidos bombeados.

Esto debe evaluarse a escala de laboratorio y a escala operativa. El esfuerzo de corte en laboratorio viene dado por la lectura del medidor, mientras que en escala operativa se da por la presión de la bomba. Por otro lado, la tasa de corte en laboratorio se mide por las revoluciones por minuto del motor y a nivel operacional por la velocidad anular.

En el pozo de estudio, en el revestimiento de 9,625 pulgadas, la jerarquía reológica alcanzada por los fluidos bombeados permite realizar un desplazamiento eficiente bajo condiciones de velocidad anular sometidos ofreciendo reologías progresivas en los fluidos densificados como son el lodo, espaciador y lechadas de cemento.

4.2.5 Tiempos de Bombeabilidad y Desarrollo de Esfuerzo Compresivo. La temperatura es un factor de gran influencia en el desempeño de las lechadas de cemento. Determinar la temperatura circulante (BHCT) y estática (BHST) es esencial para el éxito del trabajo de cementación.

Para el caso del pozo de estudio en su etapa de 9,625 pulgadas, las temperaturas para el diseño y para las pruebas de control de calidad fueron determinadas de acuerdo a lo establecido en las tablas API Spec 10, 5th Edition y teniendo en cuenta el gradiente de temperatura proporcionado por la empresa operadora.

El tiempo de bombeabilidad de los fluidos se detalla en la **Tabla 10**, la cual representa el programa de bombeo de la operación de cementación del revestimiento intermedio.

Los tiempos de bombeo de los fluidos solicitados y obtenidos, cumplen con el tiempo de seguridad adecuado, que garantiza que la lechada de cemento llegará hasta la profundidad deseada en estado de bombeabilidad, eso quiere decir que no cambiará de estado antes de lo diseñado.

Tabla 10. Programa de bombeo.

Etapa		Volumen (bb)	Descripción del Fluido	Caudal (bb/min)	Tiempo Etapa (hh:mm)	Tiempo Total (hh:mm)
0	Premezcla	104	Premezcla Lechada Principal	0	1:00	1:00
1	Soltar 1 Bottom Plug				0:05	1:05
2	Lavador Químico	40	Lavador Químico de 8.4 lpg	5	0:08	1:13
3	Espaciador Mecánico	40	Espaciador Mecánico de 13.0 lpg	5	0:08	1:21
4	Espaciador Reactivo	40	Espaciador Reactivo de 10.2 lpg	5	0:08	1:29
5	Espaciador Mecánico	10	Espaciador Mecánico de 13.0 lpg	5	0:02	1:31
6	Soltar 2 Bottom Plug				0:05	1:36
7	Lechada de Relleno	126	Lechada de Relleno 13.6 lpg	5	0:25	2:01
8	Lechada Principal	104	Lechada Principal de 15.8 lpg	5	0:20	2:22
9	Soltar Top Plug				0:05	2:27
10	Desplazamiento	10	Agua Fresca	8	0:01	2:28
11	Desplazamiento	400	Lodo (Bombas Taladro)	12	0:33	3:01
12	Desplazamiento	80	Lodo (Bombas Taladro)	8	0:10	3:11
13	Desplazamiento	50	Lodo (Bombas Taladro)	63	0:08	3:19
14	Desplazamiento	22	Agua Fresca	2	0:11	3:30
Tiempo Total del Trabajo (HH:MM)						3:30
Tiempo de Bombeabilidad de la Lechada Principal (HH:MM)						5:04
Tiempo de Bombeabilidad de la Lechada de Relleno (HH:MM)						3:38
Tiempo de Seguridad de la Lechada Principal (HH:MM)						1:33
Tiempo de Seguridad de la Lechada de Relleno (HH:MM)						1:43

Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

Los esfuerzos compresivos para los cuales se diseñan las lechadas de cemento son medidos en laboratorio. Para los fluidos del pozo de estudio se realizan las pruebas de esfuerzo compresivo a 154°F de temperatura y a una presión de 3000 lb/pulgada², arrojando resultados para la lechada de relleno (13,6 lpg) de 381,57 lb/pulgada² a las 8 horas; 573,07 lb/pulgada² a las 12 horas; 715,43 lb/pulgada² a las 16 horas y 916,18 lb/pulgada² a las 24 horas. Para la lechada principal se obtuvieron medidas de 1.521 lb/pulgada² a 12 horas y 2.353 lb/pulgada² a las 24 horas.

Esto se ajusta a los requerimientos normativos y de la empresa operadora.

4.3 EJECUCIÓN DE LA OPERACIÓN

La operación de cementación del revestimiento intermedio se realizó el 5 de abril de 2015. Se llevaron a cabo todos los procedimientos dictados en el diseño planteado por la empresa prestadora de servicios y se realizó sin registrar inconvenientes o contratiempos. El revestimiento fue centralizado de acuerdo al diseño del servicio revisado y aprobado por Ecopetrol y se corrió con éxito hasta la profundidad deseada sin registro de pérdidas de circulación durante el tiempo que se requirió para ubicar la tubería. Una vez en fondo se circuló por tres horas con un caudal de 418 galones por minuto a una presión de 592 lb/ pulgada².

Como se ha mencionado anteriormente, es importante realizar una buena circulación del pozo antes de realizar la operación. Es por esto que en el pozo de estudio se circula hasta retornos limpios evidenciando un comportamiento de la presión constante. Después de limpiar el hueco, se adiciona lodo hasta la menor reología posible sin comprometer la estabilidad del pozo, puntualmente un valor de punto de cedencia entre 15 – 20 lbf/100pie², y una viscosidad plástica de 28 cp es requerido.

Los pre-flujos bombeados en la operación de cementación como lavadores, espaciadores, agua de mezcla y lechada premezclada fueron preparados en locación verificando sus pesos, volúmenes, reologías, pH y cloruros. Esto con el fin de garantizar un proceso eficiente y minimizar la contaminación de las lechadas cemento. Adicionalmente estos pre-flujos se inhibieron con cloruro de potasio (KCl) en concentración de 7.14 lb/bbl y con surfactantes para dejar las superficies de contacto mojadas al agua. Se utilizan caudales altos de desplazamiento de los fluidos al anular, 12-8-6 barriles por minuto en caída libre y 2 barriles por minuto durante la última etapa de desplazamiento, garantizando así un tiempo de contacto de los pre-flujos mayor a 10 minutos.

Buscando incrementar la eficiencia de los lavadores y espaciadores se utilizó una barrera de doble tapón inferior lo cual permite evitar el contacto de lavadores-espaciadores con el lodo de perforación, así como evitar el contacto de las lechadas de cemento con los lavadores y espaciadores y mejorar la eficiencia de desplazamiento en el anular.

Se registró el rompimiento de los dos tapones inferiores a los 490 barriles de fluido desplazados. Posteriormente se sentó el tapón de desplazamiento con un volumen total de 562 barriles, a una presión final de 550 lb/ pulgada². Se probó el equipo de flotación del revestimiento para garantizar su correcto funcionamiento. Al final de la operación se observa en la unidad de cementación 2,5 barriles de retorno, además de los contantes durante toda la operación. No se registran pérdidas de circulación durante la cementación del pozo.

De acuerdo a los reportes operacionales y el registro de actividades, que pueden verse en la **Tabla 11**, se dio un tiempo de 28 horas para que el cemento desarrollara los esfuerzos compresivos finales y a continuación se re-perforó satisfactoriamente el zapato del revestimiento y la sección de cemento bajo este.⁵³

Tabla 11. Reporte de actividades operación de cementación.

JOB LOG/REPORTE DE ACTIVIDADES					
FECHA: 5 Abril 2015			TRABAJO: Cementación Casing Intermedio 9 5/8"		
HOR A	CAUDAL (bpm - gpm)	VOLUMEN (Bbl)	PRESIÓN (lb/ pulgada2)	PROFUNDIDAD (pie)	DETALLE DE LA OPERACIÓN
3-04-15					
7:00					Llega personal y equipos de cementación al pozo.
9:30					Inicia corrida de revestimiento intermedio de 9 5/8".
10:00					Ubicando equipos, rig up de línea y verificación de materiales.
13:30					Prueba de equipos.
18:00					Se toman parámetros al agua. Cl- = 0 ppm; pH = 7.0
4-04-15					
14:00					Inicia mezcla de pre-flujos y aguas con aditivos para las lechadas.
14:25	418		592	7862	Finaliza corrida de revestimiento, inicia circulación del pozo. Rotando 50 rpm 2363 pie lb
17:30					Se verifican reologías del lodo YP = 20 lbf/100pie2 VP = 28 cP; y espaciador YP = 35 lbf/100pie2 VP = 26 cP
17:45	10		670		Se instala cabeza de cementación con tapones previamente cargados en presencia de CoMan
18:15					Reunión de seguridad y pre operacional de cementación con todo el personal involucrado. Circulando el pozo.
19:05			500/3000		Prueba de línea.
19:15					Inicia Premezcla de 104 Bl de principal 15.8 lpg. Se toman testigos con presencia del Co Man.
20:00					Se libera Bottom Plug.
20:30	5	40	465	7862	Bombeando lavador químico, 8.4 lpg
20:38	5	40	362	7862	Bombeando espaciador mecanico 13.0 lpg
20:46	5	40	448	7862	Bombeando espaciador reactivo 10.2 lpg
20:29	5	10	385	7862	Bombeando espaciador mecanico 13.0 lpg
20:54					Se libera Bottom Plug.
21:19	5	126	570	7862	Bombeando lechada de relleno 13.6 lpg. Se usan 431 sx de cemento clase G.
21:42	5	104	540	7862	Bombeando lechada principal SwipieCem premezclada, 15.8 lpg. Se usan 573 sx de cemento clase G + 219 Sk de cemento Ultrafino
21:43					Se libera Top Plug.
21:47	8	10	162	7862	Desplazando con agua y unidad de cementacion
22:24	12	400	680	7862	Desplazando con lodo y bombas del taladro
22:33	8	80	370	7862	Desplazando con lodo y bombas del taladro. Se observa rompimiento de Bottom Plug
22:42	6	50	350	7862	Desplazando con lodo y bombas del taladro
23:00	2	12	570/2000	7862	Finaliza desplazamiento. Se observa asentamiento del Top Plug. Total Desplazamiento 562 bbl
23:07					Se sostiene la presion por cinco minutos OK. Se reciben de Backflow = 2.5 bbl
23:30					Rig down de lineas de cementacion y lavado de equipos

Fuente: Reporte Final del Servicio de Cementación para Ecopetrol S.A. Empresa Prestadora de Servicios. 2015.

⁵³ Empresa Prestadora de Serivicos. Reporte Final Del Servicio De Cementación Para Ecopetrol S.A. [Electronic(1)]: 2015c.

En concordancia a todo lo expuesto anteriormente acerca de la operación de cementación del revestimiento intermedio de 9 5/8 pulgadas en el pozo de estudio, la compañía prestadora de servicios generó una serie de recomendaciones que se mencionan a continuación.

- Evitar los tiempos estáticos durante la circulación y acondicionamiento del pozo.
- Reciprocarse el revestimiento 5 a 10 pies durante el proceso de acondicionamiento y cementación de la sección, si las condiciones del pozo lo permiten.
- Solucionar en su totalidad las pérdidas de circulación, en caso de que existan, antes de realizar el trabajo de cementación, ya que bajo éste panorama puede verse afectada la calidad de la cementación y el tope requerido para la lechada.
- Desplazar con agua los fluidos del anular para evitar la generación de micro anulares por la variación de presión hidrostática.
- Disponer de registro caliper para estimar el diámetro de hueco.
- Bombear un exceso de mínimo 70% cuando el diámetro exacto del hueco sea desconocido.
- Esperar mínimo 24 horas para re-perforar el equipo de flotación del revestimiento de 9 5/8 pulgadas.
- Realizar la circulación del pozo por encima de la Formación E4 que está compuesta por Lutitas que tienden a lavarse con facilidad. De esta manera se evita que se derrumbe y se agrande el diámetro del hueco en el zapato afectando la integridad del cemento en esta zona.

4.4 RESULTADOS DE LA CEMENTACIÓN

Después de realizar la operación de cementación del revestimiento intermedio del pozo de estudio, se tuvieron en cuenta varias pruebas para evaluar la integridad del cemento, comprobando el éxito de la operación. Esto con el fin de garantizar que la sección soportaría los esfuerzos de la perforación de la fase de producción. Se reconocen tres principales aspectos dentro de la evaluación del cemento realizada, los cuales se exponen a continuación.

4.4.1 Diametro Real del Hueco. Como se ha explicado anteriormente, una de las limitantes de esta operación radicaba en la carencia de un registro caliper que permitiera estimar de manera más precisa el diámetro del hueco para el cálculo de volumen de cemento, eliminar incertidumbre con la centralización, tiempo de contacto de fluidos y velocidades anulares. Es por esto que, para realizar los cálculos volumétricos requeridos en el diseño, se recurrió a considerar el diámetro de la broca (12 1/4" pulgadas) más un 50% de exceso en el volumen de fluidos, lo que garantizaba un diámetro equivalente para el trabajo de 13,37 pulgadas. Con esto se esperaba cubrir la incertidumbre en el volumen anular. La posición de fluidos programada según este diseño otorgaba un valor de stand off de 68%, lo que cumplía con el requerimiento de la empresa que dictaba que el parámetro de

centralización adecuado debía estar por encima del 60%; y proyectaba un tope de cemento de la lechada de relleno en 5.162 pies y de la lechada principal en 6.662 pies.

Posterior a la operación de cementación, se recalculó el diámetro del pozo según las presiones de bombeo registradas contra las presiones de diseño, esto con el fin de verificar la posición de los fluidos en el anular. Según la presión final real de bombeo, el diámetro promedio del hueco fue de 14,28 pulgadas, lo que equivale a tener un 94% de exceso sobre el diámetro de broca. Esto significa que el 50% de exceso bombeado según el diseño de la operación fue insuficiente. Esta nueva condición arroja un valor de stand off real de 53%, por debajo del requerimiento de la empresa operadora; además de un tope de la lechada de relleno en 4.519,6 pies y de la lechada principal en 6.019,6 pies. Esto supone 641,4 pies de error sobre el valor requerido por empresa.

Sin embargo, existe la incertidumbre de la cantidad de fluido que pudo haber migrado a las formaciones del hueco por absorción, lo que significaría una pérdida de volumen de fluido que también dificulta conocer el diámetro exacto del agujero aun realizando cálculos basados en las presiones de bombeo obtenidas durante la operación. En futuras operaciones se recomienda utilizar trazadores que permitan saber, en superficie, como se comportan los fluidos en el fondo del pozo.

La incertidumbre en el diámetro del hueco provocó un cálculo erróneo de los volúmenes requeridos trayendo como consecuencia un error considerable en la posición de los fluidos estimado y en el parámetro de centralización, los cuales son aspectos de gran importancia para garantizar la cementación efectiva de la fase en cuestión.

4.4.2 Pruebas de Presión. El día 14 de abril del 2015 se realizaron dos pruebas de admisión, las cuales, como se describió anteriormente se realizan aumentando la presión del revestimiento, después de re-perforar el zapato, hasta que exceda la presión que será aplicada en este mismo punto durante la siguiente fase de perforación. Si el zapato del revestimiento no soporta la presión aplicada durante la prueba significa que hay una cementación ineficiente y se requerirá de una operación de cementación remedial.

Para la primera prueba se cañoneó el intervalo de 7.490 a 7.495 pies. Comenzó la prueba de presión en directa en sistema cerrado con 500, 1.000 hasta alcanzar las 1500 lb/ pulgada². En la segunda prueba se cañoneó el intervalo de 7.590 a 7.595 pies y se realizó la prueba en directa en sistema cerrado con 500, 1.000, 1.500 hasta las 2.000 lb/ pulgada².

Se alcanza la presión máxima en superficie sin registrar admisión, siendo esto un resultado del aislamiento hidráulico del pozo.⁵⁴ Sin embargo, no es prueba suficiente de la presencia de los sellos necesarios para garantizar el pozo.

4.4.3 Registro de Evaluación del Cemento. El día 10 de abril de 2015 se realizó la toma del registro de evaluación de cemento en el revestimiento intermedio de 9 5/8" desde 7.860 pies hasta 5.100 pies. Este registro fue tomado 137 horas después del trabajo de cementación. Consta de un registro gamma ray básico, el cual provee las bases para identificar los minerales y diferentes tipos de formaciones presentes en el anular, así como su aplicación Casing Collar Locator (CCL) que permite hacer una correlación de profundidad por medio de la detección del cambio de densidad del metal en el collar donde se unen dos tubos. Adicionalmente, contiene un set de registros acústicos de evaluación del cemento, entre estos el Cement Bond Log (CBL) que mide la adherencia del cemento; e incluye una curva de tiempo de tránsito, amplitud e índice de adherencia. Sumado a este se tiene el Variable Density Log (VDL) que indica la presencia y consistencia del fluido entre la tubería y la formación; este incluye las curvas de impedancia máxima, mínima y promedio. Y por último se tiene el registro de evaluación de cemento por pulso ultrasónico que provee un mapa de impedancias que evidencia la disposición del cemento alrededor de la tubería y los porcentajes de los distintos fluidos presentes en el anular.

Al obtener los resultados del registro se puede evidenciar una muy baja calidad de la cementación. En general, el registro evidencia presencia del cemento en todo el hueco abierto registrado, pero muestra promedios muy por debajo de los parámetros de calidad establecidos por la empresa. Se observan amplitudes en promedio, a lo largo de los aproximadamente 2.800 pies registrados, de 30 milivoltios. Este parámetro debe ser menor o igual a 10 mv para pozos inyectoros, según lo establecido por la empresa operadora. El índice de adherencia arroja valores en promedio menores al 40%, los cuales, para garantizar un sello hidráulico aceptable, deben ser mínimo del 80%.

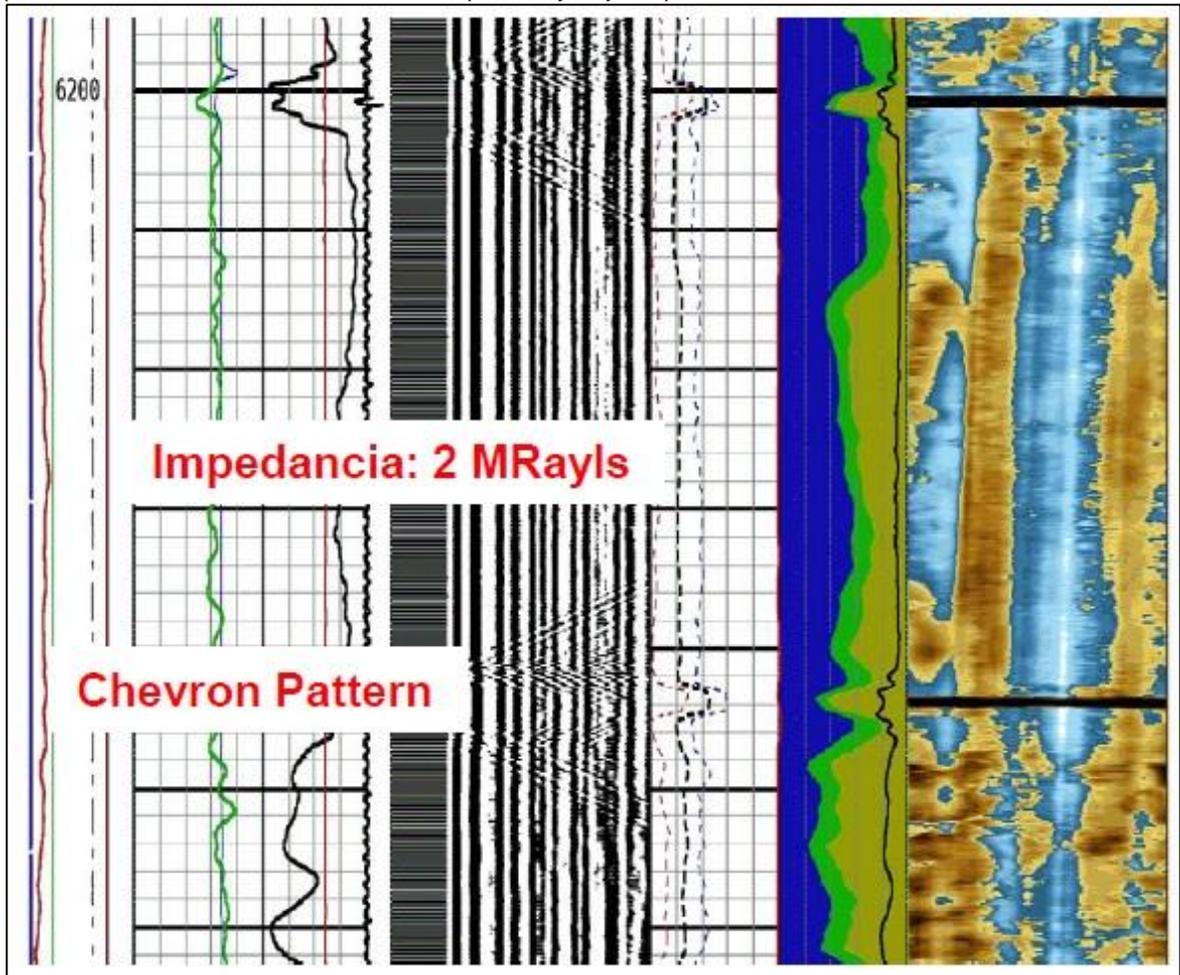
Adicionalmente, se observan en numerosos intervalos (6203 pies a 6246 pies aproximadamente) amplitudes muy cercanas 50 mV, valor inaceptable, sumado a la falta de arribos claros de formación en el VDL, lo que evidencia tubería libre además de poder identificar claramente el efecto de la conexión de revestimiento (chevron pattern) que muestra una marca en el mapa que apoya la conclusión de una tubería libre vibrando libremente en respuesta el estímulo del registro.

Por otro lado, la impedancia acústica muestra un valor aproximado de 2 Mrayls, el cual debería ser mínimo de 4 Mrayls para indicar la presencia de un sólido en el anular, ya que la impedancia acústica de la lechada de cemento bombeada al pozo es de 4,8 Mrayls, y en el mapa de impedancias se pueden apreciar claros canales

⁵⁴ Empresa Prestadora de Servicios. Reporte Final Del Servicio De Cementación Para Ecopetrol S.A. [Electronic(1)]: 2015c. P. 21.

de flujo a lo largo de toda la sección registrada, empeorando a mayor profundidad, donde el cemento debería tener la mejor calidad posible. Lo anterior puede verse en la **Figura 64**.⁵⁵

Figura 64. Sección del registro de evaluación de cementación del revestimiento intermedio en el pozo de estudio. Evidencia de chevron pattern y baja impedancia acústica.



Fuente: Investigación Incidente Pozo de Estudio. Lecturas de Registros de Evaluación de Cementación. Ecopetrol S.A. 2015.

Debido a la baja calidad del cemento, la empresa Ecopetrol S.A emprendió una investigación para determinar las causas de los malos resultados obtenidos.

En primer lugar, se llevaron a cabo pruebas al cemento en laboratorio bajo varios escenarios posibles de contaminación para comprobar si las propiedades del fluido cambiaron durante la corrida del registro. Estas pruebas se realizaron con 10%, 20%, 30% y 50% de contaminación para determinar cambios en el comportamiento

⁵⁵ Ecopetrol S.A. Investigación Incidente Pozo De Estudio: Lecturas De Registros De Evaluación De Cementación. [Electronic(1)]: 2015. P. 5-9.

de la lechada durante el tiempo. Es el factor que más afecta el desempeño de la lechada de cemento durante las pruebas realizadas. Sin embargo, no se tiene certeza de que sea el único que afectó la calidad de la cementación analizada en el presente caso.

