

EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA A NIVEL DE LABORATORIO DEL
DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN, USANDO GRANO DE CAUCHO
RECICLADO COMO MATERIAL DE CONTROL DE PÉRDIDA

JUAN MANUEL LOBO PLATA
JUAN SEBASTIAN MEDINA RICAURTE

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C
2018

EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA A NIVEL DE LABORATORIO DEL
DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN, USANDO GRANO DE CAUCHO
RECICLADO COMO MATERIAL DE CONTROL DE PÉRDIDA

JUAN MANUEL LOBO PLATA
JUAN SEBASTIAN MEDINA RICAURTE

Proyecto Integral de Grado para optar al título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

DIRECTOR

José David Díaz
Ingeniero de Petróleos

ORIENTADOR

Jorge Andrés Tovar
Ingeniero de Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ, D.C
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

ING. JORGE ANDRÉS TOVAR

ING. IVÁN PEÑALOZA

ING. MIGUEL RODRÍGUEZ

Bogotá, Mayo del 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro:

Dr. JAIME POSADA DIAZ

Vice-rector de Desarrollo y Recursos Humanos:

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCA-PEÑA

Vice-rectora Académica y de Posgrados:

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General:

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCIA-PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería:

Dr. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería de Petróleos:

Dr. JOSÉ HUMBERTO CANTILLO SILVA

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.

Primero a Dios y a la Virgen. A mi madre Alison Medina Ricaurte y a mi abuela Fanny Ricaurte Gómez, todos lo que soy es gracias al ejemplo que ellas me han dado.
A mi tía Claudia Marcela Medina Ricaurte, su esposo Juan Manuel Polania Perdomo e hijos, que me han brindado un apoyo incondicional en todo momento.
A mi familia y mis amigos que han estado pendientes durante esta etapa de mi vida y han ayudado a cumplir esta meta.

Juan Sebastián Medina Ricaurte

A Dios y a la vida. A mi padre Manuel Lobo Quintana, a mi madre Sofía Plata Mejía y a mis hermanos por ser ese apoyo constante e incondicional.

A todas las personas que contribuyeron en mi proceso formativo, por brindarme el conocimiento y apoyo en esta etapa de mi vida.

A todas aquellas personas que han estado presentes en los momentos de grandes tribulaciones y se han mantenido a mi lado.

Juan Manuel Lobo Plata

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerles a Dios y a la Virgen, por todo lo que me han brindado, por protegerme y cuidarme en todo momento. A mi madre Alison Medina Ricaurte, por su amor y apoyo absoluto en cada paso tomado, quien con su esfuerzo y sacrificio me ha brindado lo necesario y mucho más. Por los consejos brindados y la confianza que ha depositado en mí. A mi abuela Fanny Ricaurte Gómez, por cariño incondicional y estar pendiente de mí en cada paso dado. A mi tía Claudia Marcela Medina Ricaurte, su esposo Juan Manuel Polania Perdomo e hijos, los cuales desde el día que decidí tomar este camino han esta presentes apoyándome, aconsejándome y guiándome. A toda mi familia.

Agradezco a la empresa Superior Energy Services la cual nos dio la oportunidad y apoyo para culminar este proyecto. Al ingeniero José David Díaz por su constante interés y colaboración los cuales permitieron el desarrollo de este trabajo. A la ingeniera Angélica Ortiz por toda la ayuda durante las pruebas de laboratorio, por lo enseñado y los consejos brindados. A los otros ingenieros y técnicos, por guiarnos y ayudarnos a culminar este trabajo de grado.

A mi compañero Juan Manuel Lobo Plata por su entendimiento, por su dedicación y compromiso durante todo el trabajo de grado. A mis amigos por acompañarme y ayudarme durante el camino.

Juan Sebastián Medina Ricaurte

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la vida por brindarme las oportunidades y las condiciones que me permiten ser quien soy el día de hoy. A mis padres y a mis hermanos por haberme formado como un ser integro en valores, por su apoyo incondicional frente a cada situación, agradezco por todos los esfuerzos y sacrificios que realizaron para brindarme todo lo necesario. A Paula Garzón por permanecer a mi lado y brindarme todo su apoyo en los momentos de necesidad, por aconsejarme de manera asertiva. A todos ellos por brindarme su cariño, apoyo y orientación en todo momento.

Agradezco a la empresa Superior Energy Services por habernos brindado la oportunidad para desarrollar este proyecto. Agradezco al ingeniero José David Díaz, quien con su colaboración, interés y dedicación nos brindó el apoyo necesario para alcanzar las metas propuestas. Agradezco a la ingeniera Angélica Ortiz por el constante apoyo brindado durante la realización de las pruebas de laboratorio, por los conocimientos impartidos, por su apoyo incondicional y la orientación brindada en el proceso. A los ingenieros y técnicos quienes apoyaron de manera continua la elaboración del proyecto.

A mi compañero Juan Sebastián Medina por todo el apoyo, por el compromiso y la constancia que nos permitió culminar este proyecto. A todas aquellas personas que me impartieron conocimiento dentro y fuera del aula de clase, gracias a todos estoy preparado para enfrentar una nueva etapa en mi vida.

“No importa cuán estrecho sea el portal, cuan cargada de castigos la sentencia, soy el amo de mi destino: soy el capitán de mi alma”

William Ernest Henley

Juan Manuel Lobo Plata

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	28
OBJETIVOS	29
1. GENERALIDADES DE CAMPO CASTILLA	30
1.1 HISTORIA	30
1.2 LOCALIZACIÓN	30
1.3 MARCO GEOLÓGICO	32
1.3.1 Columna estratigráfica	32
1.3.2 Estratigrafía	32
1.3.2.1 Basamento	32
1.3.2.2 Formación Une	32
1.3.2.3 Formación Gachetá	32
1.3.2.4 Formación Guadalupe	34
1.3.2.5 Formación Barco	34
1.3.2.6 Formación Los Cuervos	34
1.3.2.7 Formación Mirador	34
1.3.2.8 Formación Carbonera	34
1.3.2.9 Formación León	37
1.3.2.10 Formación Guayabo	37
1.3.2.11 Formación Necesidad	37
1.3.3 Geología estructural	37
1.3.4 Geología del petróleo	38
1.3.4.1 Roca Generadora	38
1.3.4.2 Roca Reservorio	38
1.3.4.3 Roca Sello	38
1.3.4.4 Trampas	39
1.3.4.5 Migración	39
1.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CAMPO CASTILLA	39
1.4.1 Pérdidas en el Campo Castilla	39
2. GENERALIDADES DE LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETRÓLEROS	40
2.1 CEMENTACIÓN	40
2.2 CEMENTO EMPLEADO EN LA INDUSTRIA PETRÓLERA Y CLASIFICACIÓN	40
2.2.1 Cemento tipo Portland	40
2.2.2 Clasificación de los cementos	41
2.3 TIPOS DE CEMENTACIÓN	41
2.3.1 Cementación primaria	41
2.3.1.1 Objetivos de la cementación primaria	43
2.3.1.2 Procedimiento de cementación primaria	43

2.3.2 Cementación secundaria	45
2.3.2.1 Objetivos de la cementación remedial	45
2.3.2.2 Tipos de cementación remedial	45
2.4 ADITIVOS DE CEMENTACIÓN	46
2.4.1 Aceleradores	47
2.4.1.1 Cloruro de Calcio	47
2.4.1.2 Cloruro de Sodio	48
2.4.1.3 Silicato de Sodio	48
2.4.1.4 Agua salada	48
2.4.1.5 Sulfato de calcio	48
2.4.2 Retardadores	48
2.4.2.1 Lignosulfonato	49
2.4.2.2 Ácido hidroxilcarboxílico	49
2.4.2.3 Organofosfonatos	49
2.4.3 Reductores de densidad	49
2.4.3.1 Bentonita	49
2.4.3.2 Puzolanas	50
2.4.3.3 Tierras diatomeas	50
2.4.3.4 Metasilicato de sodio anhidro	50
2.4.4 Densificantes	50
2.4.4.1 Ilmenita (FeTiO_3)	50
2.4.4.2 Hematita (Fe_2O_3)	51
2.4.4.3 Barita (BaSO_4)	51
2.4.4.4 Tetraóxido de manganeso (Mn_3O_4)	51
2.4.5 Dispersantes (Reductores de fricción)	51
2.4.6 Aditivos para el control de pérdida de filtrado	52
2.4.6.1 Material particulado	52
2.4.6.2 Polímeros solubles en agua	53
2.4.7 Agentes de control de pérdida de circulación	53
2.4.7.1 Cementos tixotrópicos	54
2.4.7.2 Material fibroso	54
2.4.7.3 Agentes puenteantes	54
2.4.8 Aditivos especiales	55
2.4.8.1 Agentes antiespumantes	55
2.4.8.2 Agentes de fortalecimiento	55
2.4.8.3 Agentes de rastreo radioactivo	56
2.4.8.4 Descontaminantes de lodo	56
2.5 PROPIEDADES DE UNA LECHADA DE CEMENTO	56
2.5.1 Densidad	56
2.5.2 Rendimiento	57
2.5.3 Tiempo de bombeabilidad	57
2.5.4 Requerimiento de agua	58
2.5.5 Fluido de mezcla	59
2.5.6 Reología	60
2.5.6.1 Clasificación de los modelos reológicos	60