Los tiempos que se tomaron para realizar las operaciones posteriores a la cementación (limpieza, drillout, cambio de fluido) son los reportados por la prueba ultrasónica de laboratorio para un cemento sin contaminación. De acuerdo a la investigación post-operación, se observa que el porcentaje de contaminación con el que se deberían correr estas pruebas es de al menos 20%, con el fin de determinar los tiempos reales para que el cemento adquiera la compresibilidad mínima de 1.000 lb/ pulgada² y poder realizar las operaciones posteriores a la cementación, y de esta forma reducir daño en la adherencia del cemento.

En segunda instancia, se consideró que el registro de evaluación pudiera presentar problemas de calibración o interferencia. Es por esto que se realiza una revisión del registro tomado usando archivos generados en tiempo real por el sistema de adquisición de la empresa. Realizadas todas las comprobaciones necesarias, se encontró evidencia que el registro se adquirió con los parámetros correctos y que los datos utilizados para realizar la calibración de las herramientas fueron los adecuados. Adicional a esto, se pone en consideración la posible afectación que puede haber causado en la toma del registro el hecho de que, al momento de registrar la sección, ya se había realizado re-perforación del zapato de 9 5/8 pulgadas, lo cual siempre influye en los registros sónicos/ultrasónicos derivado de los esfuerzos aplicados al revestimiento durante esta operación.

Por último, se analiza la probabilidad de la presencia de un micro anular derivado del cambio de densidad al momento del registro, el efecto de un micro anular impacta negativamente la calidad del mismo.⁵⁶ La densidad actual en el pozo con la cual se corrió el registro es de 9 lpg, mientras que la densidad durante la espera de fragüe (WOC) es de 12 lpg, esto resulta en un diferencial de aproximadamente 1.200 lb/ pulgada² de presión. Sin embargo, después de numerosas pruebas y correlaciones no se puede concluir en que esta sea la causa de los malos resultados de cementación.

Con el fin de cumplir con los requerimientos exigidos por el departamento de yacimientos de la empresa operadora para la cementación de pozos inyector, garantizando los sellos mínimos que aseguren la integridad de las operaciones posteriores al acondicionamiento y completamiento del pozo; se recurrió a realizar una operación de cementación remedial con el fin de generar un sello hidráulico en el espacio anular entre el hueco abierto perforado con broca de 12 ¼ pulgadas y el revestimiento de 9 5/8 pulgadas, por medio de una cementación remedial por

⁵⁶ JUTTEN, J. J. y HAYMAN, A. J. Microannulus Effect on Cementation Logs: Experiments and Case Histories. [Print(0)]: Society of Petroleum Engineers, 1993. 978-1-55563-497-1. P. 4.

circulación. Se cañonearon los intervalos (7.595 pies a 7.590 pies) y (7.495 pies a 7.490 pies), para establecer circulación entre estos perforados y bombear una lechada de 16.0 lpg mezclada con cemento micro fino, controlador de filtrado y retardador suficiente para garantizar la realización del trabajo de manera segura.⁵⁷

La empresa Ecopetrol S.A al comparar el diseño del cemento, el régimen de pruebas del mismo, y los procedimientos operacionales ejecutados concluye que las consideraciones de diseño fueron adecuadas para las condiciones del pozo, así como los requerimientos técnicos de la empresa operadora. El personal y los equipos utilizados fueron competentes para desempeñar el servicio. Se imprimieron esfuerzos en realizar el trabajo de acuerdo al diseño aprobado, buscando minimizar los tiempos no productivos (NPT) o impactos al plan de seguridad (HSE). Adicionalmente, se realizaron controles de calidad a la operación y a los fluidos sin presentar ninguna clase de inconveniente. Se confirmó la aplicación y consideración de las mejores prácticas durante la operación, siendo el movimiento de la tubería la única práctica sin aplicar.

Por lo tanto, se recomienda para futuras operaciones, aplicar nuevas técnicas que involucren el movimiento de la tubería para mejorar el desplazamiento de los fluidos en el anular, brindar una mejor limpieza evitando así la contaminación de las lechadas, lo que puede causar zonas sin cemento; y mejorando sustancialmente la centralización (parámetro de stand off) para garantizar una cementación uniforme y sin inconvenientes.

⁵⁷ Empresa Prestadora de Servicios. Diseño Del Servicio Cementación Remedial. [Electronic(1)]: 2015b.

5. EJECUCIÓN, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

En el presente capítulo se describen detalladamente las simulaciones realizadas, para tres casos distintos con parámetros variables, con el objetivo de evaluar la aplicación de la técnica de cementación dinámica durante una operación de cementación ideal. Con esto, dando cumplimiento al cuarto y quinto objetivos planteados para el presente trabajo.

La operación a simular es la cementación del revestimiento intermedio de 9 5/8 pulgadas en un pozo inyector. Para ello se mantuvieron idénticos el estado mecánico, diseño de revestimiento, sistemas de fluidos, diseño de centralización, jerarquía reológica, programa de bombeo, entre otras. Sin embargo, se realizaron variaciones en el parámetro de rotación del revestimiento durante el tiempo de bombeo de los pre-flujos y la lechada al pozo.

La simulación fue generada en el software iCem[®] de la empresa Halliburton. El programa está basado en la dinámica computacional de los fluidos y el análisis de elementos finitos, permitiendo evaluar y optimizar los diseños de operaciones de cementación. Este sistema ayuda a reducir la complejidad a la hora de lograr un sello anular confiable. Tiene en cuenta el efecto de la variación de parámetros como el desplazamiento del lodo, las propiedades de la lechada, el movimiento y centralización de la tubería, volúmenes de fluidos, tasas de bombeo y los diferenciales de presión y temperatura; logrando así optimizar el posicionamiento del cemento y el diseño de esfuerzos, para asegurar la vida del pozo.

La simulación fue corrida en las oficinas de Halliburton Bogotá por ingenieros especialistas en el software, en un tiempo de quince días. Los informes de resultados fueron entregados a los autores del presente trabajo para su análisis e interpretación.

5.1 INFORMACIÓN BÁSICA INGRESADA

Como ya se explicó, la información utilizada para el pozo simulado es la réplica de la data operacional del pozo de estudio descrito en el Capítulo 4. Para cada caso se varió la rotación únicamente. La información básica ingresada al simulador sobre el pozo en cuestión, se expone a continuación.

5.1.1 Generalidades. La **Tabla 12**, abarca los parámetros generales acerca de la localización, volúmenes, tipo de trabajo, entre otros.

Tabla 12. Información general del pozo simulado.

<i>Tipo De Trabajo</i>	Trabajo de Cementación Primaria
<i>Trayectoria de Inyección</i>	Convencional/Casing
<i>Trabajo Espumado</i>	No
<i>Volumen de Tubería</i>	581.82 bbl
<i>Volumen Anular</i>	638.85 bbl
<i>Volumen en Superficie</i>	0.34 bbl

Fuente: Caso Base de Simulación: Cementación Casing Intermedio 9 5/8". Halliburton. 2016.

5.1.2 Esquema de Bombeo. En la **Tabla 13**, se aprecia el programa de bombeo con l densidad, caudal, punto de cedencia, volumen y tiempo de bombeo, entre otras características para todos los fluidos del pozo.

Tabla 13. Programa de bombeo del pozo simulado.

Descripción	Densidad (lpg)	Caudal (bbl/min)	Cedencia (pie ³ /sack)	Req. Agua (gal/saco)	Volumen (bbl)	Cemento Seco (sacos)	Tiempo (min)
Lodo Sección Intermedia	12.00	12.00			0.00		0.00
Tapón de Fondo							
Lavador Químico	8.40	5.00			40.00		8.00
Espaciador Mecánico	13.00	5.00			40.00		8.00
Espaciador Reactivo	10.20	5.00			40.00		8.00
Espaciador Mecánico	13.00	5.00			10.00		2.00
Tapón de Fondo							
Lechada de Relleno	13.60	5.00	1.6467	8.623	125.51	427.93	25.10
Lechada Principal	15.80	5.00	1.0220	4.320	103.70	569.71	20.74
Tapón Superior							
Agua	8.33	8.00			10.00		1.25
Lodo Intermedio	12.00	12.00			400.00		33.33
Lodo Intermedio	12.00	8.00			100.00		12.50
Lodo Intermedio	12.00	6.00			50.00		8.33
Agua	8.33	2.00			18.52		9.26
				Total:	937.73		136.52

Fuente: Caso Base de Simulación: Cementación Casing Intermedio 9 5/8". Halliburton. 2016.

5.1.3 Información Final de Fluidos 2D. Basada en la simulación en dos dimensiones, brinda información como volumen bombeado, presiones finales, entre otras. Puede verse en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Información final de fluidos.

<i>Tiempo</i>	136.71 min
<i>Volumen Bombeado</i>	938.1 bbl
<i>Presión en Superficie</i>	854.49 lb/ pulgada ²
<i>Caudal de Bombeo</i>	2.00 bbl/min
<i>Profundidad Total de Hueco</i>	7862.0 pie
<i>Presión</i>	4805.78 lb/ pulgada ²
<i>ECD</i>	12.70 lpg
<i>Densidad</i>	15.80 lpg

Fuente: Caso Base de Simulación: Cementación Casing Intermedio 9 5/8". Halliburton. 2016.

5.1.4 Resumen Hidráulico. En esta sección, se muestran los valores de resumen hidráulico de la zona cementada. Se conoce que la profundidad del reservorio es de 7862.0 pies, y el potencial de flujo de la zona es 0.77. Basado en el análisis de las condiciones previamente expuestas, se considera que el pozo está en un rango favorable, ya que el valor del potencial de flujo después del posicionamiento de la lechada es menor a uno, lo que indica que no existen problemas por flujo desde o hacia el anular.

5.1.5 Información de la Formación. En la **Tabla 15**, mostrada a continuación, se mencionan los datos relevantes sobre la formación de interés.

Tabla 15. Caracterización de la formación de interés.

<i>Profundidad Medida (MD)</i>	7862.0 pies
<i>Profundidad Vertical Verdadera (TVD)</i>	7283.0 pies
<i>Presión de Poro</i>	3160.2 lb/ pulgada ²
<i>Gradiente del Reservorio</i>	0.434 lb/ pulgada ² /pie
<i>Densidad del Reservorio</i>	8.35 lpg
<i>Presión de Fractura</i>	5477.02 lb/ pulgada ²
<i>Gradiente de Fractura</i>	0.752 lb/ pulgada ² /pie
<i>Densidad de Fractura</i>	14.48 lpg

Fuente: Caso Base de Simulación: Cementación Casing Intermedio 9 5/8". Halliburton. 2016.

5.2 CASOS DE SIMULACIÓN

Para este trabajo, se realiza una simulación de un pozo inyector gemelo al pozo de estudio expuesto en el Capítulo 4. Se tienen en cuenta todos los parámetros con los cuales fue llevada a cabo la operación de cementación primaria del revestimiento intermedio de 9 5/8 pulgadas y se ingresan al software para tomarlos como base del pozo sobre el cual se corren los casos diseñados para el análisis.

Partiendo de esto, se realizan tres casos de simulación. El primero, *Caso Base*, representa el pozo de estudio manteniendo constantes todos los parámetros técnicos con los que fue realizada la operación de cementación real. Esto con el fin de obtener un punto de comparación semejante entre la cementación convencional real y los siguientes casos de simulación. El segundo, *Caso 1*, mantiene las características del Caso Base, pero se aplica un parámetro de rotación de 20 RPM con el fin de simular la aplicación de la técnica de cementación dinámica. Y el último caso, *Caso 2*, es igual al Caso Base, pero esta vez aplicando una rotación de 40 RPM.

Adicionalmente, se realizó la simulación de dos casos adicionales que no serán estudiados por cuestiones de practicidad del presente trabajo. El primero, que llamaremos *Caso 1X*, representa el pozo de estudio aplicando los parámetros de rotación del *Caso 1* pero adicionando un parámetro de recíprocaje de 10 pies; y el segundo, llamado *Caso 2X*, representa el pozo de estudio, aplicando el parámetro de rotación del *Caso 2* pero recíprocando 10 pies la tubería.

Estos casos no serán tomados en cuenta para el presente análisis debido a que los resultados obtenidos en la simulación no son significativos en comparación con el caso respectivo de rotación, como se muestra en la **Tabla 16**. Por otra parte, se considera que aplicar un parámetro de recíprocaje a la operación, conlleva numerosos riesgos como un incremento en los esfuerzos de torque y arrastre, lo que puede generar desgaste o mal funcionamiento de los equipos y herramientas tanto en subsuelo como en superficie. O pueden generar problemas por pega de tubería, lo que ocasiona un incremento en gastos y tiempo operacional que no es beneficioso para la empresa. Es por esto que no es recomendable recíprocar la tubería. Aplicando únicamente la rotación que se analiza en el presente capítulo se obtienen los resultados requeridos sin someter la operación a riesgos adicionales.

La **Tabla 16** muestra una comparación entre los casos explicados anteriormente. En ella se puede ver que entre los casos 1 y 1X; y los casos 2 y 2X, la variación porcentual en la disposición de las lechadas de cemento en las profundidades de referencia es menor al 1%. Reforzando así la recomendación de no recíprocar la tubería debido a que los beneficios obtenidos son menores que los riesgos a los que se expone la operación. Por lo tanto, el análisis a profundidad será realizado para los casos 1 y 2 únicamente.

Tabla 16. Disposición porcentual de las lechadas de cemento a las profundidades de referencia,

EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO A LAS PROFUNDIDADES DE REFERENCIA						
	Caso 1			Caso 2		
	20 RPM			40 RPM		
	Lechada Lead (%)	Lechada Tail (%)	Total (%)	Lechada Lead (%)	Lechada Tail (%)	Total (%)
Tope de Cemento por Simulación	29.82	50.79	80.61	30.80	50.59	81.39
Tope Teórico Lechada Tail	26.93	73.03	99.96	24.45	75.51	99.96
Zapato Casing 9 5/8	20.00	79.96	99.96	18.72	81.25	99.97
	Caso 1X			Caso 2X		
	20 RPM Y RECIPROCANDO			40 RPM Y RECIPROCANDO		
	Lechada Lead (%)	Lechada Tail (%)	Total (%)	Lechada Lead (%)	Lechada Tail (%)	Total (%)
Tope de Cemento por Simulación	26.04	53.97	80.01	24.52	57.23	81.75
Tope Teórico Lechada Tail	17.92	82.07	99.99	10.42	89.56	99.98
Zapato Casing 9 5/8	20.4	79.6	100	19.28	80.68	99.96

Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

La información arrojada por el simulador es básicamente un perfil hidráulico en dos dimensiones, un perfil de desplazamiento de fluidos en tres dimensiones, información de jerarquía reológica y standoff.

Para el análisis en el presente capítulo, se presentan los gráficos y tablas de datos para los parámetros standoff y eficiencia de desplazamiento. Además de esto, las imágenes del pozo en tres dimensiones que arroja el simulador con cortes a las profundidades más relevantes mostrando la distribución de los fluidos. Estos cortes fueron realizados en el tope teórico de la lechada principal, en el tope de la lechada de relleno y en el zapato del revestimiento. Estos son los puntos que, de tener una cementación eficiente, se cree asegurarían la integridad del pozo. En el análisis de resultados se puede observar como varían las condiciones para cada caso según estas mismas profundidades de referencia, las cuales permiten hacer una comparación válida con las condiciones más parecidas posibles.

Gracias a estos parámetros, al final del presente capítulo se podrá escoger el caso de simulación que mejor se ajuste a los requerimientos de la empresa y de la operación, según los resultados arrojados por el simulador y la teoría explicada anteriormente. De esta forma se puede continuar con la comparación entre la operación de cementación real y la propuesta de cementación dinámica.

A continuación, se realiza el análisis comparativo entre los casos de simulación partiendo de las secciones de estudio explicadas anteriormente.

5.3 STANDOFF Y EFICIENCIA DE DESPLAZAMIENTO

En esta sección se presentan los resultados arrojados por el simulador por medio de una tabla generada a partir de las condiciones de diseño ingresadas al simulador y la estimación del comportamiento de los fluidos y el revestimiento durante la operación.

Esta tabla consta de cuatro columnas de datos. La primera, presenta los datos de profundidad medida (MD), desde superficie hasta la profundidad en la que se encuentra el zapato del revestimiento intermedio de 9 5/8 pulgadas, que es la sección de interés del presente trabajo. La segunda, muestra los datos de eficiencia total de desplazamiento en porcentaje, que indica qué tan eficiente fue la limpieza que realizó cada fluido al pozo hasta el posicionamiento del cemento y a partir de esta se puede deducir el porcentaje de cemento y contaminante que se tiene a lo largo del anular y en una profundidad de referencia. Este parámetro está íntimamente relacionado con la jerarquía y características reológicas de los fluidos bombeados. La tercera columna contiene la información de desviación del pozo a medida que se va profundizando. Esta información se ingresa al simulador por medio del perfil direccional del pozo de estudio perforado previamente. En caso de no disponer de un resumen direccional real, la información se puede estimar a partir de las coordenadas de profundidad intermedias y finales del pozo. Finalmente, en la última columna, se expone información sobre el parámetro de centralización del revestimiento (standoff) con respecto a la profundidad. Este dato es de gran importancia en la presente investigación, como fue explicado en el Capítulo 3, ya que indica qué tan centrado se encuentra el revestimiento con respecto a la pared del hueco. Para el simulador iCem[®], los valores de standoff varían porcentualmente, siendo el 0% una tubería totalmente centralizada y el 100% una tubería totalmente recostada contra las paredes del pozo. A continuación, se realiza el análisis de la información resultante en esta sección para los tres casos de simulación y las tres profundidades de referencia.

5.3.1 Caso Base. Como ya se ha explicado, este caso es la representación de la operación de cementación real del pozo de estudio. La información obtenida en el simulador es presentada en la **Tabla 17**.

La empresa operadora solicitó en el diseño de la operación de cementación para esta fase que la disposición de fluidos quedara con 1.200 pies de longitud en el anular de lechada principal y 1.500 pies de longitud en el anular de lechada de relleno. Debido a esto, y con base a la profundidad del zapato del revestimiento, se esperaba tener el tope de cemento de la lechada principal a 6.662 pies y el de la lechada de relleno a 5.162 pies. Al examinar estas profundidades en la tabla, se puede evidenciar una eficiencia de desplazamiento de aproximadamente 82% y 60% respectivamente.

Tabla 17. Eficiencia de desplazamiento y standoff para el Caso Base.

CASO BASE (SIN ROTACIÓN)			
Profundidad MD	Eficiencia Total de Desplazamiento	Desviación Aproximada	Standoff Aproximado
<i>(pies)</i>	<i>(%)</i>	<i>(°)</i>	<i>(%)</i>
0.00	0.00	0.00	0
326.45	0.00	0.00	0
652.90	0.00	1.53	0
979.35	0.00	4.79	0
1,305.80	0.00	6.00	0
1,632.25	0.00	3.68	0
1,958.70	0.00	0.41	0
2,285.15	0.01	0.00	0
2,611.60	0.06	0.00	0
2,938.05	0.43	0.00	0
3,264.50	4.62	0.00	0
3,590.95	10.41	0.00	0
3,917.40	14.01	0.00	0
4,243.85	17.58	0.00	0
4,570.30	27.47	0.00	0
4,896.75	48.23	0.00	0
5,223.20	61.26	7.18	6,372
5,549.65	72.77	15.34	41,964
5,876.10	76.87	23.50	69,792
6,202.55	79.22	31.66	82,02
6,529.00	82.97	39.82	79,812
6,855.45	89.34	47.99	77,244
7,181.90	96.76	50.00	69,972
7,508.35	99.98	50.00	78,648
7,834.80	99.99	50.00	78,54
7,862.00	99.99	50.00	79,5

Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

El porcentaje de eficiencia de desplazamiento obtenido en el tope de cemento de la lechada de relleno indica que en esa profundidad se tendría aproximadamente una concentración de contaminantes del 40%. Esto trae como consecuencia la generación de canales de cemento y problemas de integridad en el pozo.

En el caso del tope de la lechada principal, una eficiencia de desplazamiento del 82% es un valor aceptable. Sin embargo, no garantiza un sello hidráulico efectivo según lo requerido por la compañía, ya que tendría un 18% de concentración en contaminantes, lo que podría causar una mala cementación en este punto. Hecho que, por la cercanía al zapato del revestimiento, podría generar problemas de integridad a futuro, requiriendo trabajos remediales posteriores.

Con respecto a la profundidad del zapato de revestimiento, la eficiencia de desplazamiento es del 99,9%. Este valor es constante en todos los casos, debido a que los cálculos del simulador son ideales y no consideran condiciones adversas. Por lo tanto, está directamente ligado al flujo axial, el cual genera una buena limpieza en este punto ya que los fluidos bombeados, al salir de la tubería hacia el anular, impactan directamente y con fuerza en los contaminantes allí alojados.

Con respecto al parámetro de centralización (standoff), en la tabla se puede apreciar que en las profundidades más importantes; es decir, las que requieren mejor calidad de cemento, los valores son elevados empezando en los 6.200 pies con un valor máximo de 82% y manteniéndose en un promedio de 77% hacia el zapato. Este valor, como se ha venido explicando, es de gran importancia tanto para la limpieza del pozo como para el emplazamiento del cemento en el espacio de flujo estrecho y del lado amplio del anular. Por lo tanto, se infiere que desde los 6.200 pies hasta el zapato del revestimiento de 9 5/8, se genera un área del espacio anular estrecha, lo cual dificulta la limpieza del pozo y el flujo de cemento hacia esta sección. Las consecuencias de este efecto son la posible contaminación del cemento por la pobre limpieza del lodo, espaciador y lavador. Por esta razón se esperaría un tope de cemento más bajo en el lado estrecho del anular y canales de flujo causados por la contaminación. Bajo estas condiciones es difícil asegurar una buena integridad del pozo, y teniendo en cuenta que es un pozo inyector, un buen sello es esencial para la operación del mismo. Es claro que el parámetro standoff aumenta con respecto a la inclinación del pozo por las razones expuestas en capítulos anteriores.

5.3.2 Caso Uno (1). Este caso es la representación de la operación de cementación real del pozo de estudio, aplicando un parámetro de rotación de 20RPM para simular la aplicación de la técnica de cementación dinámica. La información obtenida en el simulador es presentada en la **Tabla 18**.

A las profundidades estudiadas para el Caso Base, las eficiencias de desplazamiento presentan una mejoría sustancial. Para la profundidad del zapato del revestimiento, como ya se había explicado, la eficiencia de desplazamiento tiene un valor alto 99,95% ya que en este punto el flujo y la ubicación de la tubería permite el desplazamiento total de los fluidos precedentes.

Debido al efecto de la presencia de contaminantes en el anular, o al efecto de los espacios de flujo irregulares causados por una baja centralización del revestimiento, para este caso, el tope teórico de la lechada de relleno es a una profundidad de 5.985 pies, con una eficiencia de desplazamiento de 80% aproximadamente. Para el tope teórico de la lechada principal, que se mantiene a profundidad constante, el valor obtenido es de 99,96%.

Tabla 18. Eficiencia de desplazamiento y standoff para el Caso 1.

CASO 1. ROTANDO 20 RPM			
Profundidad MD	Eficiencia Total de Desplazamiento	Desviación Aproximada	Standoff Aproximado
(pie)	(%)	(°)	(%)
0.00	0.00	0.00	0
326.45	0.00	0.00	0
652.90	0.00	1.53	0
979.35	0.00	4.79	0
1,305.80	0.00	6.00	0
1,632.25	0.00	3.68	0
1,958.70	0.00	0.41	0
2,285.15	0.00	0.00	0
2,611.60	0.00	0.00	0
2,938.05	0.00	0.00	0
3,264.50	0.00	0.00	0
3,590.95	0.00	0.00	0
3,917.40	0.00	0.00	0
4,243.85	0.40	0.00	0
4,570.30	2.34	0.00	0
4,896.75	4.07	0.00	0
5,223.20	12.15	7.18	5,31
5,549.65	55.37	15.34	34,97
5,876.10	75.20	23.50	58,16
6,202.55	87.56	31.66	68,35
6,529.00	99.96	39.82	66,51
6,855.45	99.95	47.99	64,37
7,181.90	99.95	50.00	58,31
7,508.35	99.95	50.00	65,54
7,834.80	99.95	50.00	65,45
7,862.00	99.95	50.00	66,25

Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

El standoff comienza a ascender desde una profundidad de aproximadamente 5200 pies para llegar a un valor promedio de 63% hasta la profundidad de asentamiento del zapato del revestimiento de 9 5/8 pulgadas.

La variación de los valores de eficiencia de desplazamiento entre el Caso Base y el presente caso, para la profundidad de referencia del tope de la lechada de relleno es del 25%; para el tope de cemento de la lechada principal es del 18% y el stand off disminuye 18% en el caso de la rotación. Estos valores demuestran los beneficios de la técnica de cementación dinámica, enunciados en el Capítulo 3.

5.3.3 Caso Dos (2). Este caso es la representación de la operación de cementación real del pozo de estudio, aplicando un parámetro de rotación de 40RPM para simular la aplicación de la técnica de cementación dinámica. La información obtenida en el simulador es presentada en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Eficiencia de desplazamiento y standoff para el Caso 2.

CASO 2. ROTANDO 40 RPM			
Profundidad MD	Eficiencia Total de Desplazamiento	Desviación Aproximada	Standoff Aproximado
<i>(pie)</i>	<i>(%)</i>	<i>(°)</i>	<i>(%)</i>
0.00	0.00	0.00	0
326.45	0.00	0.00	0
652.90	0.00	1.53	0
979.35	0.00	4.79	0
1,305.80	0.00	6.00	0
1,632.25	0.00	3.68	0
1,958.70	0.00	0.41	0
2,285.15	0.00	0.00	0
2,611.60	0.00	0.00	0
2,938.05	0.00	0.00	0
3,264.50	0.00	0.00	0
3,590.95	0.00	0.00	0
3,917.40	0.00	0.00	0
4,243.85	0.00	0.00	0
4,570.30	0.00	0.00	0
4,896.75	0.02	0.00	0
5,223.20	2.14	7.18	5,841
5,549.65	22.49	15.34	38,467
5,876.10	73.68	23.50	63,976
6,202.55	99.45	31.66	75,185
6,529.00	99.97	39.82	73,161
6,855.45	99.96	47.99	70,807
7,181.90	99.97	50.00	74,141
7,508.35	99.97	50.00	72,094
7,834.80	99.97	50.00	71,995
7,862.00	99.97	50.00	72,875

Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

En este caso, las eficiencias de desplazamiento tienen valores muy cercanos al Caso 1, pero mucho mejores que los del Caso Base. En la profundidad del zapato del revestimiento, la eficiencia de desplazamiento se mantiene prácticamente constante con un valor de 99,97%. El tope teórico de la lechada de relleno, debido a las razones expuestas en el caso anterior, se encuentra a una profundidad de 5.931 pies, con una eficiencia de desplazamiento de 82% aproximadamente. Para el tope teórico de la lechada principal, que se mantiene a profundidad constante, el valor obtenido es de 99,97%.

El standoff comienza a ascender desde una profundidad de aproximadamente 5200 pies para llegar a un valor promedio de 71% hasta la profundidad de asentamiento del zapato del revestimiento de 9 5/8 pulgadas.

La variación de los valores de eficiencia de desplazamiento entre el Caso 1 y el presente caso, son menores al 2%, lo que los hace imperceptibles. Sin embargo, al compararlos con los del Caso Base, se tienen variaciones de 27% para la profundidad de referencia del tope de la lechada de relleno, para el tope de cemento de la lechada principal se mantiene constante en 18% y el stand off disminuye 9%. En este caso se siguen demostrando las mejoras al aplicar la rotación. Por otro lado, se puede evidenciar que la variación entre los casos de rotación a 20 RPM y 40 RPM no es significativa.

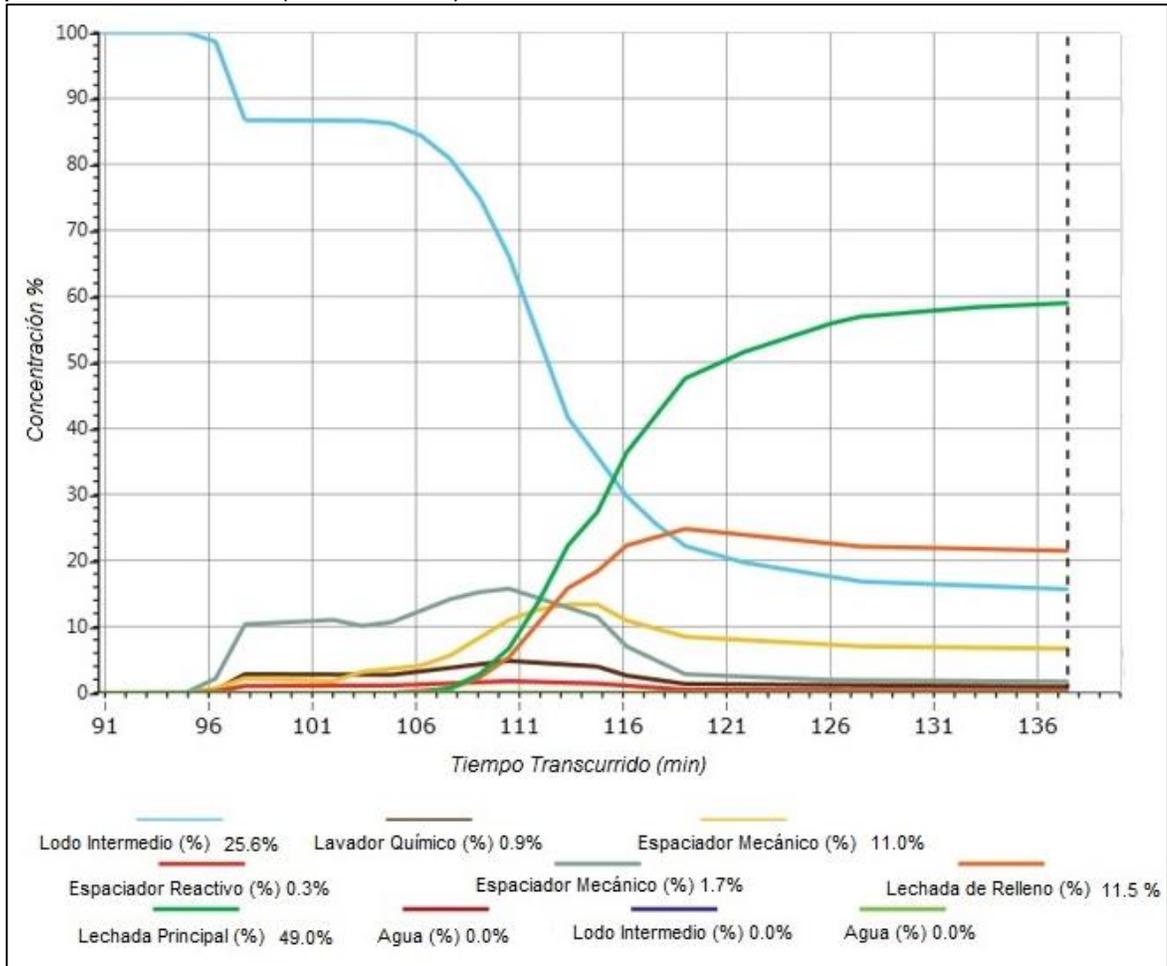
5.4 CONCENTRACIÓN DE FLUIDOS

Los gráficos que se muestran en esta sección, permiten conocer la concentración de cada fluido. Se tienen para cada corte transversal del pozo a las profundidades de referencia, lo cual permite inferir la presencia de contaminantes en el cemento que posteriormente serán protagonistas en los canales detrás del anular que afectan la integridad del pozo. La información es demostrada en función del tiempo, así que, el comienzo de esta curva indica el tiempo que tardan los fluidos en llegar a este punto del anular y el final de la curva indica el momento en el que se han terminado de bombear todos los fluidos al pozo. Por lo tanto, se deduce que en el momento en que se detiene el bombeo los fluidos ya han sido emplazados y la concentración que se tenga en ese punto no debería cambiar hasta el fragüe del cemento.

Como se efectuó para la sección anterior, en ésta también se realiza una comparación de las gráficas de concentración de fluidos para los tres casos a las profundidades de referencia consideradas en este capítulo. De esta manera se pretende determinar si la rotación aplicada al revestimiento durante la operación impacta positivamente a los resultados o no es un factor de variación significativa.

5.4.1 Caso Base. Para este caso se generan tres gráficas de concentración de fluidos. La primera, al tope de la lechada de relleno (5.162 pies) como se muestra en la **Figura 65**.

Figura 65. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada de relleno @ 5162 pies MD. Caso Base (Sin Rotación).

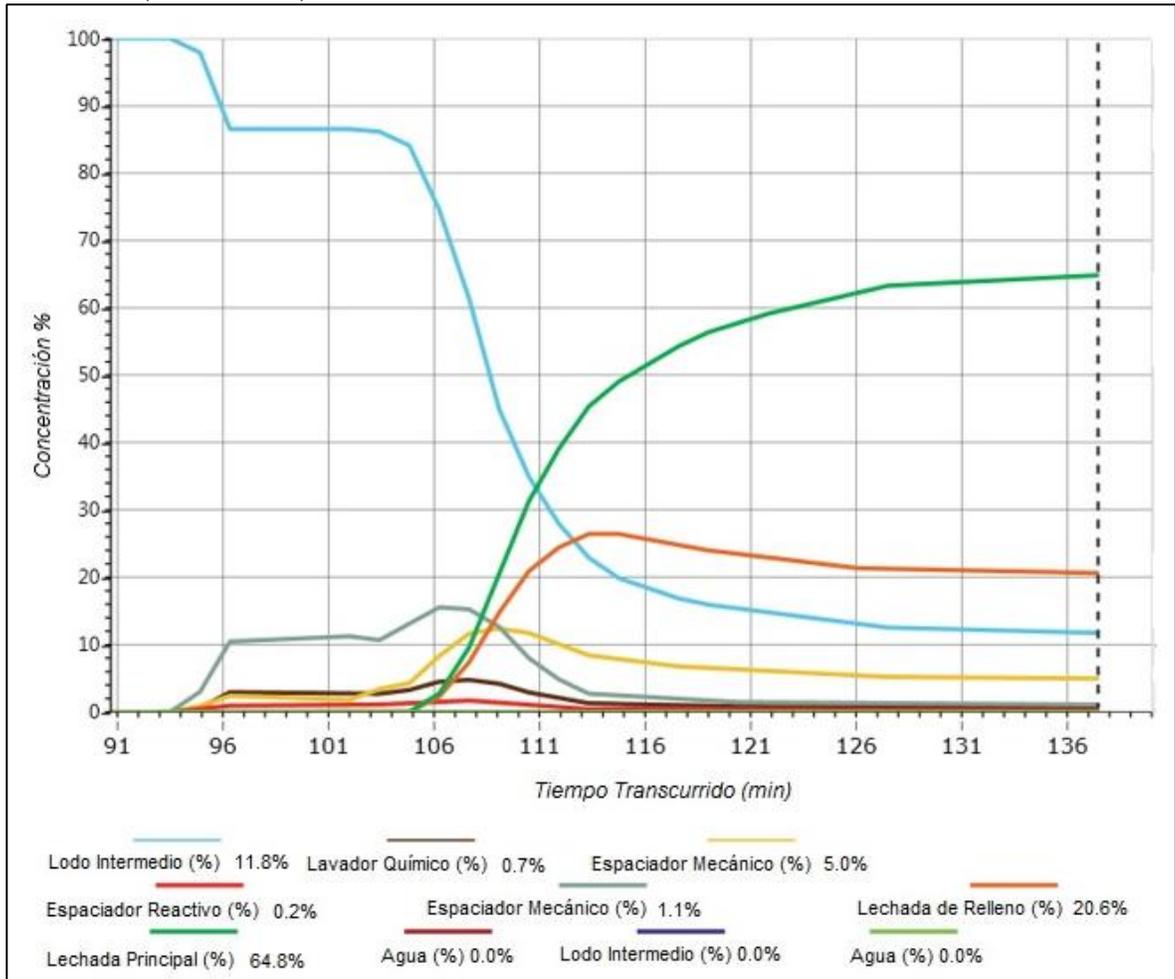


Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

La gráfica muestra la concentración de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 5.162 pies, profundidad a la cual se encuentra el tope de la lechada de cemento de relleno que se tendría al final de la operación. Al observar los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo, se puede ver que finalmente a esta profundidad se tendrá 49% de lechada principal, 11.5% de lechada de relleno, 25.6% de lodo de perforación remanente en el pozo, 11.0% de espaciador mecánico, 0.9% de lavador químico, y 0,3% de espaciador reactivo.

Estos valores de concentración indican claramente que aproximadamente el 40% de la concentración en este punto son contaminantes que finalmente generan canales de flujo a través del cemento, lo que afecta la integridad del pozo. La segunda gráfica, se genera para el tope de la lechada de cemento principal (6662 pies) como se puede ver en la **Figura 66**.

Figura 66. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada principal @ 6662 pies MD. Caso Base (Sin Rotación).



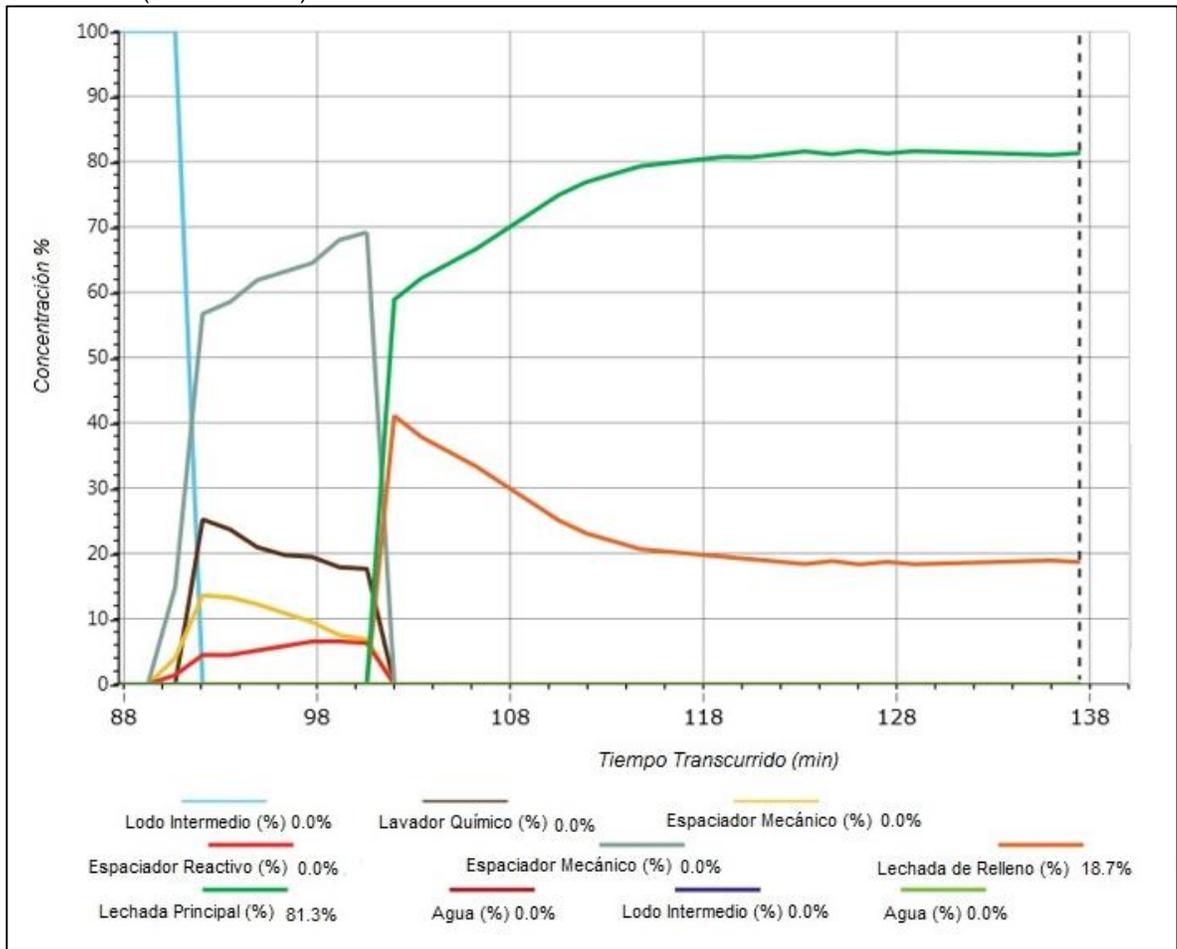
Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

La gráfica muestra la concentración de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 6.662 pies, profundidad a la cual se encuentra el tope de la lechada de cemento principal que se tendría al final de la operación.

Al observar los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo, se puede ver que finalmente a esta profundidad se tendrá 64.8% de lechada principal, 20.6% de lechada de relleno, 11.8% de lodo de perforación remanente en el pozo, 5.0% de espaciador mecánico, 0.7% de lavador químico, y 0,2% de espaciador reactivo. Estos valores de concentración indican claramente que aproximadamente el 28% de la concentración en este punto son contaminantes.

Y la última gráfica, se puede observar en la **Figura 67** para una profundidad de 7.862 pies, a la cual se encuentra el zapato del revestimiento 9 5/8 pulgadas.

Figura 67. Concentración de fluidos al zapato del revestimiento 9 5/8 pulgadas @ 7862 pies MD. Caso Base (Sin Rotación).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

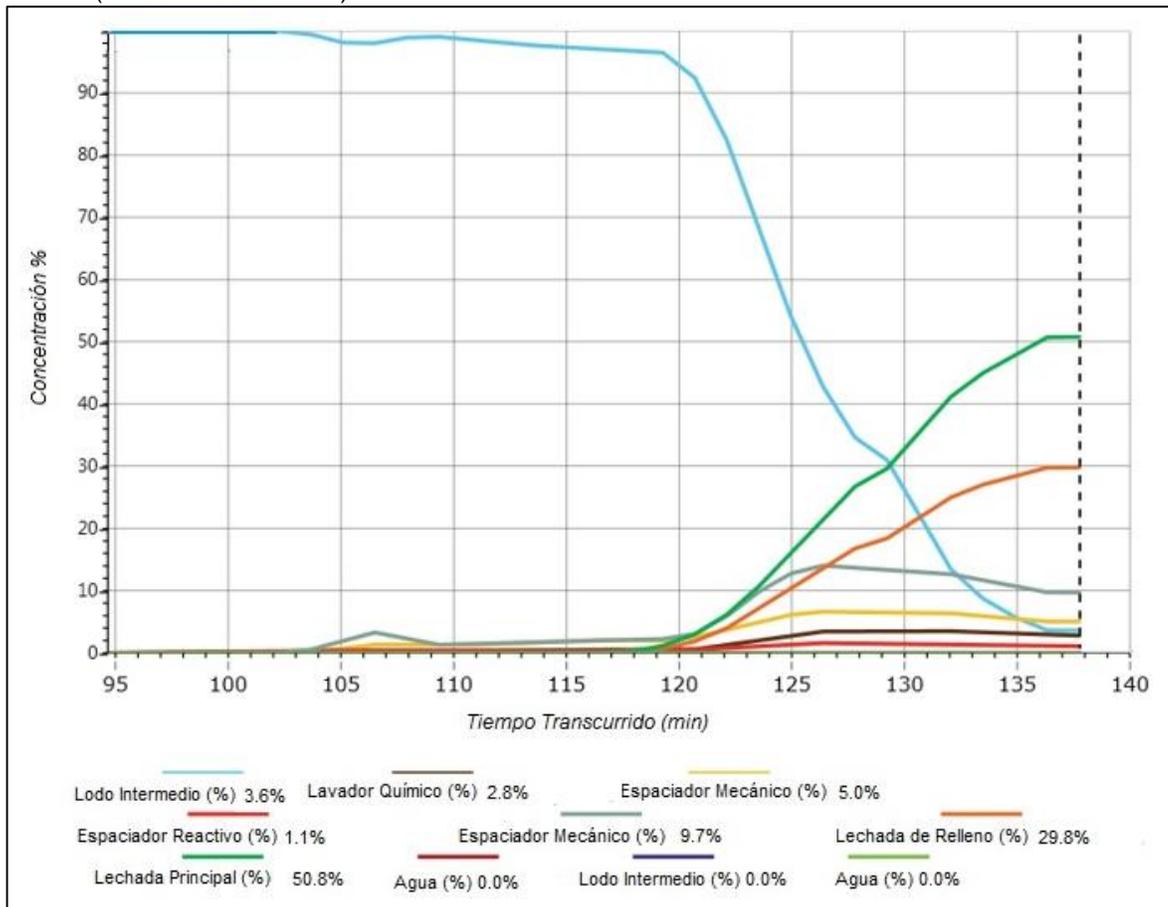
La gráfica muestra la concentración de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 7.862 pies, profundidad a la cual se encuentra el zapato del revestimiento de 9 5/8 pulgadas. Al observar los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo, se puede ver que finalmente a esta profundidad se tendrá 0.0% de concentración de lodo de perforación, espaciador mecánico, lavador químico y espaciador reactivo. De lechada principal se tiene 81.3% de concentración y 18.7% de la lechada de relleno.

Como se ha explicado anteriormente, a esta profundidad la eficiencia de desplazamiento es casi total debido al régimen y efecto de flujo en ese punto del

anular. Esta gráfica se mantiene prácticamente constante para esta profundidad en los tres casos, por lo que será mostrada solamente en el Caso Base.

5.4.2 Caso Uno (1). Para este caso, en cual se genera una rotación de 20 RPM, se generan tres gráficas de concentración de fluidos. La primera, al tope de la lechada de relleno, el cual para este caso y según las condiciones ingresadas en el simulador y los cálculos que éste realiza, sería finalmente de 5.985 pies. Lo anterior puede verse en la **Figura 68**.

Figura 68. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada de relleno @ 5985 pies MD. Caso 1 (Rotación de 20RPM).