2.5.6.2 Viscosidad Plástica	67
2.5.6.3 Punto cedente	67
2.5.6.4 Esfuerzo de Geles	68
2.5.7 Pérdida de fase líquida	68
2.5.8 Fuerza de compresión	68
2.5.9 Fluidez de la lechada	68
2.5.10 Sedimentación de la lechada de cemento	69
2.5.11 Permeabilidad de la lechada de cemento	69
2.6 PROPIEDADES DE LA LECHADA EN CAMPO CASTILLA	69
2.6.1 Sección superior de 17 ½" CSG 13 3/8"	69
2.6.1.1 Lechada Principal	70
2.6.1.2 Lechada de Relleno	70
2.6.2 Sección intermedia de 12 ¼" CSG DE 9 5/8"	70
2.6.2.1 Lechada Principal	71
2.6.2.2 Lechada de Relleno	71
2.7 ESTADO MECÁNICO POZO LM-01 SECCIÓN SUPERIOR	72
2.8 ESTADO MECÁNICO POZO LM-01 SECCIÓN INTERMEDIA	73
3. USO DEL CAUCHO RECICLADO EN LA INDUSTRIA	74
3.1 DISPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS	74
3.1.1 Artesanal	74
3.1.2 Energético	75
3.1.3 Reciclado	76
3.1.3.1 Termólisis	76
3.1.3.2 Pirolisis	76
3.1.3.3 Trituración Criogénica	77
3.1.3.4 Trituración Mecánica	77
3.2 OBTENCIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO	78
3.2.1 Propiedades	78
3.2.2 Tamaños de malla	79
3.3 USO EN LA INDUSTRIA	80
3.3.1 Pisos de caucho	80
3.3.2 Fuentes de energía	81
3.3.3 Mezclas asfálticas	81
3.3.4 Mezcla de concreto	82
4. DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS PARA LA SELECCIÓN DE LA MEJOR LECHADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO	83
4.1 CÁLCULOS PARA UNA LECHADA DE CEMENTO DE 15,8 PPG CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO	83
4.2 PLAN DE PRUEBAS INICIALES A NIVEL DE LABORATORIO	91
4.2.1 Mezclabilidad	93
4.2.2 Reología	95
4.2.2.1 Esfuerzos de geles	96
4.2.3 Acondicionamiento de lechadas	96

4.2.4 Agua libre	97
4.2.5 Pérdida de filtrado estática	98
4.3 RESULTADOS PRUEBAS INICIALES Y ANÁLISIS	100
4.3.1 Sección de 17 ½" CSG 13 3/8"	100
4.3.2 Sección de 12 ¼" CSG 9 5/8"	104
5. PRUEBAS REALIZADAS A LAS LECHADAS SELECCIONADAS (PRO)	109
5.1 SEGUNDO PLAN DE PRUEBAS Y PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO	109
5.1.1 Tiempo de bombeabilidad	109
5.1.2 Ensayo destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión de una lechada de cemento	112
5.1.3 Ensayo no – destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión de una lechada de cemento	115
5.1.4 Determinación de las propiedades mecánicas de la lechada de cemento	117
5.1.5 Prueba de sedimentación	119
5.1.6 Evaluación de pérdida de circulación	121
5.2 DATOS OBTENIDOS	122
5.2.1 Composición de las lechadas	122
5.2.1.1 Composiciones de la lechada evaluada para la selección superior 17 ½" CSG 13 3/8"	122
5.2.1.2 Composiciones de la lechada evaluada para la sección intermedia 12 1/4" CSG 9 5/8"	123
5.2.2 Resultado del segundo grupo de pruebas	124
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS PARA LAS LECHADAS SUPERIOR E INTERMEDIA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO	128
6.1 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE BOMBEABILIDAD	131
6.1.1 Análisis de tiempo de bombeabilidad de la sección superior 17 ½" CSG 13 3/8"	131
6.1.2 Análisis de tiempo de bombeabilidad de la sección intermedia 12 1/2" CSG de 9 5/8"	132
6.2 ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIANTE EL ENSAYO NO DESTRUCTIVO	134
6.2.1 Análisis de evaluación de la resistencia a la compresión mediante el ensayo no destructivo de la sección superior de 17 ½" CSG 13 3/8"	134
6.2.2 Análisis de evaluación de la resistencia a la compresión mediante el ensayo no destructivo para la sección intermedia de 12 ¼" CGS 9 5/8"	135
6.3 ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIANTE EL ENSAYO DESTRUCTIVO	137
6.3.1 Análisis de evaluación de la resistencia a la compresión mediante el ensayo destructivo de la sección intermedia de 12 1/2" CSG 9 5/8"	137
6.4 ANÁLISIS DE PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN A LA LECHADA DE 12 1/2" CSG 9 5/8" ADICIONADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)	139
6.5 ANÁLISIS DE PRUEBA DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN	139

7. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL USO DE CAUCHO RECICLADO EN LECHADAS DE CEMENTACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO	140
7.1 EVALUACIÓN FINANCIERA	140
7.2 ECALUACIÓN DE COSTOS UNITARIOS	141
7.2.1 Costos asociados a la preparación de la lechada de la sección superior 17 ½" CSG 13 3/8"	141
7.2.1.1 Costos de evaluación de lechada promedio de lechada de la sección superior 17 ½" CSG 13 3/8"	142
7.2.1.2 Costos de evaluación de lechada PRO para la sección superior 17 ½" CSG 13 3/8"	142
7.2.2 Costos asociados a la preparación de la lechada de la sección intermedia 12 ½" CSG 9 5/8"	142
7.2.2.1 Costos de evaluación de lechada promedio de lechada de la sección intermedia 12 ½" CSG 9 5/8"	143
7.2.2.2 Costos de evaluación de lechada PRO para la sección intermedia 12 ½" CSG 9 5/8"	143
7.3 COMPARACIÓN DE COSTOS DE LECHADAS PROMEDIO FRENTE A LECHADAS CON PRESENCIA DE GCR	144
8. CONCLUSIONES	147
9. RECOMENDACIONES	149
BIBLIOGRAFÍA	150

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Propiedades de Campo Castilla	39
Tabla 2. Clasificación de la severidad de las pérdidas de circulación	54
Tabla 3. Composición de la lechada de relleno para la selección de superficie de 17 ½" CSG de 13 3/8"	70
Tabla 4. Composición de la lechada de relleno para la selección de superficie de 17 ½" CSG de 13 3/8"	70
Tabla 5. Composición de la lechada principal para la selección intermedia de 12 ¼" CSG de 9 5/8"	71
Tabla 6. Composición de la lechada de relleno para la sección intermedia de 12 ¼" CSG de 9 5/8"	72
Tabla 7. Composición de la lechada de relleno de 15,8 ppg de la sección intermedia de 12 ¼"	83
Tabla 8. Gravedades específicas de los componentes de la lechada de relleno para la sección de 12 ¼"	85
Tabla 9. Gramos de los diferentes componentes de la lechada para la sección de 12 ¼"	91
Tabla 10. Requerimientos operacionales para la sección de 17 ½" CSG 13 3/8	102
Tabla 11. Requerimientos operacionales para la sección de 12 ¼" CSG 9 5/8	104
Tabla 12. Composición inicial de diseño de lechada de la sección superior	123
Tabla 13. Composición inicial de diseño de lechada de la sección superior	123
Tabla 14. Composición inicial de diseño de lechada de la sección intermedia	123
Tabla 15. Composición final del diseño de lechada para sección intermedia	124
Tabla 16. Resultados segundo plan de pruebas sección 17 ½" CSG 13 3/8" con GCR al 5% BWOOC	124
Tabla 17. Costos de fábrica asociados al desarrollo del proyecto	141
Tabla 18. Costos asociados a la evaluación de lechada promedio de sección superior	142
Tabla 19. Costos asociados a la evaluación de lechada PRO de sección superior	142
Tabla 20. Costos asociados a la evaluación de lechada promedio de sección intermedia	143
Tabla 21. Costos asociados a la evaluación de lechada PRO de sección intermedia	144
Tabla 22. Margen de diferencia para la evaluación de un saco de cemento entre las lechadas	144
Tabla 23. Comparación de costos para preparar un barril de lechada para la sección superior 17 ½" CSG 13 3/8"	145
Tabla 24. Comparación de costos para preparar un barril de lechada para la sección intermedia 12 ¼" CSG 9 5/8"	145