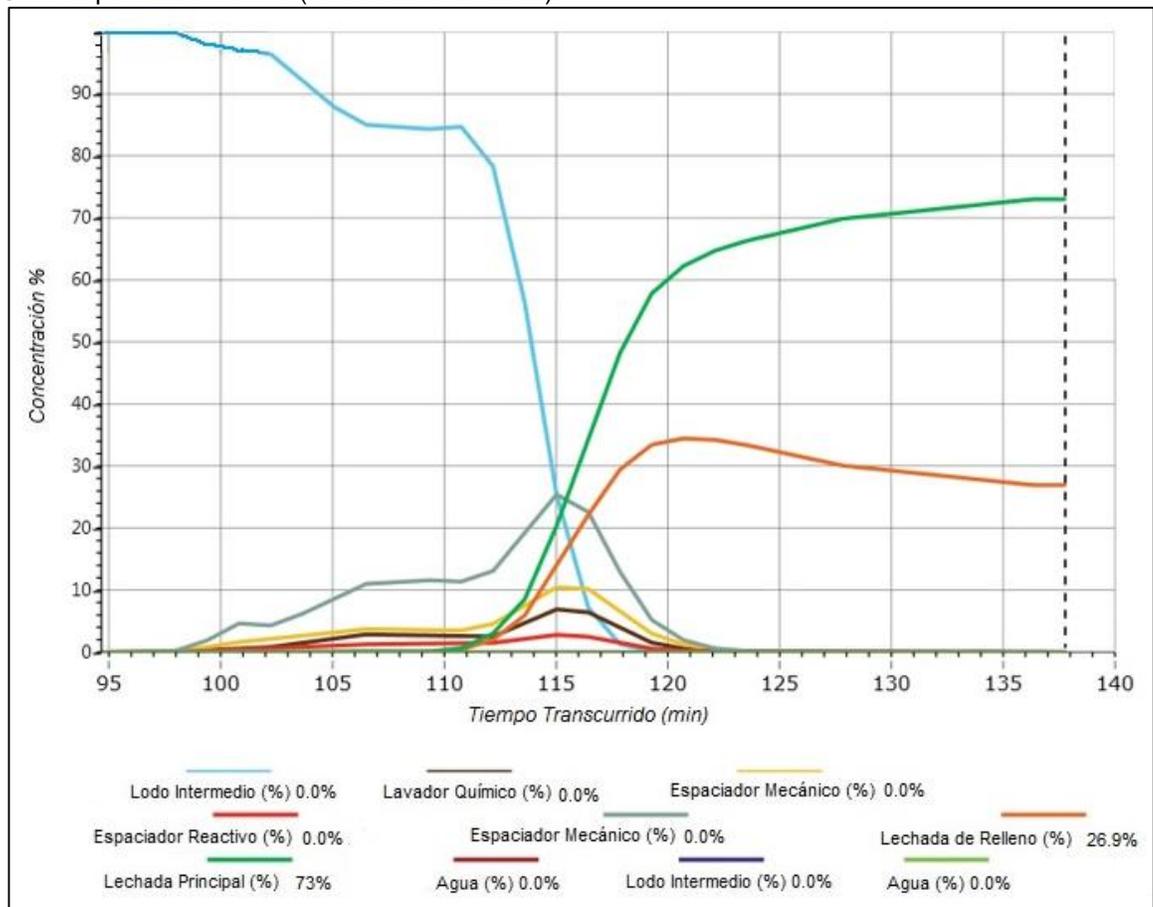
Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

La gráfica muestra la concentración de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 5.985 pies, profundidad a la cual se encuentra el tope de la lechada de cemento de relleno que se tendría al final de la operación. Al observar los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo, se puede ver que finalmente a esta se tendrá 50.8% de lechada principal, 29.8% de lechada de

relleno, 3.6% de lodo de perforación remanente en el pozo, 9.7% de espaciador mecánico, 2.8% de lavador químico, y 1.1% de espaciador reactivo. Estos valores de concentración indican claramente que aproximadamente el 20% de la concentración en este punto son contaminantes. Se puede apreciar la notable mejoría entre el Caso Base y el presente caso. El desplazamiento del lodo de perforación pasó de ser del 74.4% al 96.4%, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación del cemento por lodo.

Por otra parte, se observa que en este caso la altura del tope de cemento final está 823 pies por debajo de la altura requerida por la empresa. Debido a la incertidumbre generada por la falta de caliper, es muy probable que el cálculo de volumen de cemento tuviera errores, causando que sea insuficiente y no alcance la altura esperada en el diseño, a pesar del 50% de volumen de exceso bombeado por la empresa. La segunda gráfica, se genera para el tope de la lechada de cemento principal (6662 pies) como se puede ver en la **Figura 69**.

Figura 69. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada principal @ 6662 pies MD. Caso 1 (Rotación de 20RPM).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

En esta gráfica se pueden ver las concentraciones de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 6.662 pies, profundidad a la cual se encuentra el tope de la lechada de cemento principal. Los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo 0.0% de concentración de lodo de perforación, espaciador mecánico, lavador químico y espaciador reactivo. De lechada principal se tiene 73% de concentración y 26.9% de la lechada de relleno.

Como en la profundidad de referencia anterior, en el tope de la lechada principal también puede verse una mejoría entre el Caso Base y el presente caso. El desplazamiento del lodo de perforación pasó de ser del 74.4% al 96.8%, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación del cemento por lodo. Además del desplazamiento efectivo del resto de fluidos presentes en el pozo, permitiendo una lechada uniforme para garantizar la calidad de la cementación.

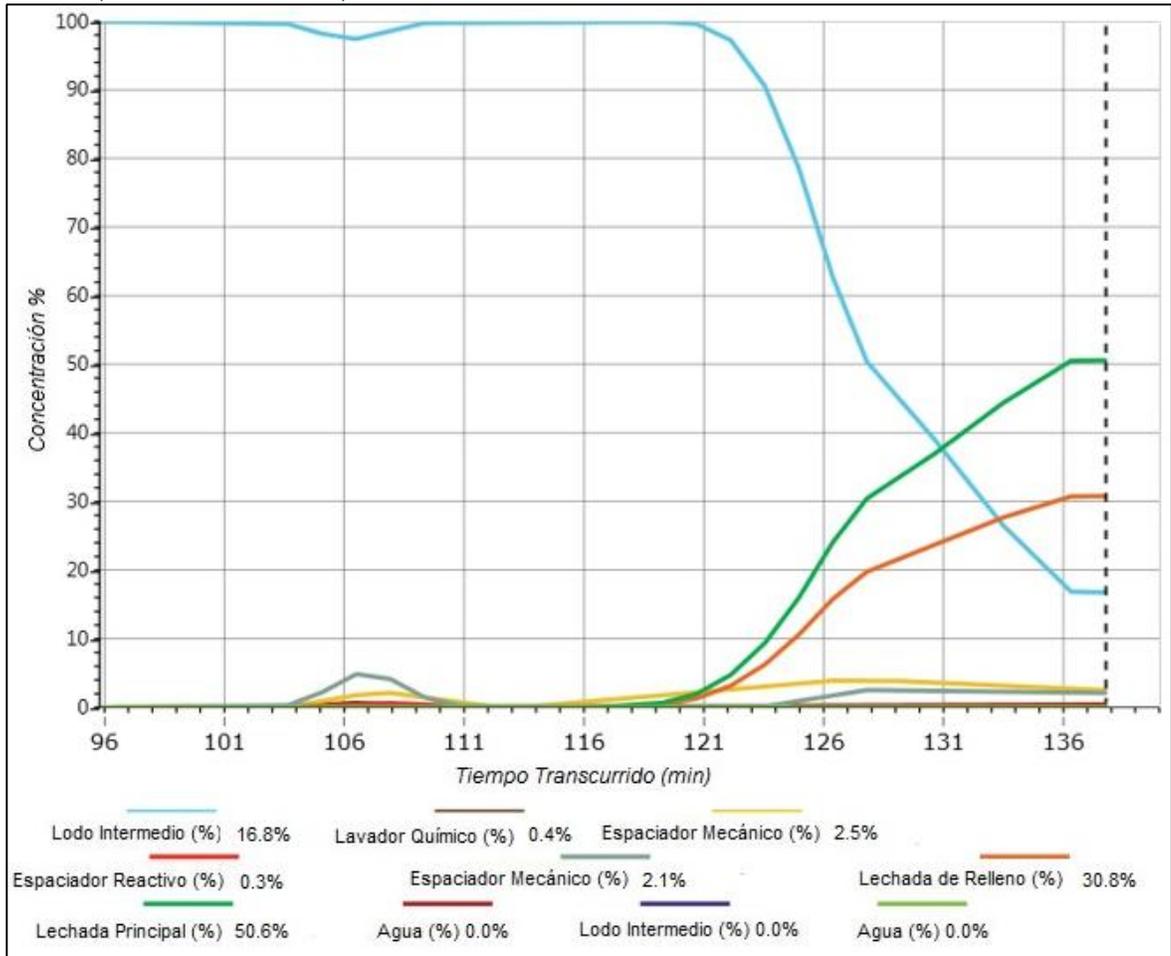
Para la profundidad del zapato del revestimiento, como se explicó en el Caso Base, la gráfica de concentración de fluidos se mantiene constante, mostrando valores de concentración de cemento cercanos al 100%. Esto se debe al efecto de flujo en el anular a esa profundidad.

5.4.3 Caso Dos (2). Para este caso, en cual se genera una rotación de 40 RPM, se generan tres gráficas de concentración de fluidos. La primera, al tope de la lechada de relleno, el cual se calculó según las condiciones ingresadas en el simulador, a una profundidad de 5.931 pies. Lo anterior puede verse en la **Figura 70**.

Esta figura muestra la concentración de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 5.985 pies, profundidad a la cual se encuentra el tope de la lechada de cemento de relleno que se tendría al final de la operación.

Al observar los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo, se puede ver que finalmente a esta se tendrá 50.6% de lechada principal, 30.8% de lechada de relleno, 16.8% de lodo de perforación remanente en el pozo, 2.5% de espaciador mecánico, 0.4% de lavador químico, y 0.3% de espaciador reactivo. Estos valores de concentración indican claramente que aproximadamente el 28% de la concentración en este punto son contaminantes. Se puede apreciar la notable mejoría entre el Caso Base y el presente caso. El desplazamiento del lodo de perforación pasó de ser del 74.4% al 83.2%, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación del cemento por lodo; sin embargo, no es tan eficiente como en el Caso 1 donde se rota a una velocidad de 20 RPM.

Figura 70. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada de relleno @ 5931 pies MD. Caso 2 (Rotación de 40RPM).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

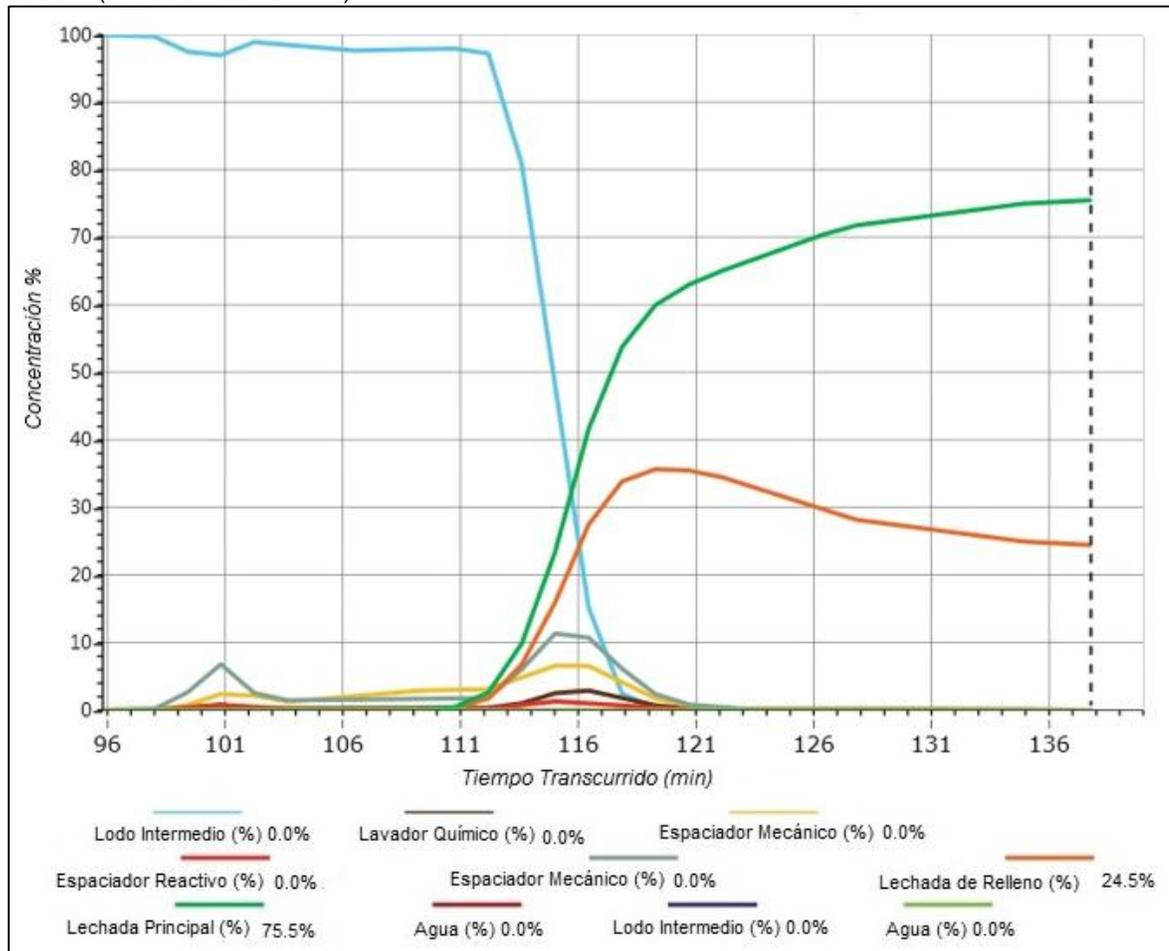
En este caso la profundidad del tope de cemento también se ve alterada debido a la incertidumbre en el diámetro del hueco y la posible mejora en el posicionamiento de los fluidos dentro del anular debido a la rotación aplicada. Para el tope de la lechada de relleno en este caso la profundidad es de 5.931 pies, esto es 769 pies por debajo de la profundidad requerida por la empresa.

La segunda gráfica, se genera para el tope de la lechada de cemento principal (6662 pies) para el segundo caso de simulación. Los resultados de concentración de fluidos en el anular se pueden ver en la **Figura 71**.

En esta gráfica se pueden ver las concentraciones de fluidos bombeados al pozo que se encuentran en un corte transversal del mismo a una profundidad de 6.662 pies, profundidad a la cual se encuentra el tope de la lechada de cemento principal. Los valores de concentración de los fluidos a esta profundidad al final del programa de bombeo 0.0% de concentración de lodo de perforación, espaciador mecánico,

lavador químico y espaciador reactivo. De lechada principal se tiene 75.5% de concentración y 24.5% de la lechada de relleno.

Figura 71. Concentración de fluidos al tope de cemento de la lechada principal @ 6662 pies MD. Caso 2 (Rotación de 40RPM).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

Como en la profundidad de referencia anterior, en el tope de la lechada principal también puede verse una mejoría entre el Caso Base y el presente caso. El desplazamiento del lodo de perforación pasó de ser del 74.4% al 96.8%, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación del cemento por lodo. Además del desplazamiento efectivo del resto de fluidos presentes en el pozo, permitiendo una lechada uniforme para garantizar la calidad de la cementación.

Para la profundidad del zapato del revestimiento, como se explicó en el Caso Base, la gráfica de concentración de fluidos se mantiene constante, mostrando valores de concentración de cemento cercanos al 100%. Esto se debe al efecto de flujo en el anular a esa profundidad.

Del anterior análisis se puede inferir que los resultados mejoran significativamente con la al aplicar la técnica de cementación dinámica, sin embargo, del Caso 1 (20 RPM) al Caso 2 (40 RPM) no hay una diferencia rescatable.

5.5 DISTRIBUCIÓN DE FLUIDOS 3D

Como parámetro final de comparación, el simulador arroja imágenes en tres dimensiones que ilustran la distribución de fluidos desde un análisis de los 360° del anular y con respecto a la profundidad del pozo. Estas figuras son más sencillas de comprender ya que representan mejor la forma del pozo y los fluidos disponibles en su anular. Las convenciones de colores utilizadas en estas se representan según el orden en el que los fluidos son bombeados.

En los casos en los que el parámetro de stand off es alto y se presenta un anular irregular, se espera que el tope de cemento se encuentre más arriba en el lado amplio del anular amplio que en el estrecho, como se explicó en el Capítulo 3. Adicionalmente, se espera que, por la contaminación del cemento, la altura de la columna sea más alta aun cuando se tenga un alto porcentaje de contaminantes a la misma profundidad.

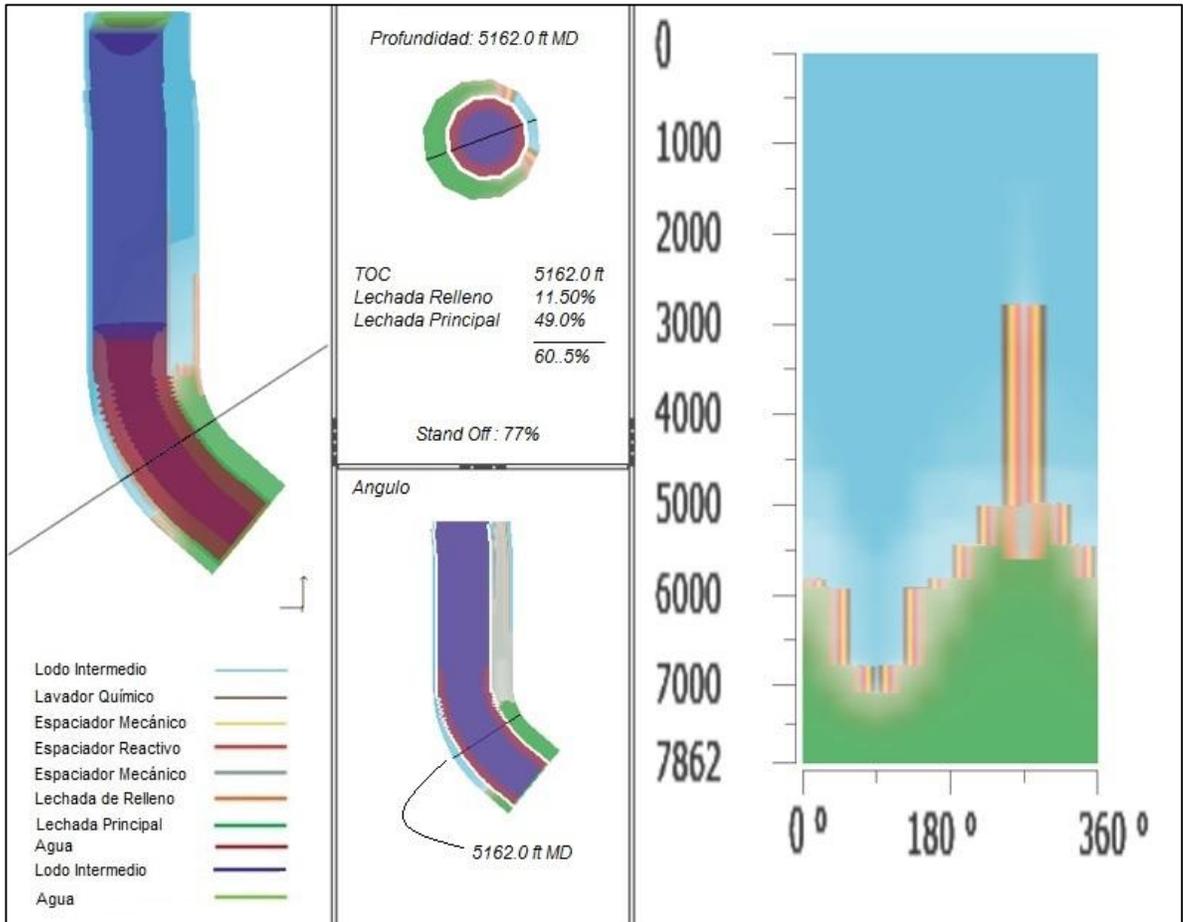
Como en las dos secciones anteriores, se analizan las imágenes de distribución de fluidos en 3D para los tres casos y en las profundidades de referencia utilizadas a lo largo del capítulo.

5.5.1 Caso Base. A continuación, se muestran las tres figuras de distribución de fluidos generadas para cada profundidad de referencia para la operación de cementación convencional simulada del revestimiento de 9 5/8 de un pozo inyector, arrojadas por el software de cementación utilizado.

La **Figura 72**, muestra la distribución de los fluidos en tres dimensiones en el tope de la lechada de cemento de relleno, que se encuentra a 5.162 pies. Se puede notar la presencia de contaminantes a lo largo de toda la sección del pozo, así como la descentralización del revestimiento con respecto a las paredes del hueco.

Al analizar la gráfica se determina que debido al standoff alto (77% aproximadamente), la tubería está recostada contra las paredes del hueco. Por esta razón, se ve claramente la irregularidad de flujo debido a un espacio amplio y uno estrecho. Siendo el primero el canal de flujo preferente para las lechadas de cemento y pre-flujos dejando así una gran porción de lodo remanente en la sección del anular donde la tubería está más recostada. Esto al final se traduce en una baja calidad de cementación debido a contaminación y desplazamiento ineficiente de fluidos.

Figura 72. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 5161.0 pies. Caso Base (Sin Rotación).

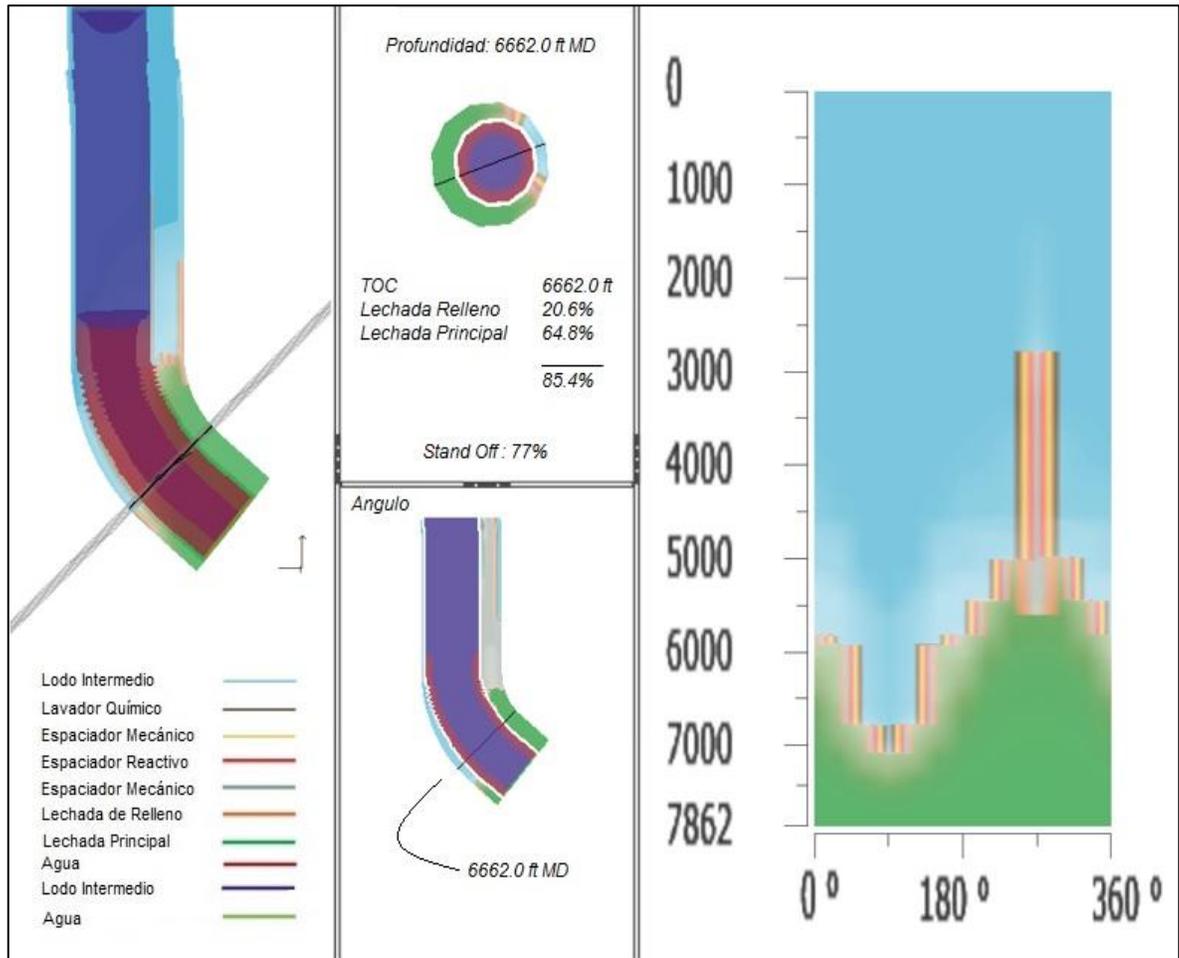


Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

La **Figura 73**, muestra la distribución de los fluidos en tres dimensiones en el tope de la lechada de cemento principal, que se encuentra a 6.662 pies. Se puede notar la presencia de contaminantes a lo largo de toda la sección del pozo, así como la descentralización del revestimiento con respecto a las paredes del hueco.

Al analizar la gráfica se determina que debido al standoff alto (77% aproximadamente), la tubería está recostada contra las paredes del hueco. Por esta razón, se ve claramente la irregularidad de flujo debido a un espacio amplio y uno estrecho. Siendo el primero el canal de flujo preferente para las lechadas de cemento y pre-flujos dejando así una gran porción de lodo remanente en la sección del anular donde la tubería está más recostada. Esto al final se traduce en una baja calidad de cementación debido a contaminación y desplazamiento ineficiente de fluidos. Adicionalmente, se evidencia como el tope de cemento es más alto en el espacio de flujo anular amplio, ya que para los fluidos existe una dificultad mayor para fluir hacia el lado estrecho.

Figura 73. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 6662.0 pies. Caso Base (Sin Rotación).

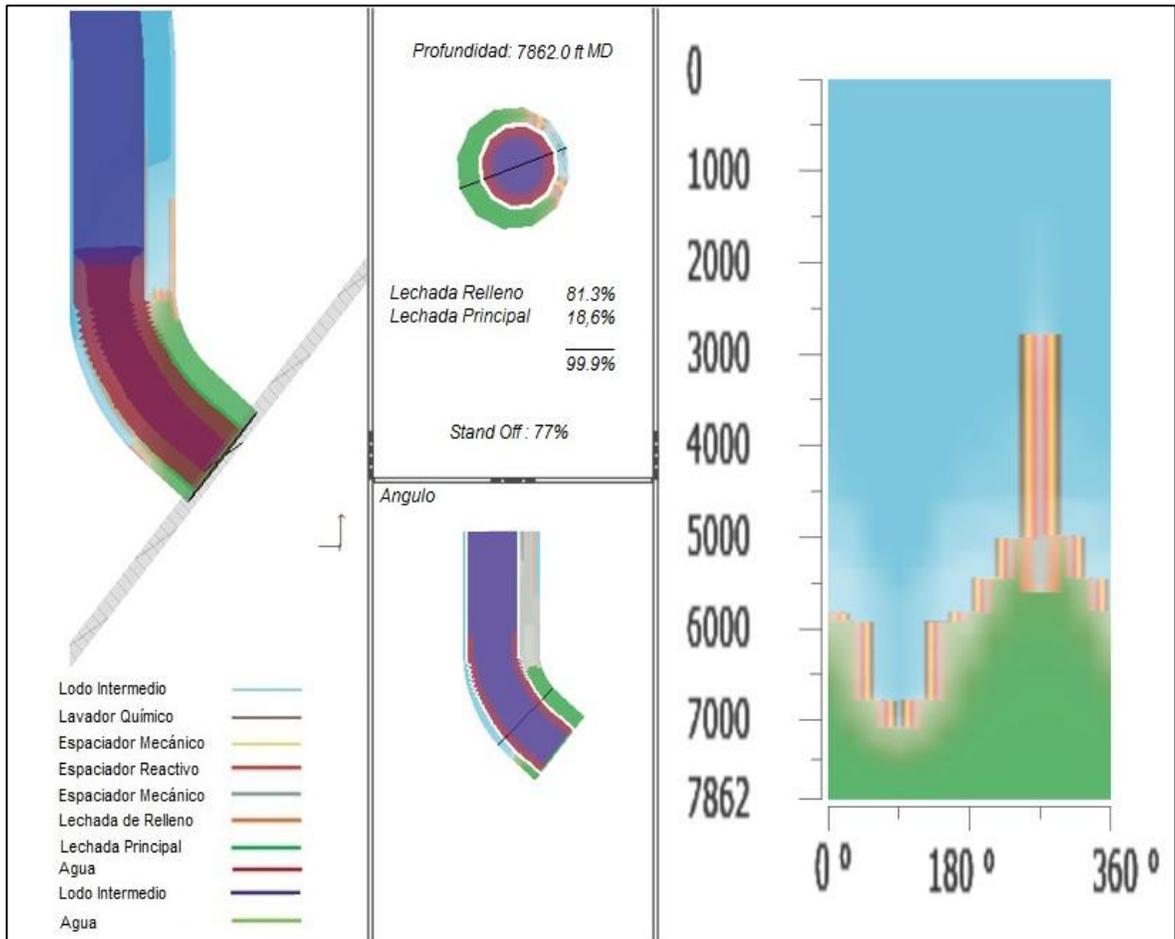


Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

Para la última profundidad de referencia, que es de 7.861 pies, donde se encuentra ubicado el zapato del revestimiento de 9 5/8 pulgadas, se siguen evidenciando contaminantes a la altura del corte, así como la baja centralización de la tubería; como se puede ver en la **Figura 74**. Sin embargo, le eficiencia de desplazamientos de los fluidos en general es mejor en este punto debido al efecto de flujo de los fluidos bombeados.

Como en las anteriores secciones, este punto de análisis es muy similar para los tres casos. Es por eso que no se realiza una comparación en las gráficas para este punto ya que las variaciones son imperceptibles gracias el régimen de flujo de Iso fluidos al salir del revestimiento hacia el anular.

Figura 74. Distribución de fluidos 3D, en el zapato del revestimiento 9 5/8 pulgadas @ 7862.0 pies. (Sin Rotación).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

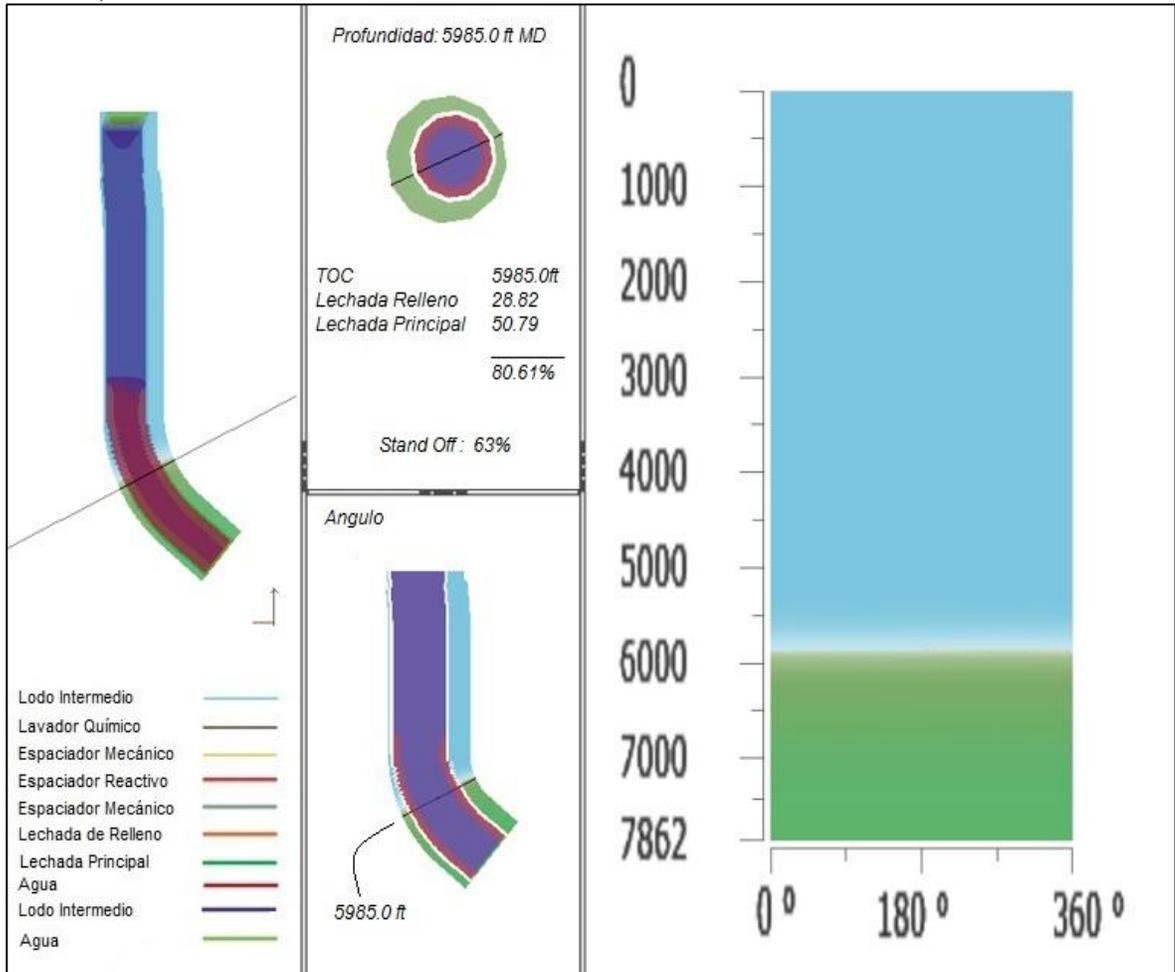
5.5.2 Caso Uno (1). A continuación, se muestran las tres imágenes de distribución de fluidos generadas en cada profundidad de referencia para la operación de cementación de un pozo inyector, simulando una condición dinámica por medio de la rotación del revestimiento de 9 5/8 pulgadas a 20 RPM.

La **Figura 75**, muestra la distribución de los fluidos en tres dimensiones en el tope de la lechada de cemento de relleno, que se encuentra a 5.985 pies. En esta sección la distribución de los fluidos y el desplazamiento de los mismos muestran un comportamiento uniforme, arrojando mejores resultados para el presente análisis.

Un standoff de 63% sigue siendo un dato elevado. Sin embargo, se puede ver como con la mejora en la centralización del revestimiento, hay un flujo uniforme de fluidos en el anular, removiendo el lodo en gran proporción.

Se siguen evidenciando los espacios de flujo amplio y estrecho pero su efecto no es tan significativo en este caso, como se puede observar, ya que los topes de cemento a los dos lados del anular son uniformes. Esto podría mejorar la calidad de la cementación.

Figura 75. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 5985.0 pies. Caso 1 (Rotación de 20 RPM).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

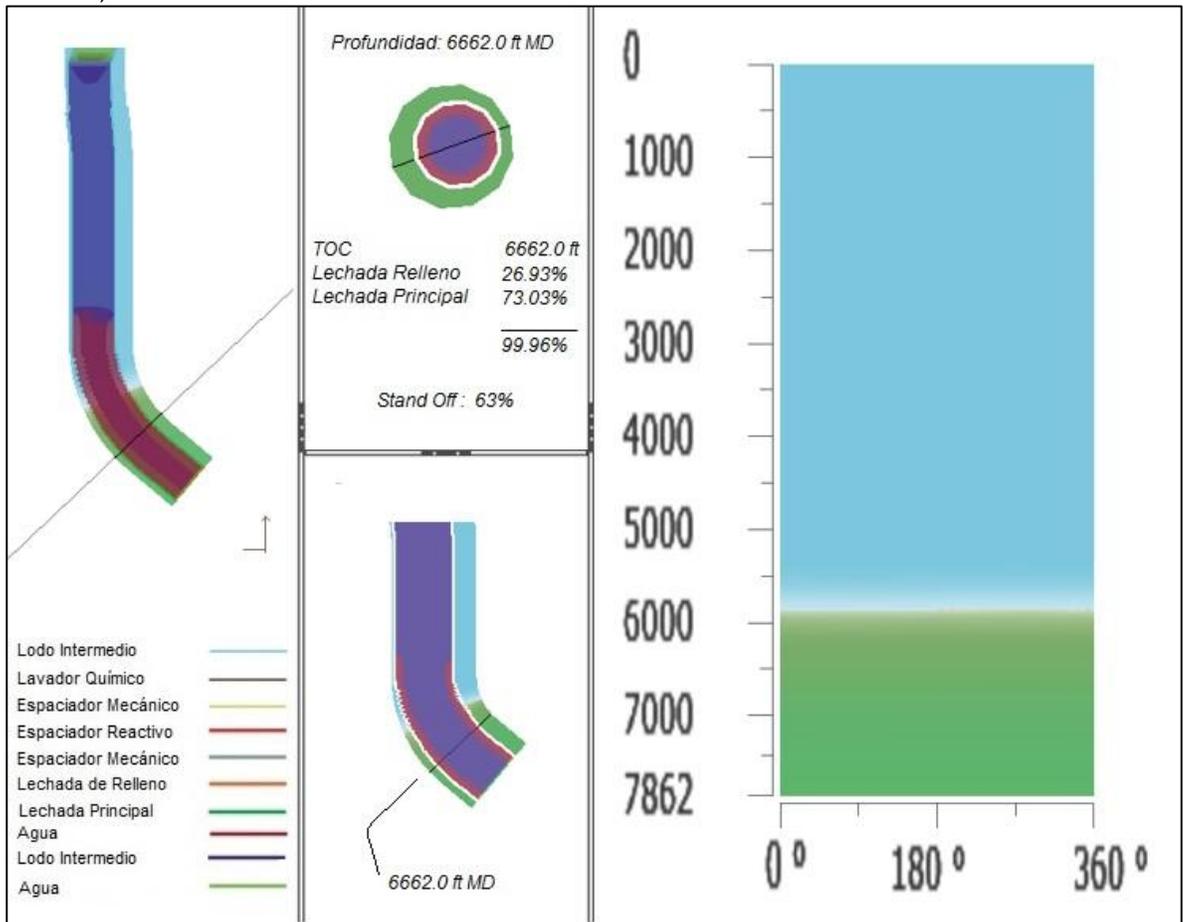
La segunda figura para este caso, muestra la distribución de los fluidos en tres dimensiones en el tope de la lechada de cemento principal, que se encuentra a 6.662 pies. Los efectos de la rotación, al igual que en la figura anterior, se ven claramente representados con la mejora de la distribución de fluidos y el desplazamiento.

El stand off contribuye a permitir un flujo uniforme, sin embargo, sigue afectado el tope de cemento con respecto al esperado debido a la incertidumbre en el tamaño del hueco y a los contaminantes presentes.

La **Figura 76** ilustra lo explicado anteriormente. Al fijarse en la columna de fluidos se puede ver un contacto paralelo entre ellos. Esto es gracias al movimiento continuo del volumen de fluido allí presente y del revestimiento.

Este es un punto de crucial importancia para la cementación, la cual, bajo estos parámetros, podría resultar en sellos eficientes según los requerimientos.

Figura 76. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 6662.0 pies. Caso 1 (Rotación de 20 RPM).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

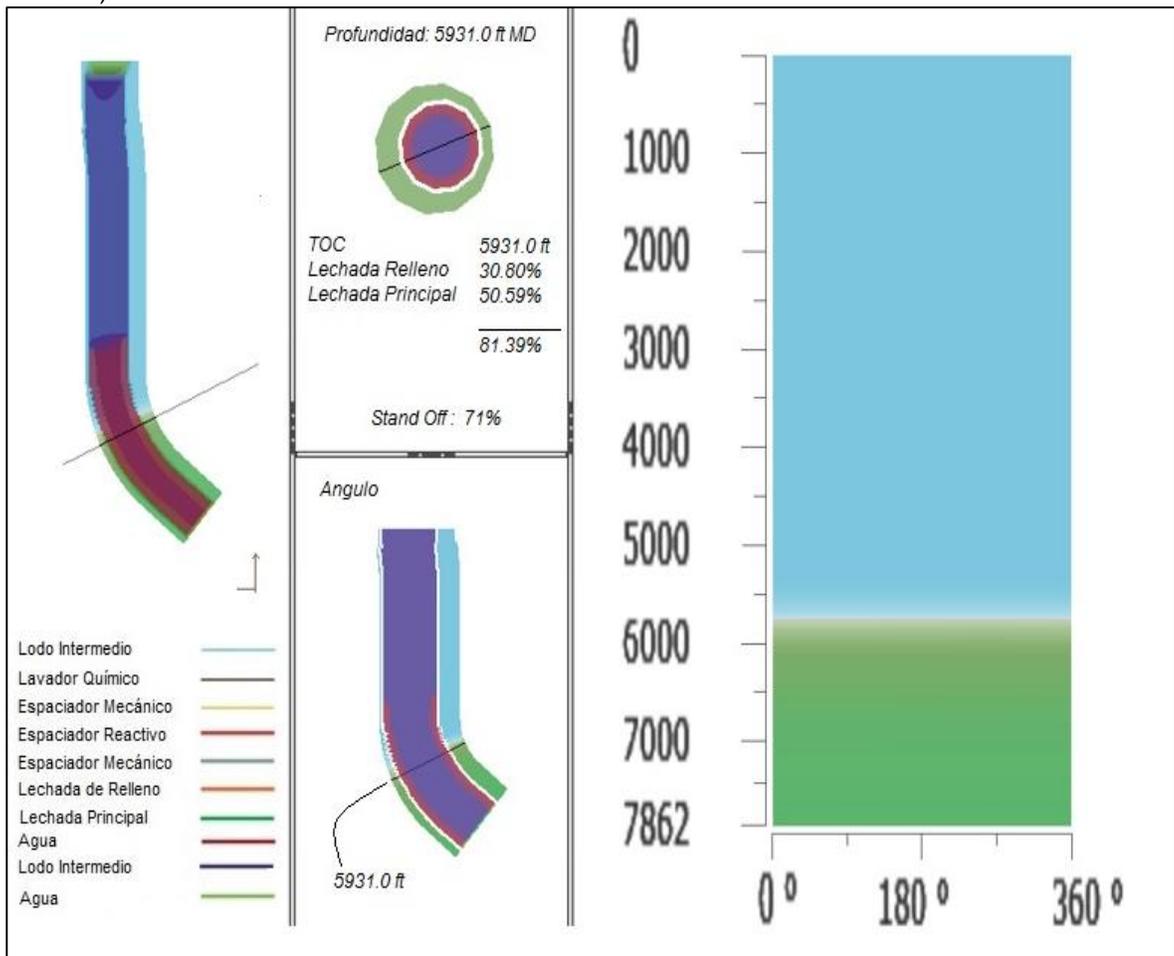
5.5.3 Caso Dos (2). A continuación, se muestran las tres imágenes de distribución de fluidos generadas en cada profundidad de referencia para la operación de cementación de un pozo inyector, simulando una condición dinámica por medio de la rotación del revestimiento de 9 5/8 pulgadas a 40 RPM.

La **Figura 77**, muestra la distribución de los fluidos en tres dimensiones en el tope de la lechada de cemento de relleno que para este caso se encuentra a 5.931 pies.

En esta sección la distribución de los fluidos y el desplazamiento de los mismos muestran un comportamiento uniforme. Los resultados obtenidos aplicando este parámetro de rotación son similares a los obtenidos en el Caso 1.

Para este caso se tiene un standoff de 71%, similar al del Caso Base. Sin embargo, se pueden ver cambios en la centralización del revestimiento, mejorando el efecto de los espacios de flujo anular irregulares. Se puede ver un flujo más uniforme y una mejor remoción del lodo.

Figura 77. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 5931.0 pies. Caso 2 (Rotación de 40 RPM).



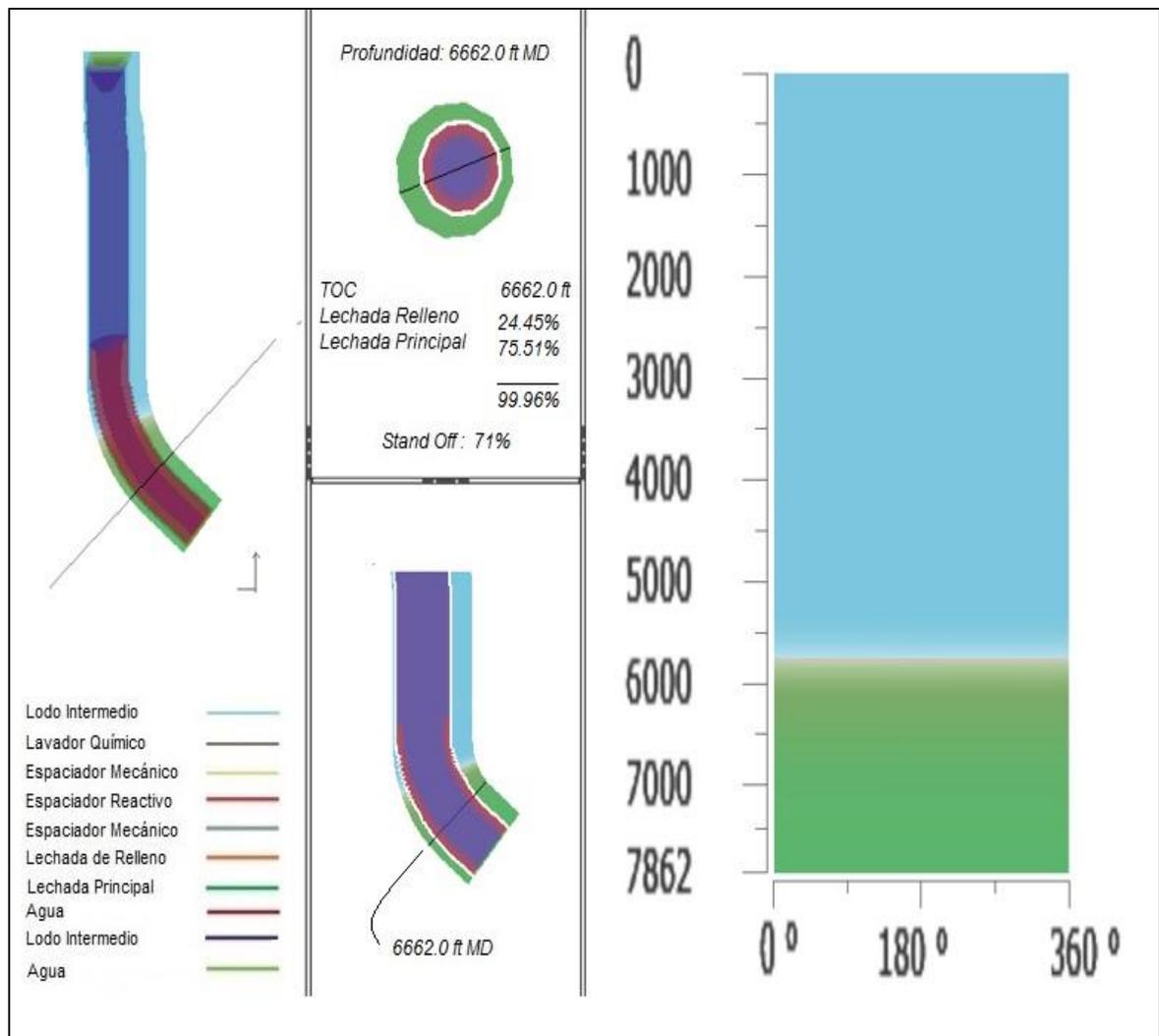
Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

La **Figura 78**, muestra la segunda imagen para este caso. La distribución de los fluidos en tres dimensiones en el tope de la lechada de cemento principal, que se encuentra a 6.662 pies, muestra mejores resultados.