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica Campo Castilla y base de operaciones Superior – Villavicencio	31
Figura 2. Columna estratigráfica Llanos Orientales	33
Figura 3. Corte longitudinal de la cuenca de Llanos Orientales	38
Figura 4. Ilustración del proceso de cementación primaria	44
Figura 5. Tipos de tapones de cemento	46
Figura 6. Descripción de fluido Pseudo – plástico de la ley de potencias	61
Figura 7. Descripción del flujo laminar y turbulento bajo la ley de potencias	62
Figura 8. Comportamiento del modelo plástico de Bingham	64
Figura 9. Descripción de flujo laminar y turbulento bajo el modelo plástico Bingham	65
Figura 10. Comportamiento de modelo Herschel – Buckely	66
Figura 11. Descripción del flujo laminar y turbulento bajo el modelo plástico de Herschel – Buckley	67
Figura 12. Estado mecánico del pozo LM – 01 sección superior	72
Figura 13. Estado mecánico del pozo LM – 01 sección intermedia	73
Figura 14. Algunas disposiciones finales de los neumáticos	75
Figura 15. Planta termoeléctrica	76
Figura 16. Ciclo de transformación de neumáticos	77
Figura 17. Piso elaborado a partir del grano de caucho reciclado	80
Figura 18. Implementación del grano de caucho reciclado	82
Figura 19. Diseño de lechadas iniciales a evaluar	92
Figura 20. Primer plan de pruebas	93
Figura 21. Procedimiento de mezclado de una lechada de cemento según la norma API RP 10B	94
Figura 22. Ejemplo de un equipo de mezcla de cemento	94
Figura 23. Procedimiento de la prueba de reología a una lechada de cemento según la norma API RP 10B	95
Figura 24. Ejemplar de un viscosímetro rotacional con sus partes principales	96
Figura 25. Ejemplar de un consistómetro atmosférico	97
Figura 26. Procedimiento para el acondicionamiento de una lechada de Cemento según la norma API RP 10B	97
Figura 27. Procedimiento para determinación del agua libre en una lechada de cemento según la norma API RP 10B	98
Figura 28. Ejemplar de una filtroprensa HPHT estática	99
Figura 29. Procedimiento para la determinación de la pérdida de filtrado estática en una lechada de cemento según la norma API RP 10B	99
Figura 30. Mezcla de lechada con 10% BWO de GCR	102
Figura 31. Esquema del segundo plan de pruebas	109
Figura 32. Perfil de comportamiento de la gráfica de tiempo de bombeabilidad	110
Figura 33. Ilustración de consistómetro presurizado	111

Figura 34. Plano de la celda del consistómetro presurizado	111
Figura 35. Procedimiento de realización de la prueba de tiempo de Bombeabilidad	112
Figura 36. Plano de celda de moldes 2 X 2 para la cámara de curado	113
Figura 37. Equipo de cámara de curado	113
Figura 38. Equipo de prensa hidráulica	114
Figura 39. Procedimiento de la realización de ensayo destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión	115
Figura 40. Equipo UCA TWIN “Ultrasonic Cement Analyzer”	116
Figura 41. Equipo SGSA “Static Gel Strength Analyzer”	116
Figura 42. Procedimiento de la realización de ensayo no destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión	117
Figura 43. Equipo MPRO “Mechanical Properties Analyzer”	118
Figura 44. Plano celda de MPRO	118
Figura 45. Procedimiento para la determinación de las propiedades mecánicas de una lechada de cemento	119
Figura 46. Cilindros de sedimentación	120
Figura 47. Procedimiento de la realización prueba de sedimentación	120
Figura 48. Procedimiento para la determinación de pérdida de circulación de una lechada	122
Figura 49. Resultados prueba control de pérdida a lechada convencional sin aditivos de control de pérdida	126
Figura 50. Resultados prueba de lechada convencional con super – sweep al 0,21% BWOC como agente de control de pérdida	127
Figura 51. Resultados prueba de lechada con GCR al 2% BWOC como agente de control de pérdida	127

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación del cemento petrolero Portland	42
Cuadro 2. Objetivos de la cementación primaria	43
Cuadro 3. Objetivos de la cementación remedial	45
Cuadro 4. Propiedades del grano de caucho reciclado	78
Cuadro 5. Resultados de las pruebas iniciales realizadas a la sección de superficie 17 ½” con una densidad de 15,6 ppg	101
Cuadro 6. Resultados de las pruebas iniciales realizadas a la sección de superficie 12 ¼” con una densidad de 15,8 ppg	105
Cuadro 7. Resultados segundo plan de pruebas para las lechadas de la sección intermedia de 12 ¼” CSG de 9 5/8” con GCR como material de control de pérdida	125
Cuadro 8. Resultados segundo plan de pruebas para las lechadas de la sección intermedia 12 ¼” CSG de 9 5/8” con super sweep como material de control de pérdida	125
Cuadro 9. Resultados primer plan de pruebas a la lechada PRO de la sección superior de 13 3/8” con 5% BWOC de GCR	128
Cuadro 10. Resultados segundo plan de pruebas a la lechada PRO de la sección superior de 13 3/8” con 5% BWOC de GCR	129
Cuadro 11. Resultados primer plan de pruebas a la lechada PRO de la sección intermedia de 12 ¼” con 2% BWOC de GCR	129
Cuadro 12. Resultados segundo plan de pruebas a la lechada PRO de la sección intermedia de 12 ¼” con 2% BWOC de GCR	129
Cuadro 13. Evaluación del primer y segundo plan de pruebas a una lechada principal para la sección de 12 ¼” CSG 13 3/8” con Super – sweep como material de control de pérdida al 0,21% BWOC	130
Cuadro 14. Resultados pruebas de laboratorio de la lechada convencional para la sección intermedia de 12 ¼”	131

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Comportamiento de la viscosidad plástica frente a la variación de GCR	103
Gráfica 2. Comportamiento del punto cedente frente a la variación de GCR	103
Gráfica 3. Comportamiento reológico de las lechadas con GCR a temperatura ambiente	107
Gráfica 4. Comportamiento reológico con GCR a temperatura circulante	108
Gráfica 5. Tiempo de bombeabilidad para una lechada de 15,6 ppg con 5% de GCR para la sección de superficie de 17 ½”	132
Gráfica 6. Bombeabilidad para una lechada de 15,8 ppg con 2% de GCR y retardador al 0,13% para la sección intermedia de 12 ¼”	133
Gráfica 7. Resistencia a la compresión para una lechada de 15,6 ppg con 5% de GCR para la sección de superficie de 17 ½”	135
Gráfica 8. Resistencia a la compresión para una lechada de 15,8 ppg con 2% de GCR para la sección intermedia de 12 ¼”	136
Gráfica 9. Resistencia a la compresión para una lechada de 15,8 ppg con 0,21% de super – sweep para la sección intermedia de 12 ¼”	137
Gráfica 10. Comparación de presiones promedio para las lechadas de la sección de 12 ¼” CSG de 9 5/8”	138

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Clasificación de cationes y aniones según Edwards & Angstadt	47
Ecuación 2. Rendimiento de lechada	57
Ecuación 3. Densidad	58
Ecuación 4. Cálculo de la densidad de una lechada	58
Ecuación 5. Volumen de agua requerido	59
Ecuación 6. Fluido de mezcla	60
Ecuación 7. Esfuerzo de corte según Modelo de Ley de potencias	61
Ecuación 8. Viscosidad según modelo de ley de potencias	62
Ecuación 9. Esfuerzo de corte según modelo plástico de Bingham	63
Ecuación 10. Tasa de corte según modelo plástico de Bingham	63
Ecuación 11. Esfuerzo de corte del modelo Herschel – Buckley	65
Ecuación 12. Viscosidad del modelo Herschel – Buckley	66
Ecuación 13. Peso de una lechada de cemento	87
Ecuación 14. Peso del cemento en una lechada de cemento	88
Ecuación 15. Peso del agua en una lechada de cemento	88
Ecuación 16. Peso de los aditivos en una lechada de cemento	89
Ecuación 17. Peso de los aditivos sólidos en una lechada de cemento	90
Ecuación 18. Determinación del valor filtrado API	100
Ecuación 19. Determinación del valor de filtrado API para deshidratación en un lapso menor a 30 minutos	100
Ecuación 20. Determinación de la resistencia a la compresión	112
Ecuación 21. Determinación de densidad a partir de principio de Arquímedes	120

LISTA DE CÁLCULOS

	pág.
Cálculo 1. Peso de aditivos para un saco de cemento	84
Cálculo 2. Determinación de las densidades de cada componente de la lechada de relleno para la selección de 12 ¼"	84
Cálculo 3. Determinación de los diferentes volúmenes de los aditivos de la lechada de relleno para la sección de 12 ¼"	85
Cálculo 4. Determinación de la sumatoria de masa y volumen	86
Cálculo 5. Determinación del requerimiento de agua	86
Cálculo 6. Rendimiento del cemento	87
Cálculo 7. Determinación de los gramos de cemento necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio	88
Cálculo 8. Determinación de los gr de agua necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio	89
Cálculo 9. Determinación de los gr de antiespumante necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio	90
Cálculo 10. Determinación de los gramos de aditivos solidos necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio	91

LISTA DE ABREVIATURAS

°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados Celsius
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	American Petroleum Institute
Bbl	Barril
Bc	Unidades Bearden
BHCT	Temperatura circulante de fondo
BHSP	Temperatura estática de fondo
BHP	Presión de fondo
BWOC	Porcentaje en base al cemento
Cp	Centipoise
cm³	Centímetros cúbicos
Ec.	Ecuación
Ft	Pies
gal/Sx o	Galones por saco
GPS	
GCR	Grano de Caucho Reciclado
Gr	Gramos
H	Hora
Lb	Libras
Lbf	Libras fuerza
lb/Bbl	Libra por barril
lbf/100ft³	Libra fuerza por cada 100 pies cúbicos
lb/Sx	Libra por saco
mD	Milidarcys
Min	Minutos
Mm	Milímetro
mL	Mililitros
MD	Profundidad medida
PSI	Libra por pulgada cuadrada
Ppg	Libras por galón
RC	Resistencia a la Compresión
RPM	Revoluciones por minuto
SGSA	Static Gel Strength Analyzer
Sx	Saco
S	Segundo
TVD	Profundidad Vertical Verdadera
UCA	Ultra Sonic Cement Analyzer
Vp	Viscosidad plástica
WOC	Waiting On Cement
Yp	Yield Point

GLOSARIO

ADITIVO: materia adicionada a la lechada con el propósito de modificar propiedades determinadas.

ANTICLINAL: pliegue en forma de arco de las rocas, en el cual las capas de roca son convexas hacia arriba. Las capas más antiguas forman el núcleo del pliegue.

ARENISCA: este es un tipo de roca sedimentaria clástica, cuyos granos son generalmente del tamaño arena. Se habla de arena para hacer referencia a la arena consolidada o a una roca compuesta principalmente por arena cuarzosa.

BASAMENTO: corresponde normalmente a rocas ígneas o metamórficas, las cuales no poseen condiciones de porosidad y permeabilidad suficientes como para almacenar hidrocarburos, y por debajo de los cuales no se espera encontrar rocas sedimentarias.

CAMPO: el término hace referencia a la sección superficial que se encuentra por encima de una acumulación de petróleo en el sub-suelo.

CASING: una tubería de gran diámetro que se baja en un agujero descubierto y se cementa en el lugar.

CLINKER: este es un material que se obtiene durante la fabricación del cemento, donde se inicia con el cemento crudo, el cual primero pasa por un proceso de molienda, después se lleva a un horno donde se calcina a temperaturas de 1.400°C hasta obtener el Clinker.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA: es un tipo de representación de las unidades verticales de roca presentes en un área específica.

CUENCA SEDIMENTARIA: este término hace alusión a Una depresión de la corteza terrestre, formada por la actividad tectónica de las placas, en la que se acumulan sedimentos.

ESTRATIGRAFÍA: el estudio de la historia, la composición, las edades relativas y la distribución de los estratos, y la interpretación de los estratos para aclarar la historia de la Tierra.

FALLAS: se refiere a una fractura en un terreno determinado, debido a los esfuerzos tectónicos que superan la resistencia de las rocas y ocasionan un desplazamiento significativo, estas pueden ser de tipo normal o inversa.

FALLAS NORMALES: este término hace referencia a la falla en la cual el bloque elevado se desplaza hacia abajo respecto al bloque hundido.

FALLAS INVERSAS: hace referencia a la falla en la cual el bloque de falla elevado se desplaza de forma ascendente a lo largo de la superficie de falla, respecto al bloque hundido.

FLUIDO NEWTONIANO: este hace referencia fluidos típicos, en los cuales su viscosidad depende de las variaciones de presión o temperatura.

FLUIDO NO NEWTONIANO: son fluidos que pueden presentar propiedades de un líquido y de un sólido. A ciertas condiciones estos fluyen como líquidos y pueden exhibir propiedades de elasticidad plasticidad y resistencia similares a las de un sólido. Además, a diferencia de los fluidos newtonianos, la viscosidad de muchos fluidos no newtonianos varía con la velocidad de corte.

FORMACIÓN: la unidad fundamental de la lito-estratigrafía. Un cuerpo de roca suficientemente característico y continuo para ser mapeado.

KEROGENO: este es una mezcla de distintos compuestos químicos orgánicos presentes en las rocas sedimentarias. Los cuales no son solubles en los solventes comunes debido a su elevado peso molecular.

LECHADA: el presente término hace referencia a una mezcla de sólidos y líquidos en suspensión.

LUTITAS: roca sedimentaria detrítica, fisible, de granos finos, formada por la consolidación de partículas del tamaño de la arcilla y el limo en capas relativamente impermeables de escaso espesor. Es la roca sedimentaria más abundante

POZO: hace referencia a la perforación realizada desde superficie, en él se incluyen los tramos descubiertos y entubados, también puede referirse al diámetro interno de la pared del pozo.

ROCA GENERADORA: esta es una roca rica en contenido de materia orgánica, que a condiciones de presión y temperatura específicas generó petróleo y gas. Normalmente son lutitas o calizas con un porcentaje mayor al 0.5% de carbono orgánico total.

ROCA RESERVORIO: estas son las rocas donde se aloja el petróleo, debido a que poseen porosidad y permeabilidad para almacenarlo, normalmente las rocas almacenadoras son areniscas o carbonatos, con una granulometría de mediano a grueso.

ROCA SELLO: esta es una roca de baja porosidad y baja permeabilidad que evita que el petróleo fluya a través de ella

TRAMPA: una configuración de rocas adecuadas para contener hidrocarburos, selladas por una formación relativamente impermeable a través de la cual los hidrocarburos no pueden migrar.

TRAMPA ESTRATIGRÁFICA: hace referencia a la configuración de rocas que permiten el almacenamiento de hidrocarburos formado por los cambios producidos en el tipo de roca o por acuñamiento, discordancias, o rasgos sedimentarios, tales como los arrecifes.

RESUMEN

TÍTULO EVALUACIÓN TÉCNICO FINANCIERA A NIVEL DE LABORATORIO DEL DISEÑO DE LECHADAS DE CEMENTACIÓN, USANDO GRANO DE CAUCHO RECICLADO COMO MATERIAL DE CONTROL DE PÉRDIDA

El presente trabajo de investigación propuso la implementación del grano de caucho reciclado (GCR) en lechadas de cementación de pozos petroleros, con el propósito de mejorar principalmente el control de pérdida de circulación de las lechadas de cementación, a partir del uso del uso de grano de caucho reciclado como material de control de pérdida de circulación en sustitución de los materiales adicionados a la lechada por parte de la empresa Superior Energy Services en la cementación de pozos del Campo Castilla, en las secciones superior e intermedia de los pozos.

Para realizar la evaluación de las lechadas, fue necesario tener claridad de las generalidades del Campo Castilla, las características de la litología presente en el campo, la geología que delimita la presencia de hidrocarburos en el campo; se reconocieron las generalidades de la cementación de pozos petroleros, las distintas operaciones de cementación de los pozos de petróleo, el cemento utilizado en la industria petrolera, las propiedades de la lechada de cemento y los materiales adicionados a la lechada para variar las propiedades de la lechada; posteriormente se describieron las generalidades del grano de caucho reciclado (GCR) y su aplicación a nivel industrial.

Después de ello, se plantearon diferentes lechadas de cemento variando el porcentaje de GCR entre el 0% al 20% en base al peso de cemento, partiendo del diseño inicial de las lechadas bombeadas en los pozos del Campo Castilla y del primer plan de pruebas se seleccionó una lechada PRO para la sección de superficie y una para la sección intermedia, teniendo en cuenta los criterios operacionales requeridos por la empresa Superior Energy Services y los resultados obtenidos.

A las lechadas previamente seleccionadas se les diseñó un segundo plan de pruebas en donde se evaluaron diferentes propiedades como: el tiempo de bombeabilidad, resistencia a la compresión, control de pérdida de circulación entre otros. A partir de los datos obtenidos del segundo plan de prueba se realizó la comparación de las propiedades de las lechadas seleccionadas respecto a la lechada convencional usada actualmente en Campo Castilla, dicha lechada la cual cuenta en su composición con Super-Sweep como material de control de pérdida. Por último se realiza el estudio financiero para determinar la viabilidad de la implementación del GCR en lechadas de cementación diseñadas por la empresa Superior Energy Services para Campo Castilla, por medio de la comparación de costos de materia prima, determinando su viabilidad financiera.

PALABRAS CLAVE

- Grano de Caucho Reciclado.
- Lechadas de cementación.
- Pérdidas de circulación.
- Pruebas de laboratorio de cementación.

INTRODUCCIÓN

La pérdida de circulación en procesos de perforación y cementación pueden comprometer tanto la integridad del pozo como la de la formación. La pérdida de circulación de fluido es un problema asociado a las fracturas presentes en el reservorio, las cuales pueden ser naturales o inducidas; también se presenta en formaciones porosas y permeables, cuya presión pueda ser menor a la presión hidrostática del pozo, un caso frecuente de este caso puede ser un yacimiento de petróleo depletado, es decir, cuya presión ha declinado considerablemente debido a la explotación del reservorio.

La empresa Superior Energy Services dentro del portafolio de materiales que adicionan a sus lechadas de cementación hace uso de un material fibroso llamado Super-Sweep, el cual es un agente de control de pérdida; este aditivo crea un revoque en la cara de la formación reduciendo la migración de la lechada de cementación en zonas donde se generan dichas pérdidas. Una de las características principales de los materiales fibrosos y particulados utilizados para el control de pérdida, dichos materiales no son solubles en agua y buscan obstruir las vías de migración de fluido, debido a esto se busca de manera constante nuevos materiales que posean una mayor eficiencia y disminuyan los costos asociados a las pérdidas de circulación.

Por otra parte, una de las grandes preocupaciones de la sociedad en la actualidad es la disposición de materiales contaminantes que poseen una biodegradación prolongada o nula. Ya que el consumo acelerado de bienes que contengan dichos materiales como lo son el plástico, llantas, entre otros; generan toneladas de desperdicios que no es posible su reutilización, es decir, que puedan tener una disposición final adecuada o ser reciclados por completo. Es por ello que uno de los compromisos de la sociedad, es la búsqueda del desarrollo sostenible de la industria, que en conjunto con las buenas prácticas y los procesos de alta calidad permitan crear el balance entre el desarrollo económico, el cuidado ambiental y la búsqueda del desarrollo social.