Los efectos de la rotación ayudan a mejorar la distribución de fluidos y el desplazamiento de los mismos. Los efectos provocados por una mala centralización se reducen permitiendo un flujo uniforme. Se puede observar también un tope de cemento regular a ambos lados del anular. Se mantiene el contacto paralelo en la columna de fluidos. Esto es gracias al movimiento continuo del volumen de fluido allí presente y del revestimiento.

La cementación a esta profundidad requiere de una alta calidad para cumplir con los objetivos operacionales del pozo que continuará su perforación después de haber sido cementado.

Figura 78. Distribución de fluidos 3D, en el tope de cemento @ 6662.0 pies. Caso 2 (Rotación de 40 RPM).



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

5.6 CONCLUSIÓN

Después del análisis realizado para los parámetros de stand off, eficiencia de desplazamiento, concentración de fluidos y distribución de fluidos en tres dimensiones, se puede concluir que la rotación aplicada a los Casos 1 y 2, con el fin de simular una operación de cementación dinámica, conlleva a mejoras significativas en los resultados arrojados por el software. Se evidencia una mayor centralización, así como la disminución del efecto de los espacios de flujo irregulares en el anular. La eficiencia de desplazamiento y la distribución de fluidos a lo largo de la profundidad total del pozo cambian sustancialmente. Los topes de cemento observados son regulares a ambos lados del anular y no se ve una posible canalización de flujo mientras los fluidos son bombeados.

La frecuencia de rotación para lograr las mejoras mencionadas anteriormente y finalmente un sello hidráulico efectivo, se dan gracias a frecuencias de rotación de al menos 20 RPM que permitan una dinámica en el pozo suficiente para aumentar el esfuerzo de corte y una velocidad tangencial que permita un flujo helicoidal a través del anular. A su vez, la rotación desde 5 RPM hasta 10 RPM es considerada una rotación a baja frecuencia⁵⁸, la cual se considera beneficiosa sólo para retrasar la pérdida de presión hidrostática durante la gelificación del cemento. Según SUTTON. D y RAVY. K en el paper SPE 22776, se tiene una demostración de laboratorio en la cual se comprueba que la pérdida de presión de 350 libra/pulg² con el revestimiento estático pasa a ser de 32 libra/pulg² con la rotación del revestimiento a baja frecuencia entre 5 y 10 RPM. Por lo tanto, se tiene que 10 RPM no es una frecuencia suficiente para mejorar el desplazamiento de fluidos como lavadores, espaciadores y cemento, pero sí es una frecuencia adecuada para evitar la migración de gas desde la formación al cemento en el momento en que comienza la gelificación del mismo, debido al retraso de la pérdida de presión hidrostática en el anular.

Según el análisis realizado, los resultados obtenidos en el Caso 1 y el Caso 2 no presentan variaciones importantes, lo que significa que no es necesario aumentar la velocidad de rotación ya que con 40RPM la eficiencia de la operación aumenta, pero no lo suficiente como para acarrear una dificultad mayor al rotar más la tubería.

Es por esta razón que se escoge el Caso 1 de la simulación, el cual aplica una rotación de 20 RPM al revestimiento durante el bombeo de los fluidos, para ser comparado con los resultados de la operación real en el siguiente capítulo.

⁵⁸ SUTTON, D. L. y RAVY, K. M. Low-Rate Pipe Movement during Cement Gelation to Control Gas Migration and Improve Cement Bond. Society of Petroleum Engineers, 1991.

6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS SIMULACIÓN – POZO DE ESTUDIO

Previamente, en el presente trabajo, se han expuesto los antecedentes sobre los cuales se realiza la comparación de resultados, y la simulación generada para este mismo fin por el software de la empresa Halliburton, iCem®. El pozo de estudio seleccionado se analizó durante la operación de cementación primaria del revestimiento intermedio de 9 5/8 pulgadas, cuyo zapato alcanzó la profundidad de 7.862 pies; el cual fue corrido posterior a la perforación de la fase de 12 ¼ pulgadas. En el Capítulo 4, se explicó con detalle toda la operación en cuestión (diseño, ejecución, resultados, conclusiones y recomendaciones). Posteriormente, en el Capítulo 5, se describe cuidadosamente el proceso en el cual, mediante un software, se simula la operación de cementación para tres casos. Estas simulaciones fueron realizadas conservando los mismos parámetros operacionales del pozo de estudio, como estado mecánico, diseño de revestimiento de la sección intermedia, sistemas de fluidos, así como sus propiedades físicas y químicas; diseño de centralización, jerarquía reológica, programa de bombeo, entre otras. Los casos corridos por el software fueron diseñados para que uno de ellos reflejara exactamente el pozo de estudio, a manera de cementación convencional; y los otros dos conservando su diseño, pero variando los parámetros de rotación, simulando así una operación de cementación dinámica.

Del análisis de las simulaciones, se ha escogido un solo caso que, según las comparaciones realizadas, es el que más beneficios aporta a la operación y el que más se ajusta a los requerimientos de la empresa. El seleccionado fue el Caso 1: Rotación a 20 RPM.

A continuación, se realizará una comparación cualitativa de los resultados obtenidos en la simulación del Caso 1, explicado con anterioridad, con los de la operación de cementación real del pozo de estudio. De esta manera se busca resaltar las mejoras y beneficios a nivel de resultados (eficiencia de desplazamiento, adherencia del cemento, y centralización de la tubería), de tiempos operacionales, y evasión de trabajos de cementación remedial posteriores; que la aplicación de la técnica de cementación dinámica, así como el uso de la herramienta Cabeza Rotativa de Cementación, traen consigo.

La comparación se realiza tomando como referencia las tres profundidades de mayor importancia analizadas en el Capítulo 5. Estas son la profundidad del zapato del revestimiento de 9 5/8 pulgadas, el tope de la lechada de relleno y el tope de la lechada principal. Para cada una de estas se mostrarán las eficiencias de desplazamiento, parámetros de stand off, análisis del registro de evaluación de cementos y disposición de los fluidos. Con esto, se da cumplimiento al quinto objetivo propuesto para el presente trabajo.

6.1 ZAPATO DEL REVESTIMIENTO 9 5/8 PULGADAS @ 7862 PIES

El zapato del revestimiento intermedio de 9 5/8 pulgadas, quedó sentado a 7.862 pies MD. Este es un punto de gran importancia en el cual se debe tener un sello hidráulico efectivo, ya que al ser un pozo inyector, se busca garantizar la integridad del zapato, asegurar la vida productiva del pozo y cumplir con la normatividad establecida por el Ministerio de Minas y Energía en la Resolución 9 0341 de 2014.

Analizando la evaluación del registro de cementación del pozo de estudio, mostrado para esta sección en la **Figura 79**, se puede ver que la adherencia del cemento y la consistencia del mismo son nulas.

Para las profundidades de 7.700 pies a 7860 pies, se muestra una amplitud promedio del CBL de 25 milivoltios. Este parámetro es un criterio de aislamiento efectivo y para la empresa operadora los rangos deben ser de 10 a 15 mV con un intervalo de mínimo 15 pies que muestren sello efectivo. La lectura que arroja el registro no corresponde a tubería libre (62 mV en promedio) pero tampoco muestra sello. De esto se puede inferir que es cemento en estado líquido que no adquirió su compresibilidad debido a contaminación.

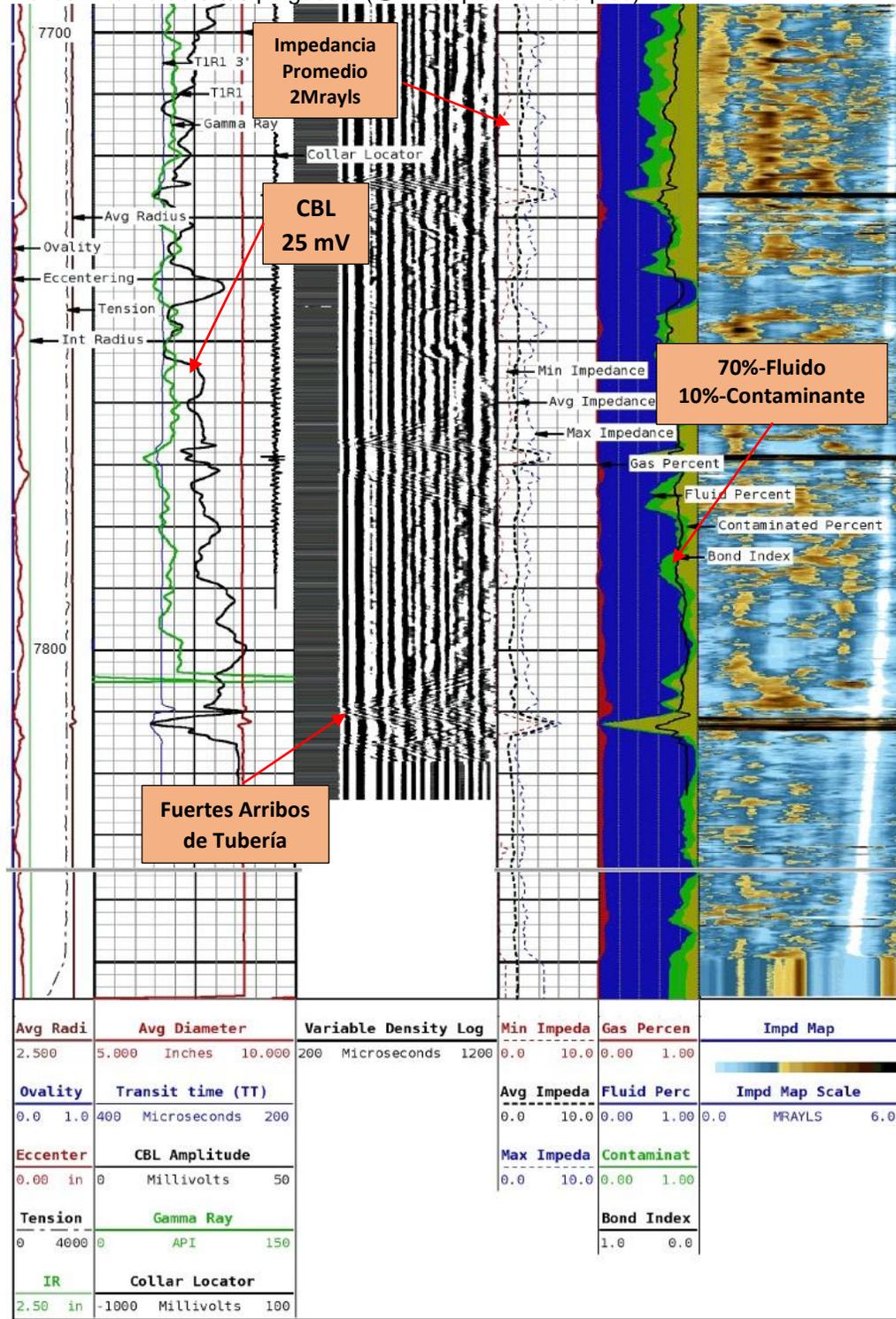
De la misma manera, los valores de impedancia tienen un promedio de 2 mRayls en esta profundidad. El registro ultrasónico debe tener una lectura en mRayls igual o mayor a la reportada en el UCA (Análisis Ultrasónico de Resistencia a la Compresión) de la lechada de cemento usada. Para el pozo de estudio, el cemento usado tenía una impedancia acústica de 4.8 mRayls, lo que evidencia un desfase importante en las lecturas encontradas en el registro. Ya que, según esta lectura, el fluido en esta profundidad es cemento contaminado.

El registro VDL permite ver las señales vibración de las conexiones de las tuberías (chevron pattern) a 7730, 7770 y 7810 pies; lo que indica que la adherencia es muy reducida. No se ven claros arribos de formación, indicando que no hay adherencia del cemento ni a la tubería, ni a la formación adyacente. Adicionalmente, el índice de adherencia es menor al 40% a en toda la sección registrada a esta profundidad, cuando debería ser mayor al 90% según los requerimientos de la empresa.

El mapa de impedancias muestra fluido con pequeñas muestras de sólido a esta profundidad, siendo mucho mayor la proporción de fluido. Presenta porcentajes en promedio del 70% de fluido y 10% de contaminante.

En esta zona, el registro de evaluación de cemento indica una cementación de baja calidad que no cumple con los requerimientos de la empresa operadora. A esta profundidad, según el análisis realizado en el Capítulo 5, los problemas de contaminación y desplazamiento debían ser mínimos.

Figura 79. Sección del registro de evaluación del cemento en el zapato del revestimiento de 9 5/8 pulgadas. (@ 7700 pies a 7860 pies).



Fuente: Registro de Evaluación de Cementación del Pozo de Estudio. Ecopetrol S.A. 2015.

A esta misma profundidad, en el caso de simulación escogido para este análisis, se presentan valores que hacen referencia a una buena cementación. El desplazamiento de fluidos, se mantiene constante con un valor del 99%, la disposición de los mismos, así como los porcentajes de concentración de contaminantes en la columna de cemento son parámetros que conservan valores muy por dentro del rango de los requerimientos de la empresa.

En el caso de simulación del pozo de estudio, se evidenciaba claramente el efecto de una mala centralización del revestimiento, creando espacios de flujo irregulares en el anular. De esta manera, el cemento y los pre-flujos no fluyen uniformemente por todo el hueco, dejando a su paso un volumen de lodo de perforación que después conllevará a problemas de contaminación del cemento.

Sin embargo, como se ha explicado anteriormente, este es un punto que dificulta la comparación y análisis, ya que el simulador arroja resultados teóricos que no tienen en cuenta las condiciones adversas que pueden presentarse en el pozo durante la operación y resultar en una cementación como la del pozo de estudio en esta zona. Estos valores constantes están ligados a un flujo axial que genera una limpieza efectiva, ya que impacta directamente a los contaminantes allí alojados.

6.2 TOPE DE LA LECHADA DE CEMENTO PRINCIPAL

Esta es la profundidad en la cual queda posicionada la lechada de cemento principal (15,8 lpg) después de ser bombeada. El tope requerido por Ecopetrol S.A para el pozo de estudio fue de 6662,0 pies. Sin embargo, en el registro de evaluación de cemento, este tope no puede identificarse debido a la condición del cemento dentro del hueco.

La empresa requirió que la altura de la lechada principal fuera de 1.200 pies. Esta sección es de gran importancia ya que se diseña especialmente para garantizar un sello efectivo desde el zapato, y así aislar las formaciones adyacentes que puedan presentar problemas de inestabilidad, presiones anormales, zonas ladronas o influjos de fluidos no deseados hacia el anular.

El registro de cementación para esta profundidad, desde 6.600 pies hasta 6.700 pies refleja, como en la sección anterior, una muy baja calidad del cemento. Presenta un valor promedio de amplitud del CBL de 30 mV, que como ya se dijo anteriormente, está fuera del rango establecido por Ecopetrol S.A, que dicta de debe estar entre 10 a 15 mV. Se sigue considerando que la lechada de cemento en este punto está contaminada.

Los valores de impedancia en esta sección se mantienen constantes en un promedio de 2 mRayls. No se acerca en ningún punto al valor de impedancia que, según la empresa operadora, debe ser mayor de 4,0 mRayls que corresponde a un cemento liviano de alto rendimiento, sin exceder los 6,5 mRayls que corresponde a cementos de ultra alta densidad.

El registro VDL sigue mostrando las señales vibración de las conexiones de las tuberías (chevron pattern) a 6615, 6660, 6705 pies; y no muestra mejoría hasta este punto. El índice de adherencia aumenta un poco, siendo en un pequeño intervalo mayor al 40% a 6660 pies aproximadamente, sin embargo, no se mantiene, sino que por el contrario vuelve a descender.

El mapa de impedancias sigue mostrando fluido en el hueco, pero con una mayor proporción de componente sólido. Además de esto, se manifiesta un claro canal de flujo que comunica las zonas supra e infra yacentes a la de estudio a lo largo de toda la sección registrada.

Esto es un problema debido a que, por estas zonas sin cemento aparente, migran fluidos como gas, o se presentan graves inconvenientes de corrosión a la tubería. Esto ocurre debido a la contaminación del cemento con lodo de perforación. Presenta porcentajes en promedio del 50% de fluido y 20% de contaminante.

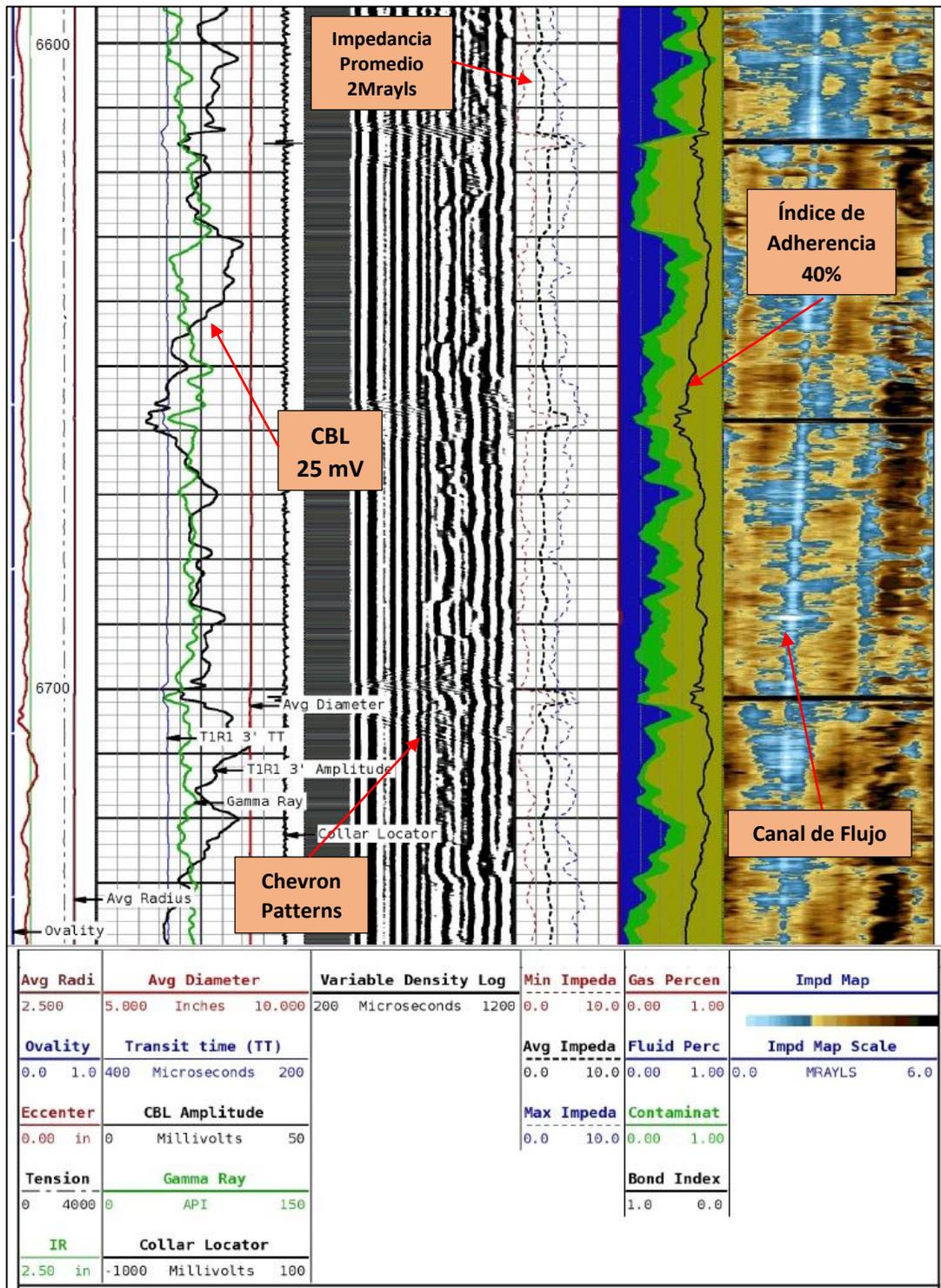
Esta es una de las zonas más delicadas en cuestión de calidad de cementación, sin embargo, en el pozo de estudio se tuvieron resultados deficientes de la misma, como lo muestra la **Figura 80**.

Por otra parte, en esta sección, en el caso de simulación, los resultados obtenidos son buenos. Se obtuvo una eficiencia de desplazamiento en este punto del 99%, con una concentración de lechada principal del 73% y de lechada de relleno del 26%, dejando este 1% restante en contaminantes dentro del anular.

Adicionalmente, la rotación en esta sección del pozo provee una mejoría en la centralización, logrando de esta manera minimizar el efecto de los espacios de flujo amplio y estrecho en el anular, los cuales pueden ser una causa de la contaminación de la lechada de cemento ya que, al impedir la circulación de los pre-flujos y la misma lechada a un costado del anular, el revoque del lodo de perforación es ineficiente.

Así mismo, se puede evidenciar un flujo más uniforme, representado en los topes de cemento regulares alrededor del anular y una distribución de fluidos pareja, con un contacto paralelo entre ellos a lo largo de la columna.

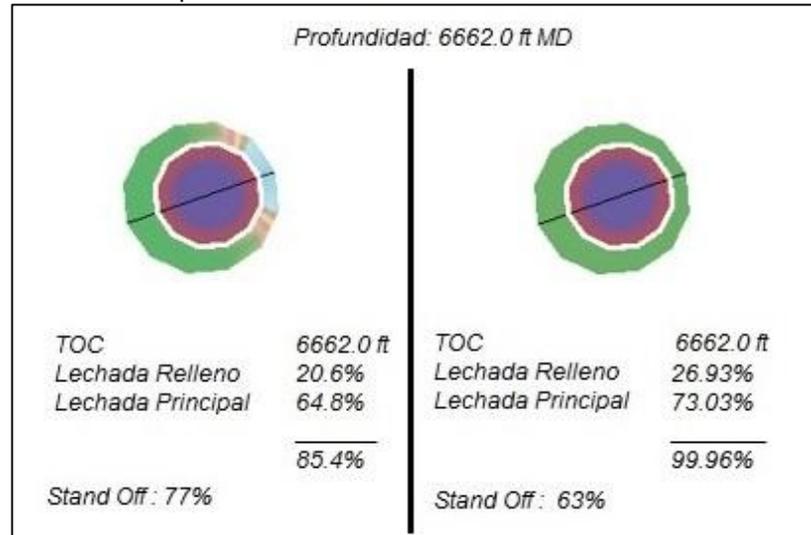
Figura 80. Sección del registro de evaluación del cemento en el tope de la lechada principal. (@ 6600 pies a 6700 pies).



Fuente: Registro de Evaluación de Cementación del Pozo de Estudio. Ecopetrol S.A. 2015.

En la **Figura 81**, se puede ver una comparación de un corte longitudinal a esta profundidad de referencia para el pozo rotado (derecha) y no rotado (izquierda), donde se evidencian los beneficios ya explicados.

Figura 81. Cortes longitudinales del pozo sin rotación y rotando a 20 RPM. @6662 pies.



Fuente: Simulador iCem®. Halliburton. 2016.

6.3 TOPE DE LA LECHADA DE CEMENTO DE RELLENO

La lechada de cemento de relleno, es bombeada con el fin de acondicionar el pozo, sirviendo de colchón entre los fluidos bombeados anteriormente y la lechada principal, y para proveer una jerarquía reológica concordante a los requerimientos de presión hidrostática de la operación. Esta lechada fue bombeada con un peso de 13,6 lpg y con volumen suficiente para alcanzar una columna de 1.500 pies.