Debido a lo expuesto anteriormente esta investigación plantea evaluar el uso del grano de caucho reciclado en lechadas de cementación, se investiga cómo se ven afectadas las propiedades de las lechadas para determinar la posible aplicación de este material cuyo ciclo vida útil inicialmente ha acabado, todo con el propósito de cubrir las dos necesidades previamente mencionadas como lo son el control de pérdida de circulación en pozos petroleros y la disposición final de materiales que representan un gran porcentaje de la contaminación a nivel global.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar técnico financieramente a nivel de laboratorio el diseño de lechadas de cementación, usando grano de caucho reciclado como material de control de pérdida.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Describir las generalidades y geología del Campo Castilla.
2. Describir las generalidades de la lechada de cementación que se utiliza actualmente en el Campo Castilla
3. Describir las generalidades y uso del aditivo de grano de caucho reciclado a nivel industrial.
4. Diseñar un plan de pruebas para seleccionar la lechada de cemento con grano de caucho reciclado que presente el mejor control de filtrado mediante un cuadro comparativo, usando normas API RP10A y API RP 10B.
5. Diseñar un plan de pruebas a la lechada previamente seleccionada y así, poder realizar la determinación de las propiedades físicas y mecánicas, usando la norma API RP10A y API RP 10B.
6. Comparar los resultados de la lechada con grano de caucho reciclado previamente seleccionada con respecto a la lechada utilizada actualmente en el Campo Castilla.
7. Evaluar la viabilidad financiera del grano de caucho reciclado en lechadas de cementación mediante la comparación de costos con respecto a la lechada promedio a nivel de laboratorio.

1. GENERALIDADES DE CAMPO CASTILLA

Este capítulo tiene por propósito la breve descripción de los aspectos del Campo Castilla, como lo son: la historia, la localización geográfica, el marco geológico, la historia de producción y la historia de pérdidas de fluido del campo.

1.1 HISTORIA

La historia del Campo Castilla se remonta al año 1944, desarrollada a través de campañas de exploración y perforación por parte de la empresa norteamericana Chevron Petroleum Company. Posteriormente a través del contrato de concesión de Cubarral, en el año de 1969 se realizó el descubrimiento del pozo Castilla 1 a una profundidad de 7.347ft; en este pozo se probó la presencia de dos tipos de crudo, en la Formación Mirador un crudo de 10°API y en las Formaciones Guadalupe y Une un crudo de 13.7°API.

Debido a las condiciones del crudo encontrado, se truncaron las posibilidades de iniciar su producción en el año del descubrimiento de Campo Castilla, la explotación comercial solo inició hasta el año 1975, a través del Contrato de Asociación Cubarral, contrato celebrado por partes igualitarias entre Ecopetrol y Chevron. La explotación del Campo Castilla estuvo a cargo de la empresa Chevron hasta el año 2000 y en este año pasó el manejo de la explotación del campo a Ecopetrol S.A.

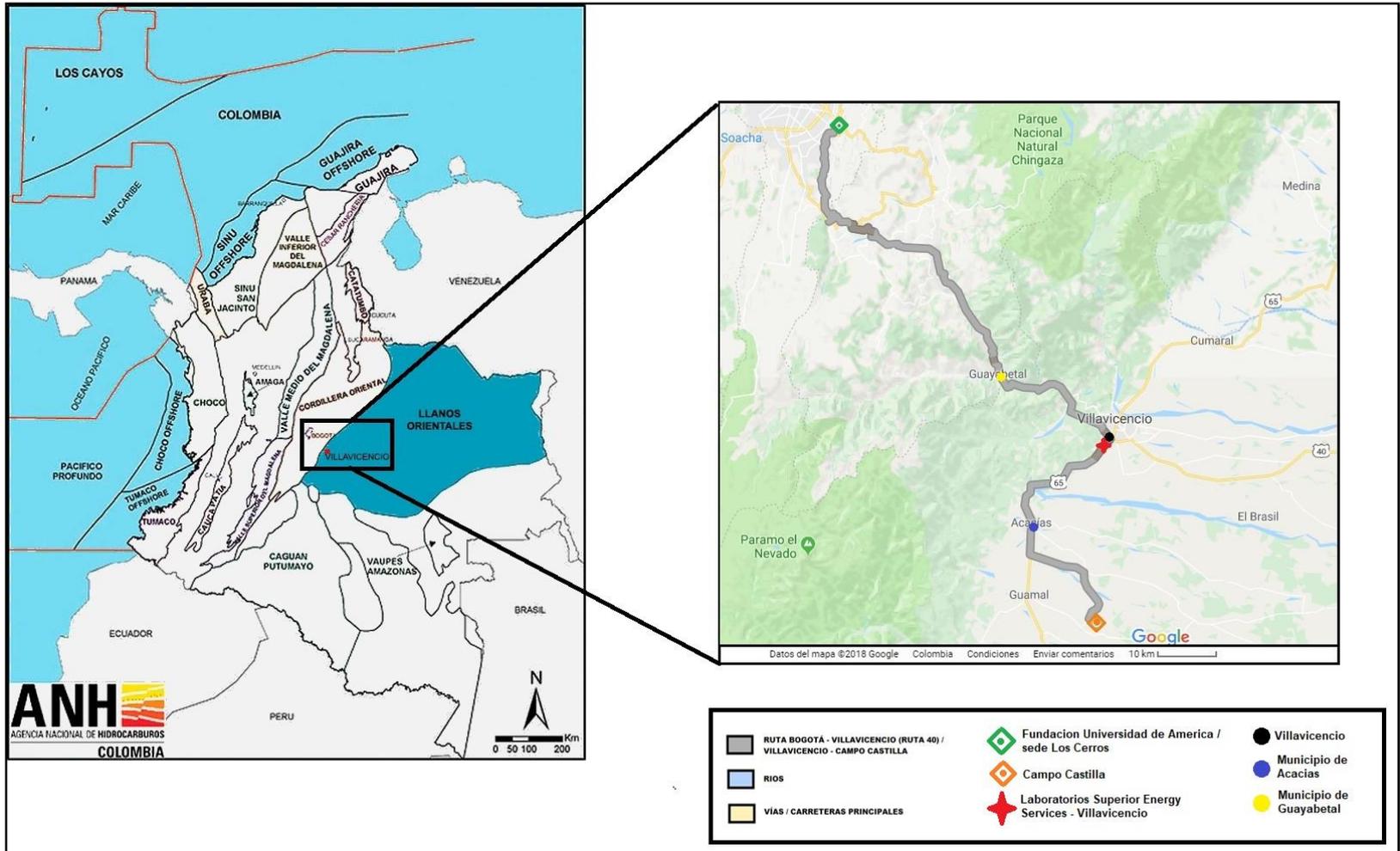
En lo transcurrido del año 2017 se ha hecho un conteo de la cantidad de pozos existentes en el Campo Castilla, totalizando 624 pozos, de los cuales 345 están ubicados en el área de Castilla, 244 en el área de Castilla Norte y 22 corresponden a pozos disposal¹.

1.2 LOCALIZACIÓN

El Campo Castilla se encuentra ubicado en el bloque LLA 37, en la Cuenca de los Llanos Orientales de Colombia, en el departamento del Meta, y hace parte de la jurisdicción de los municipios de Acacias y Castilla La Nueva, en las veredas El Triunfo, La Esmeralda y Montebello, a 30km de la ciudad de Villavicencio. En la **Figura 1**, se visualiza la ruta para llegar al Campo Castilla, se toma la ruta 40 desde el Sur de la ciudad de Bogotá, carretera Bogotá – Villavicencio, comprendida por 117Km. Esta vía pasa por los municipios de Guayabetal y Acacias, a la salida del pueblo de Acacias en el cruce de San Carlos de Guaroa toma la vía Chichimene, cruza el río Otoroy, pasa por San Isidro de Chichimene y toma la vía Castilla La Nueva – Chichimene – Acacias, hasta llegar al Campo Castilla.

¹ MESA DUARTE, Carlos Alfonso y PINZÓN ARTEAGA, Juan Felipe. Evaluación técnico financiera del uso de nano materiales en lechadas de cemento para revestimiento de producción en Campo Castilla. 2016. p. 33.

Figura 1. Ubicación geográfica Campo Castilla y base de operaciones Superior – Villavicencio.



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Mapa de cuencas sedimentarias de Colombia.

1.3 MARCO GEOLÓGICO

Este subíndice del capítulo de las generalidades del Campo Castilla pretende establecer las características geológicas del campo, como lo son la geología estructural, la estratigrafía del campo, y la geología del petróleo asociada a la zona de interés.

1.3.1 Columna estratigráfica. En la **Figura 2** se observa la columna estratigráfica generalizada perteneciente a la Cuenca de los Llanos Orientales, en la cual se identifica la secuencia de la depositación de los sedimentos desde el Cretácico inferior hasta el Neógeno, sobre un basamento de precámbrico.

1.3.2 Estratigrafía. A continuación, se describen las formaciones geológicas pertenecientes a la Cuenca de los Llanos Orientales, organizadas desde la de mayor antigüedad hasta la más reciente.

1.3.2.1 Basamento. “En la Cuenca de los Llanos Orientales existe información de dos tipos de basamentos; el basamento presente en el Campo Castilla es un basamento perteneciente al Precámbrico, este es un basamento de tipo ígneo-metamórfico de composición diorítica sienítica, cuyo fallamiento normal causó relieve positivo que controló los depósitos Pre-Ordovícicos”².

1.3.2.2 Formación Une. “También conocida como K2, esta formación está compuesta principalmente por areniscas cuarzosas con intercalaciones menores de lutitas y de limolitas carbonosas pertenecientes al Albiano superior y Cenomaniano inferior. El espesor de esta formación tiende a aumentar su tamaño hacia el Noroeste, presenta valores de cero, es decir, valores de no deposición hacia el oriente y sureste. En el área del Meta varía entre 50 a 300 ft de espesor, en Arauca el espesor varía entre 300-600 ft; y en la zona del Piedemonte llanero llega a su máximo de 650 ft cerca a la cara de la montaña. Esta formación es caracterizada por la producción de crudo de 9.3 -13.6°API”³.

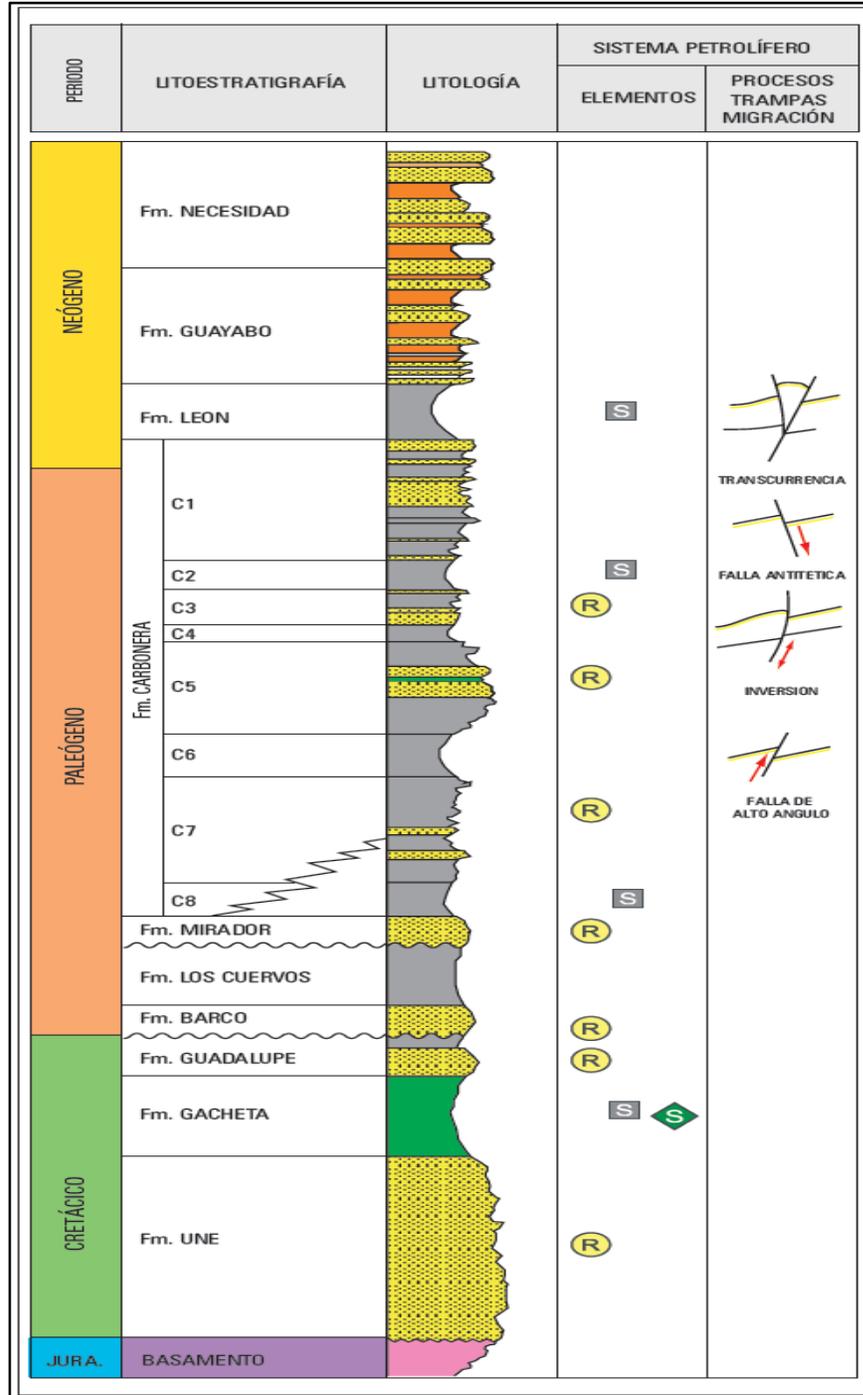
1.3.2.3 Formación Gachetá. También conocida como K1, es perteneciente al Cretáceo Superior, Cenomaniense, y se caracteriza porque “el límite de erosión o de deposición oriental, siempre se localiza más al este que los límites sedimentarios de las formaciones Une y Guadalupe “. Esta formación es característica por poseer una secuencia de lutitas, con desarrollos menores de areniscas con un contenido variable de glauconita; esta formación tiende a mostrar pequeños niveles calcáreos en algunas ocasiones. Debido a efectos erosivos en la zona oriental y sur-oriental de la cuenca esta formación no se encuentra presente o se encuentra acuñaada. De manera opuesta tiende a aumentar su espesor hacia

² AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Informe Cuenca Llanos Orientales integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. 2012. p. 48.

³ *Ibíd.*, p. 48.

la zona noroccidental de la cuenca. El máximo valor del espesor de esta formación fue determinado en 600 ft⁴.

Figura 2. Columna estratigráfica Llanos Orientales.



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Ronda Llanos Orientales. 2010.

⁴ *Ibíd.*, p. 4.

1.3.2.4 Formación Guadalupe. Esta formación está compuesta por una secuencia de areniscas masivas, intercalaciones de lutitas, con pequeñas capas de carbón en algunas ocasiones tuvo su depositación en la edad Cretácico-Campaniano. El máximo espesor de esta formación, observado en la Cuenca de los Llanos Orientales se encuentra en el pozo Coral-1 con 600 ft de espesor, ubicado en el sector de Arauca; y al sur en el área de Vanguardia-1, Cumaral-1 y Medina-1, con más de 600 ft de espesor. Al igual que las demás formaciones pertenecientes al Cretáceo, se denota el mismo comportamiento donde aumenta su espesor en dirección al piedemonte, partiendo desde cero en el Escudo Guayanés hasta un espesor mayor de 600 ft cerca al piedemonte⁵.

1.3.2.5 Formación Barco. Esta formación data del Paleoceno Inferior, la unidad se encuentra compuesta por areniscas arcillosas de grano fino, lutitas y arcillitas intercaladas, estas tienden a ser limosas y carbonáceas. El espesor determinado de la formación varía entre 492 a 912 ft. El ambiente sedimentario en el que esta formación fue depositada fue deltaico. Se encuentra sobre la Formación Guadalupe de manera discordante y se encuentra por debajo de la Formación Los Cuervos⁶.

1.3.2.6 Formación Los Cuervos. La Formación Los Cuervos está compuesta por limolitas carbonáceas, arcillolitas intercaladas, areniscas de grano fino y carbones; la edad de esta formación se encuentra entre el Paleoceno Superior y el Eoceno Inferior. El espesor de la formación varía entre 475-1607 ft; el ambiente de depositación de la Formación Los Cuervos fue de carácter deltaico. Se encuentra por encima de la Formación Barco, de manera concordante, y se encuentra por debajo de la Formación Mirador de manera discordante⁷.

1.3.2.7 Formación Mirador. Esta formación hasta el momento es el reservorio más importante de la cuenca, debido a sus propiedades petrofísicas, cuya depositación se da en el Eoceno Medio-Inferior. Está compuesta por un conjunto de arenas masivas con diferentes granulometrías, grano-descendientes de base a techo, compuestas por cuarzo, feldespato en algunas ocasiones, materia orgánica leñosa, y glauconita hacia la parte superior de la secuencia⁸.

1.3.2.8 Formación Carbonera. La Formación Carbonera corresponde a una espesa secuencia litológica perteneciente al Eoceno Medio-Oligoceno Inferior ampliamente distribuida a través de la Cuenca de los Llanos Orientales, esta corresponde a depósitos transgresivos de corta duración de un mar epicontinental de poca profundidad. En el área de Casanare consiste de una alternancia de arcillas, limolitas y areniscas, donde en algunos casos se presentan niveles de

⁵ *Ibíd.*, p. 48.

⁶ *Ibíd.*, p. 49.

⁷ *Ibíd.*, p. 49.

⁸ *Ibíd.*, p. 49.

carbón, en donde estos tipos de rocas provienen de ambientes sedimentarios que varían de marino transicional a continental. Esta formación fue dividida en 8 (ocho) unidades (C1 – C8), donde los niveles pares son de ambientes transgresivos, finos granulares e importantes sellos regionales; los niveles impares provienen de ambientes regresivos, los cuales tienden a estar compuestos por areniscas, y desde el nivel C7 al C3 se caracterizan por la producción de hidrocarburos en distintos sectores de la cuenca, en especial C7. En la parte superior de la formación se da un contacto conforme y gradual con la Formación León y en la parte inferior se da un contacto con la Formación Mirador. En el sector del Meta, las unidades C1 a C8 se convierten en secuencias con alto contenido de arena; a lo largo de la cuenca de Los Llanos Orientales la variación de sedimentos en las unidades la hacen difícil de correlacionar, es por ello que se establecieron unidades operacionales por parte de Ecopetrol, las cuales son las siguientes: Lutita E4, Unidad T1, Lutitas E3, Conjunto C2, Areniscas de Carbonera, Conjunto C1, Lutita E (Unidad C2) y Areniscas Superiores de Carbonera (Unidad C1). Cabe resaltar que la distribución de la formación a través de la cuenca se desarrolla en forma de acuñamiento, el cual decrece hacia la zona sureste y este de la cuenca, al igual que las formaciones Guayabo y León⁹.