El tope requerido por la empresa fue de 5162, 0 pies. Sin embargo, según el registro de evaluación del cemento, se estima el tope real de la lechada de relleno en 5.750,0 pies aproximadamente. Esto puede deberse a la incertidumbre generada por la falta de registro caliper, el cual permite conocer el diámetro del hueco incluyendo las variaciones de este por derrumbes o erosión de las formaciones perforadas. Por esta razón, es muy probable que el cálculo de volumen de cemento fuera errado, causando que sea insuficiente y no alcance la altura esperada en el diseño, a pesar del 50% de volumen de exceso bombeado por la empresa. Según lo explicado en el Capítulo 4, al re-estimar el diámetro del hueco, se encontró que este tenía un exceso del 94% sobre el diámetro de la broca utilizada para esta fase.

El registro de cementación para el tope de la lechada de relleno se evalúa desde 5.600 pies hasta 5.900 pies, como se puede ver en la **Figura 82**. Allí se puede ver que ésta es la sección a lo largo de todo el pozo con la mejor adherencia de cemento, sin decir que presente buenos resultados o cumpla con los requisitos. Muestra un valor promedio de amplitud del CBL de 20 mV, que sigue están fuera del rango establecido por Ecopetrol S.A, pero mejora con respecto al valor de las dos secciones de estudio anteriores.

Los valores de impedancia en esta sección aumentan hasta aproximadamente 3 mRayls en promedio, aunque sigue siendo un valor muy bajo como para ser considerado bueno.

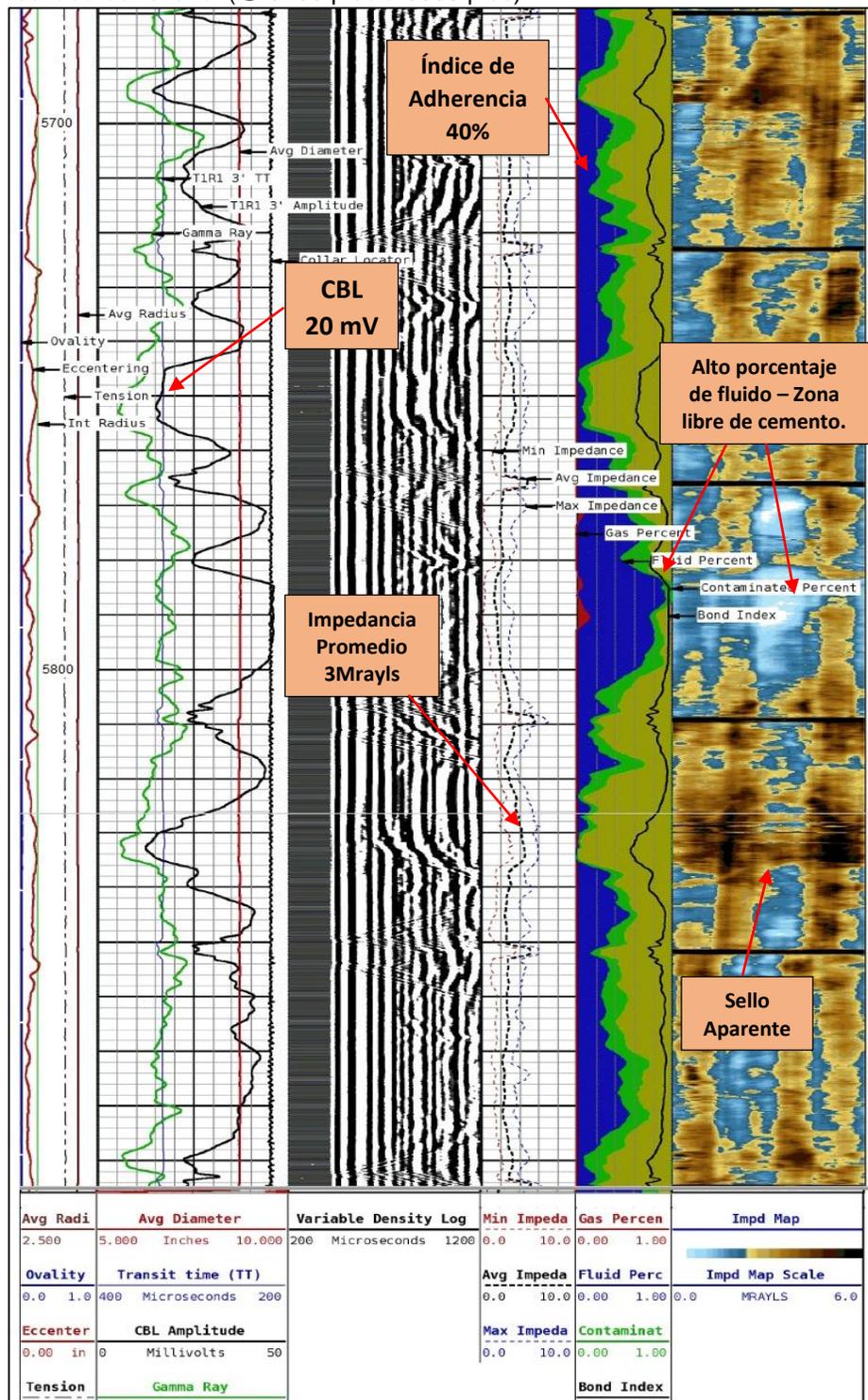
El registro VDL tiene un comportamiento constante, aunque muestra mejoras en la adherencia a la formación. Cabe resaltar que la vibración de la tubería se da con total libertad, siendo esto un mal parámetro de adherencia. El índice de adherencia se mantiene constante en un promedio de 40%.

El mapa de impedancias muestra en esta sección dos sellos de aproximadamente 10 pies de longitud cada uno, el primero de 5685 a 5695 pies y el segundo de 5825 a 5838 pies aproximadamente. Se siguen observando zonas libres de cemento y canales de flujo. Aproximadamente a 5790 pies, hay un porcentaje de 5% de gas presente, lo que indica que el aislamiento zonal, el cual es objetivo principal de la cementación, no es efectivo; permitiendo el flujo de gas por detrás del revestimiento. Esto, como se dijo anteriormente, acarrea problemas de corrosión o presiones descontroladas. Presenta porcentajes en promedio del 40% de fluido y 20% de contaminante.

Al analizar el caso de simulación en esta sección, se pueden apreciar resultados considerablemente mejores a los de la operación real e incluso a los de la operación simulada para el pozo de estudio. Se obtuvo una eficiencia de desplazamiento en este punto del 80%, con una concentración de contaminantes de 19%, entre ellos un 3,6% de lodo de perforación. La concentración de lechada principal es 50,8% y de lechada de relleno es de 29,8%.

En este caso la profundidad del tope de cemento, que está ubicado a 5.985,0 pies, también se ve alterada debido a la incertidumbre en el diámetro del hueco y la posible mejora en el posicionamiento de los fluidos dentro del anular debido a la rotación aplicada. El tope se encuentra 843 pies por debajo del requerimiento de la compañía. Sin embargo, se puede ver como con la mejora en la centralización del revestimiento, hay un flujo uniforme de fluidos en el anular, removiendo el lodo en gran proporción. Se siguen evidenciando los espacios de flujo amplio y estrecho pero su efecto no es tan significativo en este caso, como se puede observar, ya que los topes de cemento a los dos lados del anular son uniformes.

Figura 82. Sección del registro de evaluación del cemento en el tope de la lechada de relleno. (@ 5700 pies a 5900 pies).



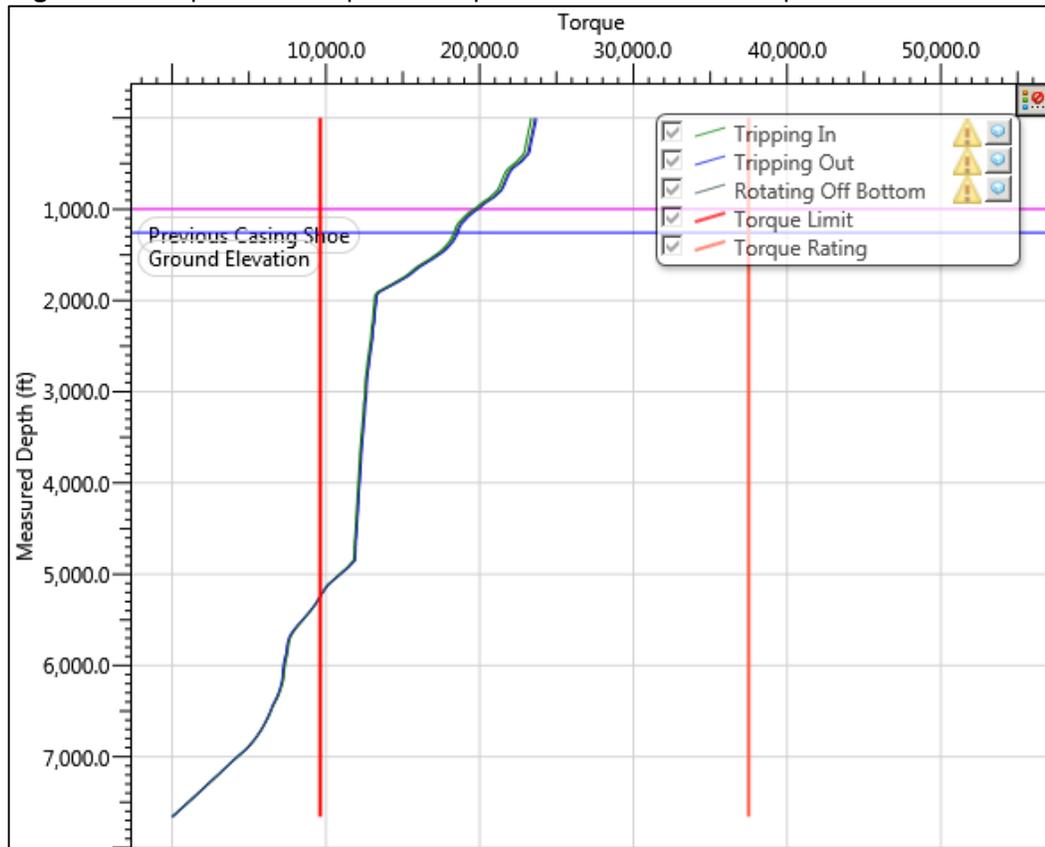
Fuente: Registro de Evaluación de Cementación del Pozo de Estudio. Ecopetrol S.A. 2015.

6.4 TORQUE

Otro parámetro importante que debe analizarse, es el torque ejercido en el momento de aplicar rotación al revestimiento. El esfuerzo excesivo que debe soportar la conexión de la tubería cuando está en rotación puede ocasionar que esta se desacople o colapse, resultando en problemas operacionales que posteriormente implican trabajos de pesca. Para contrarrestar los efectos de la rotación durante la operación se puede hacer uso de la herramienta Anillos de Torque, que fue explicada anteriormente. Estos disminuyen el espacio libre que queda en el acople entre tubo y tubo, aumentando así su resistencia al torque.

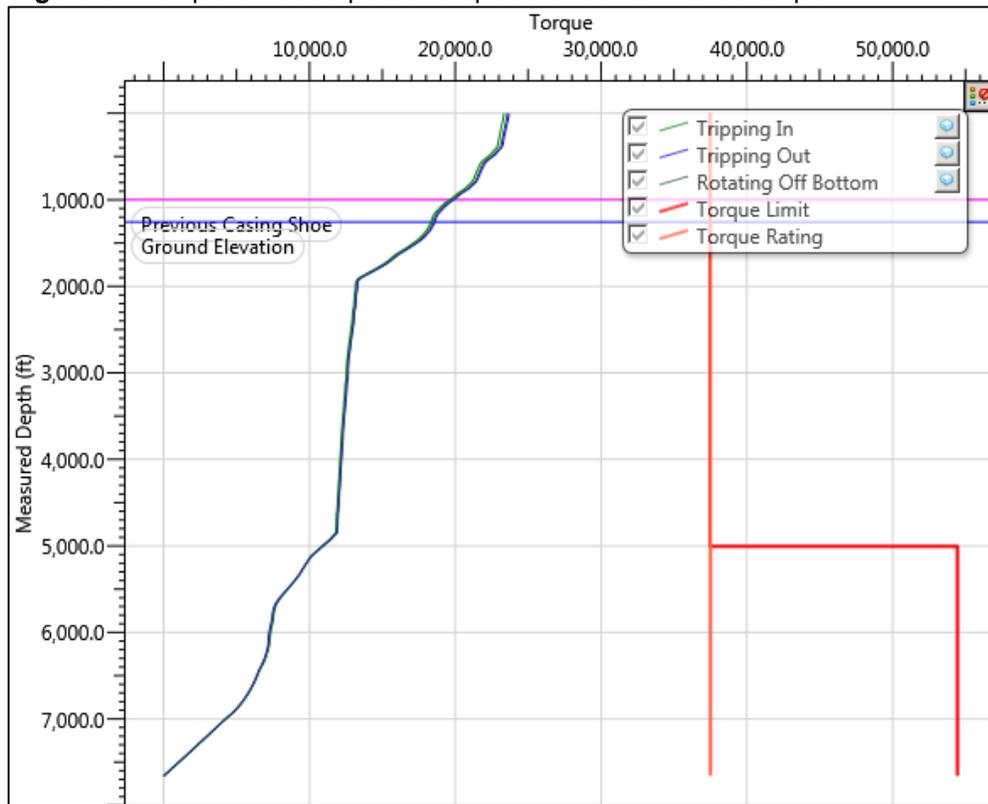
Para tal fin, se debe realizar una predicción sobre el torque que se va a generar según las condiciones específicas del pozo en cuestión y de la operación, con respecto a la profundidad. Tal predicción, para interés del presente trabajo, se realizó mediante una simulación en el software WellPlan®, corrida por ingenieros de la empresa Ecopetrol S.A, la cual dio como resultado las gráficas expuestas en la **Figura 83** y la **Figura 84**.

Figura 83. Torque simulado para una operación sin anillos de torque.



Fuente: Ecopetrol S.A. 2016.

Figura 84. Torque simulado para una operación con anillos de torque.



Fuente: Ecopetrol S.A. 2016.

En estas gráficas se pueden observar las líneas verde claro, azul y verde oscuro, las cuales corresponden al torque generado bajando, subiendo y rotando respectivamente. Por otro lado, se puede observar una línea roja que indica el límite de torque resistido por las conexiones entre los tubos. Al analizar y comparar las gráficas resultantes, se pueden obtener las siguientes conclusiones.

- En la **Figura 83**, desde la superficie hasta una profundidad de 4900 pies aproximadamente, el torque que se genera con respecto a la profundidad es significativamente mayor al límite de torque soportado por las conexiones en esa profundidad (línea roja). Por lo tanto, se espera en este escenario que la tubería colapse y se pierda en el pozo, lo cual, como se explicó anteriormente, generaría sobre costos y tiempos no productivos, o en el caso más crítico, la pérdida total del pozo.
- En la **Figura 84**, por otro lado, se puede observar que el límite de torque soportado por la conexión usando anillos de torque aumentó más de tres veces en magnitud comparado con los valores convencionales y gracias a éste aumento, el torque generado en el pozo con respecto a la profundidad es significativamente menor al soportado por las conexiones. Por lo tanto, se espera

que no se genere ningún problema asociado al torque durante la cementación dinámica.

- Para llevar a cabo una cementación dinámica, se requiere de una resistencia al torque en las conexiones mayor a la que se tiene en las conexiones comunes. Sin embargo, la única solución al problema no son los anillos de torque. Se puede realizar una evaluación técnica y económica de la resistencia al torque con conexiones tipo Premium, entre otras.

El torque o momento de fuerza, es el producto que se da entre una fuerza y una distancia de un eje sobre el cual se aplica esta fuerza. Para el pozo de estudio se puede observar que el torque generado en la superficie es el mayor y este disminuye a medida que aumenta la profundidad. Es decir, es inversamente proporcional. Según el concepto de torque, la fuerza ejercida es directamente proporcional al torque generado, por lo tanto, se puede inferir que en la superficie se genera mayor fuerza que en el fondo del pozo. Esto ocurre debido a que al mecanismo de accionamiento superior (Top Drive) se le facilita más rotar el revestimiento en la superficie debido al poco peso que está movilizándolo. Por otro lado, en el fondo del pozo, la fuerza y por ende, el torque que logra generar el Top Drive es mucho menor, ya que le es mucho más complicado mover con la misma fuerza toda la columna de revestimiento que se tiene hasta el fondo del pozo.

Es evidente en la **Figura 83** y la **Figura 84**, que el torque generado después de los 5000 pies de profundidad es mucho menor al que resistiría incluso una conexión convencional. Sin embargo, para la operación de cementación dinámica se recomienda reforzar toda la columna de revestimiento desde superficie hasta el zapato, debido esencialmente a que como se explicó en los riesgos que se pueden presentar durante una operación de este tipo, es posible que se genere un exceso de torque debido a derrumbes o problemas mecánicos generados por la rotación continua del revestimiento en el pozo. Por lo tanto, teniendo en cuenta que se debe rotar el revestimiento durante toda la cementación, es mejor dejar cierta tolerancia al torque como un factor de seguridad y evitar el colapso de la tubería debido a un exceso de este.

Se puede concluir que es de gran importancia asegurar la integridad del tubo por medio de un control adecuado del esfuerzo ejercido al momento de aplicar rotación al revestimiento.

6.5 CONCLUSIÓN

El registro de evaluación del cemento tomado para la operación de cementación del revestimiento intermedio de 9 5/8 presenta muy malos resultados, evidenciando una baja calidad de la cementación realizada.

Se infiere que estos resultados son debidos a la contaminación del cemento resultante de una pobre limpieza del hueco antes de que las lechadas fueran bombeadas. El efecto de baja centralización, que conlleva al anular a dividirse en dos espacios de flujo irregulares, ocasiona que el cemento no fluya libre y uniformemente a través de todo el anular, permitiendo que volúmenes de contaminante queden adheridos a las paredes del revestimiento y de las formaciones.

El caso de simulación expuesto muestra resultados que, aunque son teóricos, representan una cementación de calidad, cumpliendo con los requerimientos básicos establecidos por la empresa operadora y la normatividad presente en Colombia. Se demuestra por medio de esta simulación que la aplicación de la técnica de cementación dinámica supone un conjunto de ventajas que a la hora de evaluar una operación de cementación, ayudaría a cumplir los objetivos para la cual es diseñada desde un principio, evitando la necesidad de operaciones de cementación remedial como en el caso del pozo de estudio.

Parámetros como el régimen de flujo, esfuerzo de corte, disposición, concentración y eficiencia de desplazamiento de los fluidos en el anular, que obtengan valores o resultados dentro de los rangos o requerimientos establecidos, garantizan una cementación de calidad. Estos parámetros se consiguen mediante la rotación de la tubería de revestimiento en simultáneo al bombeo de los pre-flujos y lechadas necesarios para la operación.

Las diferencias y ventajas expuestas en este trabajo, de la técnica de cementación dinámica sobre una operación de cementación convencional, de la mano con la comparación de resultados teóricos y reales, demuestran que utilizar la herramienta Cabeza Rotativa de Cementación como medio para la aplicación de la rotación necesaria en una operación dinámica, es un procedimiento viable que asegura buenos resultados de cementación, integridad del pozo y aislamiento zonal, desde un principio, lo que asegura la vida útil del pozo en el cual sea utilizada la herramienta.

7. EVALUACIÓN FINANCIERA

En el presente capítulo, se expone el impacto financiero que tiene la realización de una operación de cementación dinámica en comparación con una operación de cementación convencional. Para tal fin, se realiza una comparación de egresos con la unidad monetaria de valor constante Dólar Americano (USD).

Realizar una operación de cementación dinámica con respecto a una convencional acarrea más costos. Sin embargo, se espera que al realizar la cementación de la fase intermedia de un pozo inyector mediante la aplicación de la técnica de cementación dinámica, se logre un sello hidráulico efectivo, lo que garantiza la vida productiva del pozo inyector y de esta manera evitar sobre costos y tiempos no productivos asociados a la realización de operaciones de cementación remedial para corregir problemas de integridad generados por una mala cementación, tal como ocurrió en el pozo de estudio expuesto en el Capítulo 4.

Para los dos casos expuestos en el presente trabajo, se incurren en los costos detallados en la **Tabla 20**, los cuales para efectos de esta investigación son idénticos. Esto con el fin de evaluar el efecto de la cementación dinámica solo como una técnica mecánica, es decir que parámetros como los tiempos de bombeo, los caudales, los volúmenes de fluido, el número o tipo de tuberías, centralizadores y el zapato del revestimiento son los mismos, y se procede a evaluar solo las ventajas de rotar el revestimiento, para lo cual solo se necesitan anillos de torque y una Cabeza Rotativa de Cementación (RCH).

Tabla 20. Costos base de la cementación tanto dinámica como convencional.

COSTOS COMUNES CEMENTACIÓN CONVENCIONAL Y DINAMICA CAPEX				
Concepto	Unidades	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Valor Total (USD)
Casing 9 5/8	UND	187	31,69	5926,00
Centralizadores	UND	60	252,00	15120,00
Collar Flotador	UND	1	3000,00	3000,00
Zapato Flotador	UND	1	2020,00	2020,00
Tapones	UND	2	990,00	1980,00
Stop Collar Tipo Anillo	UND	120	94,00	11280,00
Soldadura Liquida	UND	4	34,00	136,00
			TOTAL	39462,00

Fuente: Reporte Anual de Costos de Operaciones. Ecopetrol S.A. 2015.

7.1 COSTOS DE INVERSION (CAPEX)

Para un mejor entendimiento del presente capítulo, se definen los conceptos más importantes. Costo se define como “el valor sacrificado para adquirir bienes o servicios, que se mide en dólares mediante la reducción de activos o al incurrir en pasivos en el momento que se obtienen los beneficios.”⁵⁹ Por lo tanto, un costo de inversión o CAPEX (Capital Expenditure), hace referencia al dinero que se invierte para mejorar los activos productivos de la empresa, tales como edificios, maquinaria y equipo, vehículos, entre otros.

7.1.1 Escenario Actual. Para llevar a cabo una operación de cementación convencional no es necesario realizar ninguna inversión, puesto que los equipos y todo lo necesario para cumplir los objetivos de un trabajo de cementación de este tipo, ya los tiene la empresa y con ellos ha venido llevando a cabo sus operaciones de cementación.

7.1.2 Escenario Propuesto. Para la realizar una operación de cementación dinámica como la propuesta en el presente trabajo, se debe incurrir en costos de inversión por equipos adicionales que permiten técnicamente su realización. Básicamente los equipos adicionales necesarios son los anillos de torque y la RCH. Esta última se considera como un costo de operación, ya que es incluida en el servicio de cementación. En la **Tabla 21** se muestra el costo de inversión necesario para la realización de una cementación dinámica.

Tabla 21. Costo de inversión para realizar una cementación dinámica.

CEMENTACIÓN DINAMICA			
Concepto	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Valor Total (USD)
Anillos de Torque	200	120,00	24000,00

Fuente: Reporte Anual de Costos de Operaciones. Ecopetrol S.A. 2015.

7.2 COSTOS DE OPERACIÓN (OPEX)

Los costos de operación hacen referencia a los desembolsos de dinero en los que incurre una empresa para llevar a cabo sus actividades. Por lo tanto, en esta sección, se tendrá en cuenta el dinero que la empresa invierte en renta de equipos, toma de un servicio, y costo de los insumos necesarios para llevar a cabo la operación.

⁵⁹ Empresa Prestadora de Serivicos. Diseño Del Servicio Cementación Remedial. [Electronic(1)]: 2015b. 11.