➤ **Unidad C8 (Lutita E4).** “El ambiente de depositación transgresivo se ve marcado en esta unidad debido a que se encuentra en contacto con la Formación Mirador, la cual es de ambiente sedimentación marino. La variación de espesor de esta unidad a lo largo de la cuenca se encuentra entre los 50-400 ft de espesor a lo largo del piedemonte”¹⁰.

➤ **Unidad C7 (Unidad T1).** Esta unidad está compuesta por areniscas depositadas en un ambiente marino somero, deltaico y continental. Su coloración va de crema a parduzco, de granulometría de fina a media, en algunas ocasiones conglomerática, separados por niveles de arcillolita de color gris a verde. Esta unidad llega a presentar espesores entre 250 - 280 ft de espesor en la parte central de la cuenca¹¹.

➤ **Unidad C6 (Lutita E3).** “Esta unidad cuenta con un máximo espesor de 600 ft en el área de Cumaral-1, el espesor de esta unidad se reduce hasta tener un promedio entre 100 - 150 ft en la zona central de la cuenca”¹².

➤ **Unidad C5.** Compuesta por alternancias de niveles de arcillolita, lutitas, arenisca y en menor grado limolitas. La arenisca presente en esta formación cuenta con una granulometría en la cual predomina el grano medio, aunque en algunas ocasiones se hace presente el tamaño grueso; en algunas ocasiones se

⁹ *Ibíd.*, p. 50.

¹⁰ *Ibíd.*, p. 50.

¹¹ *Ibíd.*, p. 51.

¹² *Ibíd.*, p. 51.

presenta como arenas ligeramente calcáreas, con presencia de glauconita. En algunas zonas su espesor se encuentra entre 50 - 300 ft, aunque en otras zonas donde se da una difícil diferenciación de las unidades llegan a medirse 1034 ft de espesor en conjunto con C2, donde corresponde a una intercalación entre arcillolitas y areniscas de poco espesor, en la cual se presenta un nivel más arcilloso hacia el tope de la unidad¹³.

➤ **Unidad C4.** Las características de esta unidad litológica no siempre son evidentes, en especial en el sector suroeste de la cuenca. Su composición está dada por una rápida alternancia de capas de areniscas limolitas y lutitas. Su espesor máximo es superior a 700 ft en el Piedemonte Llanero, entre Vanguardia-1, al suroeste y Tauramena-1, al noreste. El máximo espesor de este sector se encontró en el pozo Guacavía-1 con 1050 ft de espesor. La unidad C4 tiene un espesor promedio entre 150 – 300 ft en la parte central de la cuenca¹⁴.

➤ **Unidad C3.** En las zonas centro norte de la cuenca esta formación se encuentra poco desarrollada, donde aparece con un espesor promedio de 150 ft y se desarrolla hacia el suroeste donde su espesor promedio aumenta a 700 ft en el piedemonte. La composición de esta unidad muestra alternancia de diferentes niveles de arenisca de fina a gruesa y algunos pies de limolitas y arcillolitas; también se presenta niveles carbonosos en la secuencia localizada en la parte central de la cuenca¹⁵.

➤ **Unidad C2.** Esta unidad se encuentra compuesta por lutitas, con intercalaciones de limolitas. En cuanto al espesor de esta unidad se muestra que aumenta hacia la zona suroccidente de la cuenca, a su vez el espesor de arena aumenta hacia las zonas norte y noroeste de la cuenca, una de las causas probables de este fenómeno se debe a que en estas áreas predominó un ambiente deltaico en la zona¹⁶.

➤ **Unidad C1 (Areniscas superiores de Carbonera).** Esta es la última de las secuencias de areniscas de la Formación Carbonera, la cual en su tope se encuentra sellada por las lutitas presentes en la Formación León. La composición de esta unidad varía entre la alternancia de areniscas, limolitas y lutitas. El espesor de esta unidad aumenta de manera regular hacia el occidente, y este alcanza más de 2000 pies de espesor antes del piedemonte llanero en el sector de Guacavía-1 y Cumaral-1¹⁷.

¹³ *Ibíd.*, p. 51.

¹⁴ *Ibíd.*, p. 51.

¹⁵ *Ibíd.*, p. 51.

¹⁶ *Ibíd.*, p. 51.

¹⁷ *Ibíd.*, p. 52.

1.3.2.9 Formación León. Esta formación es de origen marino y representa la última intrusión de los mares terciarios a la cuenca pertenece al Oligoceno Superior – Mioceno Inferior. Está compuesta por capas gruesas de lutitas grisáceas en su mayor parte. El mayor espesor de esta formación fue hallado en los sectores de Chaparral-1 y Arauca-1 donde el espesor varía entre 1980 - 2500 ft. En el suroeste de la cuenca el intervalo crono-estratigráfico muestra gran dificultad para diferenciarlo ya que este se vuelve un intervalo arenoso. Cabe resaltar que esta formación no se encuentra presente en la zona de Castilla y Chichimene¹⁸.

1.3.2.10 Formación Guayabo. Esta formación se encuentra compuesta por arcillolitas de coloración grisácea y areniscas de grano fino a muy gruesas; cuyo espesor es mayor a 13.000 ft y de ambiente de deposición fluvial durante el Mioceno. Esta formación se encuentra por encima de la Formación León de manera concordante y se encuentra por debajo de la Formación Necesidad¹⁹.

1.3.2.11 Formación Necesidad. La edad de esta formación se encuentra entre el Plioceno y el Pleistoceno. Está compuesta por areniscas de grano grueso y arcillolitas de coloración roja y azul; el espesor de esta formación es de aproximadamente 13000 ft y su ambiente de depositación es de tipo fluvial; esta formación se encuentra por encima de la formación Guayabo de manera concordante²⁰.

1.3.3 Geología estructural. La estructura presente en el Campo Castilla ha sido clasificada como un pliegue anticlinal asimétrico alargado con una orientación N60E, cuya longitud es de 10 Km y cuenta con 4 Km de ancho. Dicha estructura se encuentra fallada en flanco oriental, a su vez en la estructura hay presencia de fallas internas normales con interrupciones de 30 - 120 ft y fallas inversas con interrupciones entre 30 - 50 ft, pero no presentan un comportamiento sellante, debido a que el comportamiento del contacto agua-petróleo no muestra cambios significativos a ambos lados de la falla. La trampa que almacena el petróleo en este campo ha sido definida como una trampa de tipo estructural²¹.

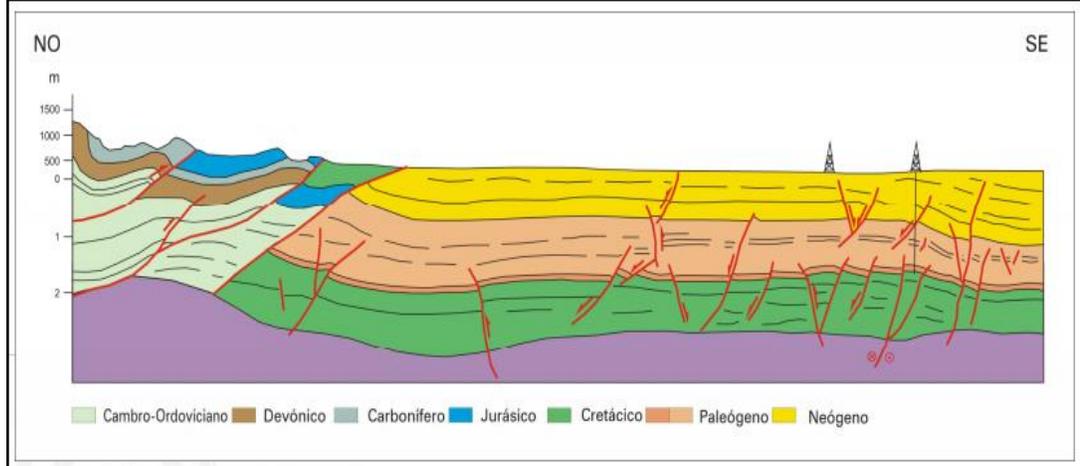
¹⁸ *Ibíd.*, p. 52.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 52.

²⁰ MESA DUARTE, *Op cit.*, p. 39.

²¹ *Ibíd.*, p. 40.

Figura 3. Corte longitudinal de la cuenca de llanos orientales.



Fuente: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Ronda Llanos Orientales 2010.

1.3.4 Geología del petróleo. En el siguiente subíndice se tratan los temas referentes a la geología del petróleo de la cuenca sedimentaria a la cual pertenece el Campo Castilla:

1.3.4.1 Roca Generadora. La principal roca generadora de la cuenca de los Llanos Orientales, fue depositada en ambientes marino-continuales, estas son lutitas que hacen parte de la Formación Gachetá, ubicadas por debajo del flanco oriental de la Cordillera Oriental de los Andes. En este tipo de roca se encuentra presencia de Kerógeno tipo II y III, donde la prueba de Carbono Orgánico Total (TOC) arrojó valores entre 1 - 3%, y el espesor efectivo de este tipo de rocas se encuentra entre el orden de 150 - 300 m²².