A continuación, se muestran los costos de operación de las dos alternativas del presente proyecto. En ambos casos se existe un costo por el servicio de cementación, el cual incluye los equipos, la movilización de estos y la mano de obra necesaria para la operación de cementación.

7.2.1 Escenario Actual. A continuación, en la **Tabla 22**, se muestran los costos operacionales que acarrea la realización de una cementación convencional. Para este caso, el servicio de cementación es más económico, pues incluye herramientas convencionales. Sin embargo, se podrá observar que se tiene un costo operacional adicional por concepto del servicio de cementación remedial.

Este costo, como se explicó en el presente trabajo, es el costo en que se incurre para solucionar los problemas de integridad del pozo debidos a una mala cementación primaria. Además de esto, se incurre en tiempos adicionales del taladro y su personal durante la duración de la operación. Estos tiempos no son contemplados en el presupuesto del pozo, ni de la campaña general de perforación.

Tabla 22. OPEX de la operación de Cementación Convencional.

CEMENTACIÓN CONVENCIONAL OPEX				
Concepto	Unidades	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Valor Total (USD)
Servicio de Cementación	UND	1	8300,00	8300,00
Espaciador Mecánico	Gal	2100	1,34	2814,00
Preflujo contra Perdida Circulación	Gal	1680	2,45	4116,00
Lavador	Gal	1680	0,59	991,00
Lechada de Relleno	Pie3	708	21,00	14868,00
Lechada Principal	Pie3	584	30,00	17228,00
Cemento Ultra-fino	Lbs/saco	229	48,00	10992,00
Surfactante Pre-flujos	Gal	30	35,00	1050,00
Movilización	UND	1	5000,00	5000,00
Servicio Cementación Remedial	UND	1	28188,00	28188,00
Tiempo No Productivo por Trabajo Remedial	Horas	48	1208,00	58000,00
			TOTAL	151547,00

Fuente: Reporte Anual de Costos de Operaciones. Ecopetrol S.A. 2015.

7.2.2 Escenario Propuesto. En la **Tabla 23**, se pueden apreciar los costos operacionales asociados a una operación de cementación dinámica. Para este caso, el servicio de cementación tiene un costo más alto debido a que tiene un recargo por la instalación, alquiler y operación de la cabeza rotativa de cementación; herramienta principal para esta operación.

Tabla 23. OPEX de la operación de Cementación Dinámica.

CEMENTACIÓN DINAMICA				
Concepto	Unidades	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Valor Total (USD)
Servicio de Cementación	UND	1	9100,00	9100,00
Espaciador Mecánico	Gal	2100	1,34	2814,00
Pre-flujo contra Perdida Circulación	Gal	1680	2,45	4116,00
Lavador	Gal	1680	0,59	991,00
Lechada de Relleno	pie3	708	21,00	14868,00
Lechada Principal	pie3	584	30,00	17228,00
Cemento Ultra-fino	Lbs/saco	229	48,00	10992,00
Surfactante Pre-flujos	Gal	30	35,00	1050,00
Movilización	UND	1	5000,00	5000,00
			TOTAL	66159,00

Fuente: Reporte Anual de Costos de Operaciones. Ecopetrol S.A. 2015.

7.3 EVALUACION FINANCIERA

La evaluación financiera propuesta, es la comparación de egresos entre una operación de cementación convencional, que es la realizada en el pozo antecedente que tuvo malos resultados, con respecto a una operación de cementación dinámica que, como se ha explicado anteriormente, se espera que arroje buenos resultados de cementación primaria, evitando costos adicionales en trabajos remediales y tiempos de espera del taladro.

El tiempo adicional que se debe invertir en la realización de trabajos remediales afecta negativamente el presupuesto del pozo. Este efecto, proyectado, llegaría a afectar el presupuesto de una campaña de perforación en gran magnitud. Lo anterior debido a que el taladro que se encuentra en servicio durante la operación de perforación y cementación previas, debe esperar a que se realicen las operaciones asociadas al trabajo remedial, las cuales no se encontraban presupuestados en el cronograma del equipo. Por lo tanto, la movilización del taladro a las locaciones de los trabajos posteriores y las operaciones que dependen de él, se verán retrasadas.

Además de esto, cada hora de alquiler del taladro tiene un costo que ya ha sido asumido en el momento que se alquila el equipo. Al mantener el taladro en espera, se debe asumir un sobre-cargo adicional. Por lo tanto, como se observa en la **Tabla 24**, en la cementación convencional, los egresos tienen un gran impacto en el presupuesto del pozo debido a que los trabajos remediales tienen una duración de, aproximadamente, dos días adicionales. Esto significa que se incurre en el costo de dos días no presupuestados en los cuales el taladro tiene una tarifa de USD 29.000 diarios, aproximadamente. Este tiempo no productivo evidencia el impacto que una operación como esta acarrea, ya que finalmente, se estima un sobre costo de USD 58.000 por haber obtenido malos resultados durante el trabajo de cementación primaria.

Como se puede observar en la **Tabla 24**, la operación de cementación convencional, aunque no requiere de equipos ni inversiones adicionales, cuesta para este escenario USD 61.388 adicionales con respecto a la operación de cementación dinámica. Esta diferencia se ve claramente representada por la presencia de malos resultados y trabajos remediales necesarios. Mientras que la cementación dinámica, aun con inversiones adicionales, gracias a lo expuesto en los capítulos anteriores del presente trabajo, se espera que tenga buenos resultados inicialmente evitando estos sobre costos.

Tabla 24. Diferencia de costos entre una operación de cementación convencional, comparada con una operación de cementación dinámica.

	CONVENCIONAL	DINAMICA	DIFERENCIA
CAPEX (USD)	39.462	63.462	- 24.000
OPEX (USD)	151.547	66.159	85.388
TOTAL (USD)	191.009	129.621	61.388

Fuente: Reporte Anual de Costos de Operaciones. Ecopetrol S.A. 2015.

La operación de cementación convencional, debido a sus malos resultados, requirió de un costo adicional OPEX, que está asociado a la necesidad de llevar a cabo una operación de cementación remedial. Esta última requiere de tiempo, personal e insumos, entre otros; lo que conlleva a un sobrecosto de USD 28.188, valor que no se considera en la cementación dinámica, ya que se espera que, al aplicar esta técnica propuesta, la cementación primaria arroje buenos resultados desde un principio.

Para poder realizar la cementación dinámica se incurre en costos adicionales que pueden impactar financieramente el presupuesto del pozo como lo son una inversión en equipos (anillos de torque) de USD 24.000 y un sobre costo en OPEX de USD 800 que corresponde al alquiler y puesta en servicio de la cabeza rotativa de cementación. Lo anterior puede verse en la **Tabla 25**.

Tabla 25. Comparación de egresos de la cementación convencional con respecto a la cementación dinámica.

COMPARACION DE EGRESOS CEMENTACIÓN CONVENCIONAL VS CEMENTACIÓN DINÁMICA								
	Concepto	Unidades	Cantidad Convencional	Cantidad Dinámica	Precio Unitario Convencional (USD)	Precio Unitario Dinámica (USD)	Valor Total Convencional (USD)	Valor Total Dinámica (USD)
CAPEX	Casing 9 5/8	UND	187	187	31,69	31,69	5.926,00	5.926,00
	Centralizadores	UND	60	60	252,00	252,00	15.120,00	15.120,00
	Collar Flotador	UND	1	1	3.000,00	3000,00	3.000,00	3.000,00
	Zapato Flotador	UND	1	1	2.020,00	2020,00	2.020,00	2.020,00
	Tapones	UND	2	2	990,00	990,00	1.980,00	1.980,00
	Stop Collar Tipo Anillo	UND	120	120	94,00	94,00	11.280,00	11.280,00
	Soldadura Liquida	UND	4	4	34,00	34,00	136,00	136,00
	Anillos de Torque	UND	0	200	120,00	120,00	-	24.000,00
	Sub-Total						39.462,00	63.462,00
OPEX	Servicio de Cementación	UND	1	1	8.300,00	9.100,00	8.300,00	9.100,00
	Espaciador Mecánico	Gal	2100	2100	1,34	1,34	2.814,00	2.814,00
	Preflujo contra Perdida Circulación	Gal	1680	1680	2,45	2,45	4.116,00	4.116,00
	Lavador	Gal	1680	1680	0,59	0,59	991,00	991,00
	Lechada de Relleno	pie3	708	708	21,00	21,00	14.868,00	14.868,00
	Lechada Principal	pie3	584	584	30,00	30,00	17.228,00	17.228,00
	Cemento Ultra-fino	Lbs/saco	229	229	48,00	48,00	10.992,00	10.992,00
	Surfactante Pre-flujos	Gal	30	30	35,00	35,00	1.050,00	1.050,00
	Movilización	UND	1	1	5000,00	5000,00	5.000,00	5.000,00
	Tiempo No Productivo Trabajo Remedial	Horas	48	0	1208,00	1208,00	58.000,00	-
	Cementación Remedial	UND	1	0	28188,00	28188,00	28.188,00	-
Sub-Total						151.547,00	66.159,00	
Gran Total							191.009,00	129.621,00

Fuente: Reporte Anual de Costos de Operaciones. Ecopetrol S.A. 2015.

7.4 CONCLUSIONES

Una compañía aprueba presupuesto para diferentes proyectos bajo la condición de obtener un retorno que le permita pagar a sus empleados, pagar todos sus gastos y obtener una utilidad. Bajo esta premisa es claro que el presupuesto de un proyecto impacta fuertemente en el retorno que se pueda lograr del mismo. Para los fines pertinentes, las áreas de ingeniería realizan AFE (*Authorization for Expenditures*), que es un presupuesto de todos los costos en que se incurrirá para realizar determinado proyecto, el cual es autorizado según lo considere la compañía. Tal presupuesto es limitado y la operación no debe superar en costos lo presupuestado, ya que, si eso ocurre, se verá afectado el retorno requerido por la compañía para el negocio en cuestión. Por lo tanto, con la comparación de egresos realizada, se puede concluir lo siguiente.

- Gracias a una inversión inicial en los equipos necesarios para una cementación dinámica, es posible evitar los sobrecostos demostrados en la **Tabla 22**, lo cual, para el presupuesto del pozo será muy positivo, ya que tendrá un ahorro de USD 61.388 o 32% sobre el total de egresos, y será más fácil entregar un retorno a la compañía.
- Los sobre costos en los que se incurre con los problemas presentados, afectan en gran magnitud el presupuesto de una campaña de perforación, sobre todo teniendo en cuenta que el presente escenario es un pozo de inyección para disposición de agua del campo el cual no genera ingresos a la compañía.
- Según los antecedentes entregados por la empresa, tres de los cinco pozos inyectoros perforados en la Campaña 2015, tuvieron malos resultados de cementación. Esta relación corresponde a un 40% de éxito, un porcentaje muy bajo, lo cual quiere decir que la probabilidad de obtener malos resultados al realizar una cementación convencional es muy alta (60%). Bajo esta situación se puede concluir que un ahorro de USD 61.388 por pozo, al final de una campaña completa de perforación puede significar un ahorro proporcional a este valor multiplicado por la cantidad de pozos que arrojen malos resultados, que finalmente aportaría en gran manera las utilidades de la empresa.
- Los cálculos presentados en la presente evaluación financiera, son producto de una simulación, sin embargo, los antecedentes reales en este tipo de operaciones son muy dicentes en cuanto a buenos resultados de cementación se refiere. Por lo tanto, se espera que los resultados con la inversión inicial ya explicada para realizar la cementación dinámica sean exitosos, y no se requiera de ningún trabajo remedial como los que fueron necesarios en el pozo de estudio presentado en este trabajo.

8. CONCLUSIONES

- Las características geológicas del área de estudio dificultan el asentamiento del zapato del revestimiento 9 5/8 pulgadas a la profundidad deseada, debido a que allí se encuentra la lutita E4 que, por el flujo axial de circulación continuo para el acondicionamiento del pozo, pudo haber sido lavada y derrumbada, generando un espacio anular más grande, dificultando la limpieza del anular y el emplazamiento de cemento en este punto tan importante para la integridad del pozo.
- La carencia del registro caliper genera gran incertidumbre en la operación de cementación ya que no permite identificar zonas lavadas ni conocer el tamaño del anular para calcular un volumen de cemento adecuado que cubra la totalidad del mismo.
- Aun con las buenas prácticas en la operación y un 50% de exceso de cemento bombeado, el registro de calidad de cemento muestra un sello deficiente a lo largo de todo el intervalo registrado, por lo cual se puede inferir que el problema que generó los canales detrás del revestimiento fue una mala limpieza de lodo y pre-flujos y un deficiente emplazamiento del cemento en todo el anular.
- Por ser un pozo inyector, se requiere una excelente integridad de cemento para asegurar la vida productiva del mismo, ya que debe soportar altas presiones y grandes volúmenes de fluido. Como no se logró, fue necesario realizar una cementación remedial lo cual repercutió en costos y tiempos adicionales.
- La rotación del revestimiento durante la cementación de un pozo es una práctica que permite mejorar la eficiencia de desplazamiento en la cementación, debido a que aumenta los esfuerzos de corte y agrega una velocidad tangencial que permite flujo de fluidos al rededor tanto del anular estrecho como del amplio.
- La rotación del revestimiento durante la cementación de un pozo permite un flujo de cemento alrededor de todo el anular, por lo tanto, se espera un tope uniforme del mismo y se espera tener cemento sin contaminantes alrededor de todo el tubo, lo cual asegura no flujo de fluidos por el anular.
- Según el grafico de torque con respecto a profundidad, se concluye que para la operación de cementación dinámica se requieren anillos de torque, para mejorar la resistencia del revestimiento a este esfuerzo, lo cual impactara económica y técnicamente la operación.

- De no utilizar anillos de torque durante la operación de cementación dinámica el revestimiento colapsará y existirá un alto riesgo de perder el pozo, o de incurrir en operaciones adicionales para recuperar tubería pegada o desprendida en el fondo del pozo.
- Aunque la simulación con 40 RPM arroja mejores resultados que la de 20 RPM, estos no son significativos como para someter la operación a riesgos por esfuerzos excesivos de torque y a sobre costos por mayor energía requerida, o posible necesidad de solucionar problemas asociados a la rápida rotación. Por eso se escogió el caso de rotación a 20 RPM.
- Gracias a la cementación dinámica, en el tope de la lechada principal (6662 pies) se obtuvo una disminución del 16% del Standoff con respecto a la cementación convencional, lo cual indica que el revestimiento se recostó menos en la pared del pozo permitiendo mejor flujo de fluidos a través del mismo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este dato no es representativo debido a que se tiene un standoff dinámico, es decir que cambia con respecto al tiempo durante toda la operación
- Gracias a la cementación dinámica, en el tope de la lechada principal (6662 pies) se obtuvo un aumento de 20% en la eficiencia de desplazamiento, lo cual permitió que en este corte transversal se alojara un 99,3% menos contaminantes con respecto al caso de cementación convencional, quedando finalmente en este corte, para el caso de cementación dinámica, un 99,9% de cemento.
- En el tope de la lechada principal (5162 pies) se obtuvo un 50% menos de contaminantes con respecto al caso de cementación convencional, por lo tanto, en este punto también se espera un sello hidráulico mejorado.
- Los porcentajes expuestos son concluyentes en que la cementación dinámica permite un emplazamiento mucho mejor del cemento y una limpieza más eficiente del pozo, lo cual finalmente permitirá tener un sello hidráulico efectivo, tal como se puede observar en el tope de la lechada principal (6662 pies) con un porcentaje de cemento de 99,9% en todo el anular.
- La variable más influyente a la hora de obtener buenos resultados por medio de la técnica de cementación dinámica, es el aumento en la eficiencia de desplazamiento. Gracias al aumento de esta variable se tiene un espacio anular limpio de contaminantes y un porcentaje cercano al 100% de concentración de cemento, que finalmente es el objetivo principal de la cementación de un pozo, poner una columna de cemento que cubra todo el anular y cuya concentración sea suficiente para sellar hidráulicamente todo el espacio entre la formación y el revestimiento. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el aumento de esta

variable se da gracias al standoff dinámico y el aumento del esfuerzo de corte. Estas son variables que están muy relacionadas entre sí.

- La aplicación de un parámetro de reciprocación, aunque es recomendado en el análisis teórico de una operación, en la realidad acarrea problemas de presión de vacío y arrastre que traen consecuencias negativas para el trabajo de cementación. Por lo cual, al comparar los beneficios que esta práctica aporta contra los riesgos que implica, se determina que su aplicación no es recomendable.
- El uso de la herramienta Cabeza Rotativa de Cementación, por medio de la cual se logra la aplicación de la técnica de cementación dinámica, implica enormes beneficios a la operación tanto técnicos como económicos, por lo tanto, se considera que su uso es viable y aporta ventajas operacionales.
- Realizar una operación de cementación dinámica conlleva a asumir una inversión considerable en los equipos necesarios para cumplir con los objetivos operacionales de la misma.
- Al presentar resultados deficientes de una operación de cementación primaria convencional, se incurre en sobre costos muy significativos debido a la necesidad de llevar a cabo operaciones de cementación remedial, las cuales no son consideradas al momento de realizar el presupuesto para un pozo.
- A pesar de la inversión necesaria en equipos y servicios para la cementación dinámica, ésta garantiza obtener los resultados requeridos en la cementación primaria desde el principio, evitando la necesidad de realizar trabajos remediales. Esto representa un ahorro del 32%, además de la facilidad y las numerosas ventajas operacionales que implica ésta técnica.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda, para la realización de una cementación dinámica, el uso de centralizadores de aletas en espiral en la distribución estudiada en la presente investigación. Estos accesorios, gracias a su forma, contribuyen al flujo helicoidal de lechada y pre-flujos. Esto significa que facilitan el flujo de fluidos del lado amplio del anular al lado estrecho.
- Se recomienda que previamente a la realización de una operación de cementación dinámica, se realice una simulación y análisis de ésta, que permita establecer con exactitud el torque y arrastre generado por la rotación del revestimiento en el pozo durante la cementación con respecto a la profundidad. Esto se debe a que la necesidad del uso de anillos de torque radica en la resistencia al torque de las conexiones a lo largo del revestimiento. De no soportar el torque, se deben usar anillos de torque para evitar el colapso del revestimiento y posible pérdida del pozo.
- De requerir anillos de torque, se recomienda que, en la conexión del equipo de flotación, estos no sean utilizados, debido a que el uso de soldadura líquida garantiza que no se tendrán fallas en un punto que es de gran importancia para el rendimiento de la operación.
- Se recomienda realizar la operación de cementación dinámica con un parámetro de rotación de máximo 20 RPM, debido a que rotar a esta velocidad, garantiza un buen funcionamiento de los equipos evitando sobrecargas a los mismos y al revestimiento por los esfuerzos ejercidos en él.
- Se recomienda investigar la viabilidad de una operación de cementación dinámica, utilizando la técnica de perforación con revestimiento (Casing Drilling). Dado que, lo anterior permitirá que el lodo de perforación se mantenga en condición dinámica dentro del pozo, evitando la gelificación del fluido durante la corrida de revestimiento y los posteriores problemas asociados a la limpieza del hueco. Adicionalmente, reduciendo tiempos operacionales de corrida de revestimiento y, por lo tanto, costos que, proyectados a un plan de desarrollo, pueden traer ahorros y ventajas representativos.
- Se recomienda investigar el efecto que tendría variar el diseño de la lechada de cemento y la hidráulica de la operación, en aspectos tales como la reología, los caudales y los volúmenes de los fluidos; en los resultados de la operación de cementación dinámica.
- Se recomienda investigar el desempeño de las tuberías de conexión tipo Premium en comparación con los anillos de torque, con el fin de determinar la

ventaja económica con respecto a la operacional al momento de rotar el revestimiento durante la aplicación de la técnica de cementación dinámica.

- Se recomienda realizar un análisis técnico-estadístico de una operación de cementación dinámica variando ciertos factores en rangos determinados que permitan delimitar los resultados obtenidos dependiendo de la alteración individual o en conjunto de aspectos mecánicos de la operación tales como la frecuencia de rotación de la Cabeza Rotativa de Cementación, la cantidad, tipo y disposición de centralizadores, las concentraciones y tipos de fluidos, caudales de bombeo, tipo de tuberías y conexiones, entre otros.
- Se recomienda realizar el estudio de la implementación de la técnica de cementación dinámica, así como de la cabeza rotativa de cementación, en una campaña de perforación de pozos productores, teniendo en cuenta una proyección a gran escala que evidencie las ventajas económicas y los beneficios operacionales que trae este tipo de procedimiento.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Colombian Sedimentary Basins. Bogotá D.C. ANH. 2007.

_____. Integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. Diciembre 2012.

Anónimo. "Ecopetrol, Ahora única dueña de Cubarral". En: El Tiempo. Bogotá D.C. 29 Enero de 2000.

Colombia. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Resolución 9 0341 De 2014. (Marzo 28 de 2014). Por la cual se establecen requerimientos técnicos y procedimientos para exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales. Bogotá, Colombia.,2014.

CPVEN. Seminario De Cementación. Seminario ed. Maracaibo, Venezuela.: 2008.

ECOPETROL S.A. Investigación Incidente Pozo De Estudio: Lecturas De Registros De Evaluación De Cementación. 2015.

_____. Campo de producción Castilla alcanzo nuevo record de producción [en línea] < <http://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletines-de-prensa/Boletines%202015/Boletines%202015/Campo-produccion-Castilla-alcanzo-nuevo-record-produccion>>. Citado 7 de Marzo de 2016.

EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS. Diseño Del Servicio Cementación Casing Intermedio 9 5/8". 2015.

_____. Diseño Del Servicio Cementación Remedial. 2015.

_____. Reporte Final Del Servicio De Cementación Para Ecopetrol S.A. 2015.

_____. Revisión Cementación Casing Intermedio 9 5/8". 2015.

HOLT, Calvin y LAHOTI, Niles Nandkishor. Dynamic Cementation Improves Wellbore Construction and Reduces the Hazards of Groundwater Contamination in Shale Plays. Society of Petroleum Engineers, 2012. ISBN 978-1-61399-247-0.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Normas colombianas para presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá, D.C.:ICONTEC 2008. 41p. NTC 1486.

_____. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. Bogotá, D.C: ICONTEC 2008. 33p. NTC 5613.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. Bogotá, D.C: ICONTEC 1998. 23p. NTC 4490.

J. DE PORTA. Léxico Estratigráfico Internacional. América Latina. Colombia. 1974.

JUTTEN,J. J. y HAYMAN,A. J. Microannulus Effect on Cementation Logs: Experiments and Case Histories. Society of Petroleum Engineers, 1993. ISBN 978-1-55563-497-1.

M. JULIVERT. Léxico Estratigráfico Internacional. América Latina. Colombia. 1968.

MORONI,Nevio, *et al.* Pipe Rotation Improves Hole Cleaning and Cement-Slurry Placement: Mathematical Modeling and Field Validation. Society of Petroleum Engineers, 2009. ISBN 978-1-55563-261-8.

RODRIGUEZ Otavo Alba. Estudios de control de pozos durante las operaciones de mantenimiento y workover en el Campo Apiay y Castilla la Nueva. 2012.

SCHLUMBERGER. Manuel De Cementación: Introducción a La Cementación. 69 p.

_____. Well Cementing. Erik B. Nelson; Dominique Guillot ed. Sugar Land, Texas.: 2006. 799 p. ISBN 978-097885300-6

SMOLEN,James J. Cased Hole and Production Log Evaluation. Penn Well, 1996. 380 p.

SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso Básico/Intermedio De Cementación. Villavicencio, Colombia.: 2015. 96 p.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Geología, Geofísica Y Geoquímica De La Cuenca Catatumbo. 2009.