1.3.4.2 Roca Reservorio. En la Cuenca de Los Llanos Orientales la roca encargada del almacenamiento de petróleo son las arenas de la Formación Carbonera, en sus arenas C-3, C-5 y C-7; también en la Formación Mirador se da un almacenamiento significativo de petróleo, ambas formaciones han sido calificadas como excelentes reservorios. También en la secuencia cretácica algunos intervalos de arenisca permiten el almacenamiento de petróleo, ya que su rango de porosidad se encuentra entre 10 - 30%²³.

1.3.4.3 Roca Sello. El sello regional de la Cuenca de Los Llanos Orientales es la Formación León, aunque también han sido definidas como sellos las arenas C-2, C-4, C-6 y C-8 de la Formación Carbonera, aunado a estas formaciones sellantes están incluidas las lutitas Cretácicas de las Formaciones Gachetá y Guadalupe, ya que estas cumplen como sellos intraformacionales²⁴.

²² AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Ronda Llanos Orientales 2010.

²³ *Ibíd.*,

²⁴ *Ibíd.*,

1.3.4.4 Trampas. La trampa presente en el Campo Castilla es una trampa de tipo estructural, debido a que la estructura de este reservorio es de un pliegue anticlinal asimétrico. Sin embargo, también se realiza un entrampamiento de los hidrocarburos a través de las fallas normales e inversas que se presentan en la cuenca, la cual se ha caracterizado porque su exploración se ha realizado enfocada hacia las trampas con fallas normales, anticlinales asociados a fallas inversas y estructuras de bajo relieve²⁵.

1.3.4.5 Migración. La migración de hidrocarburos en la cuenca se ha dado en dos momentos, el pulso inicial ocurrió durante el Eoceno Tardío-Oligoceno, y el segundo pulso se inició en el Mioceno y continua en la actualidad²⁶.

1.4 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL CAMPO CASTILA

En esta sección se van a mencionar algunas de las propiedades y características de gran importancia que presenta el campo actualmente como lo es la porosidad, permeabilidad, corte de agua, presión actual, producción promedio, entre otras.

Tabla 1. Propiedades de Campo Castilla.

PROPIEDAD	UNIDAD PRODUCTORA	
	K1	K2
Porosidad (ϕ)	25% – 30%	
Permeabilidad (K)	200 md – 4000 md	
Presión Inicial @5600ft	2830 Psi	
Presión Mínima Registrada	1000 Psi	1750 Psi
Corte de Agua	60% – 80%	92% – 95%
Producción Promedio	100.000 Bbl/d – 120.000 Bbl/d	

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES COLOMBIA. 2017.

1.4.1 Pérdidas en el Campo Castilla. El manejo de esta información es netamente confidencial, y únicamente se puede dar un estimado desde el punto de vista de Superior Energy Services como empresa prestadora de servicios a lo largo de su campaña de cementación de los pozos perforados en el año 2017. Debido a que este yacimiento presenta una caída de presión, a causa de arenas depletadas en las formaciones K1 y K2, se presenta el evento de pérdidas totales, donde se ha reportado un promedio de 100 Bbl/d por pozo.

²⁵ Ibid.,

²⁶ Ibid.,

2. GENERALIDADES DE LA CEMENTACIÓN DE POZOS PETRÓLEROS

Este capítulo abarca las generalidades de las operaciones de cementación de pozos petroleros, en él se habla de la definición de la cementación, su relevancia en el sector, son explicados los distintos tipos de operaciones de cementación, se habla de los aditivos empleados para la elaboración de una lechada en una operación de cementación, se describen los equipos y maquinaria de mayor relevancia en una operación de cementación.

2.1 CEMENTACIÓN

La cementación de pozos petroleros está compuesta por diferentes procesos que van desde el diseño de lechadas a nivel teórico y posterior verificación a nivel experimental en laboratorios enfocados en hacer las pruebas pertinentes a las lechadas de cemento siguiendo los parámetros propuestos por la API (American Petroleum Institute) hasta los procesos de mezcla de productos para ser aplicado en campo, bombeado y posteriormente evaluado en el pozo previo a su fraguado. El cemento una vez fraguado en fondo puede encontrarse entre el espacio anular y la tubería de revestimiento creando un sello hidráulico y sirviendo de apoyo en la estructura del pozo, o puede estar ubicada dentro del mismo pozo en forma de tapón, bien sea de desviación o de abandono, para conocer en que ocasiones se encuentra el cemento en el pozo es necesario definir la cementación de pozos petroleros a partir de dos operaciones principales, las cuales son la cementación primaria y la cementación secundaria o remedial, las cuales son explicadas posteriormente.

2.2 CEMENTO EMPLEADO EN LA INDUSTRIA PETRÓLERA Y SU CLASIFICACIÓN

En esta sección se hablará sobre el cemento usado en la industria petrolera y se hace una breve descripción de los tipos de cemento que hay según las normas API 10A y 10B.

2.2.1 Cemento tipo Portland. El material cementante consiste en un polvo que al contacto con el agua genera reacciones químicas que dan como resultado un material similar a una roca. El cemento usado en la industria del petróleo es el cemento tipo Portland, este cemento está compuesto por cuatro componentes similares: silicato tri-cálcico (70%), Silicato di-cálcico (20%), aluminato tri-cálcico, aluminoferrita tri-cálcica, los materiales iniciales para crear el cemento portland son: cal sílice, aluminio y óxido de hierro, estos son mezclados en las proporciones correctas y puestos en un horno a una temperatura mayor que 1500°C, una vez terminado el proceso de calentamiento de estos materiales, se obtiene el Clinker, a este se le agrega yeso en un porcentaje entre el 3 - 5%, después pasa a ser molido hasta que todo el producto sea polvillo, este polvillo es llamado cemento Portland.

El cemento petrolero o cemento portland se caracteriza porque al entrar en contacto con el agua, se genera una reacción exotérmica, en la cual se da la hidratación de los compuestos, posterior a dicha hidratación se crean cristales que se enlazan entre sí, parte de los materiales en contacto con el agua en un momento temprano se precipitan y se ubican en el fondo, parte del agua usada para la hidratación de este se mantiene atrapada en los espacios dispuestos entre los cristales, el cemento es un material poroso pero no debe permitir la transmisión de fluido a través de él, es decir, debe ser impermeable.

2.2.2 Clasificación de los cementos. El cemento tipo Portland utilizado en la industria petrolera se encuentra regulado por la API, quienes están encargados de estandarizar y regular todos los procesos en la actividad petrolera. Quienes a partir de su panfleto de normas 10A y 10B establecen los distintos tipos de cemento empleados en la industria petrolera y como debe ser realizada su respectiva preparación. En la **Tabla 2** se puede observar la clasificación del cemento petrolero portland y ciertos cementos especiales, algunas de sus características y especificaciones.

2.3 TIPOS DE CEMENTACIÓN

La cementación de pozos petroleros puede ser dividida o clasificada en dos operaciones principales: la cementación primaria y la cementación remedial, donde estas operaciones difieren entre sí por el objetivo que las caracteriza a cada una de ellas.

2.3.1 Cementación primaria. La operación de cementación primaria consiste en el bombeo de la lechada de cemento hacia el espacio anular ubicado entre la cara de la formación y la tubería de revestimiento a través del pozo perforado. La cementación primaria realizada en el Campo Castilla se realiza a partir de dos lechadas de diferente densidad, en las secciones superior e intermedia del pozo, a las cuales se les denomina lechada de relleno y lechada de cola. La cementación primaria cumple distintas funciones u objetivos, los cuales son descritos a continuación.

Cuadro 1. Clasificación del cemento petrolero portland.

		Clasificación según normas API 10A y 10B	Profundidad [Ft]	Temperatura máxima	Especificación
		CEMENTO PETROLERO PORTLAND	A	0 – 6000	170 °F
B	0 – 6000		170 °F	Utilizados en casos donde se requiera resistencia a la formación de sulfatos de media a alta.	
C	0 – 6000		170 °F	Utilizados en casos donde se requiere un rápido desarrollo a la resistencia temprana o requerir una resistencia elevada a los sulfatos.	
D	6000 – 10000		230 °F	Utilizados en condiciones en las que la presión y la temperatura son moderadamente altas o requerir una resistencia elevada a los sulfatos.	
E	10000 – 14000		290 °F	Utilizados en condiciones de alta presión y temperatura o requerir una resistencia elevada a los sulfatos.	
F	10000 – 16000		320 °F	Utilizados en condiciones extremadamente altas presiones y temperaturas o requerir una resistencia elevada a los sulfatos.	
G	0 – 8000			Pueden ser usados en conjunto con aceleradores y retardantes para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas o cuando se requiere una resistencia elevada a los sulfatos. Los composición química del clase G y H es prácticamente igual, la diferencia entre ellos se evidencia en el requerimiento de agua de cada uno.	
H	0 – 12000			Utilizado cuando se requieren condiciones extremas de temperatura y de presión o cuando se requieren medianas resistencias a los sulfatos, condiciones especiales y gran estabilidad de la lechada. Puede ser usado con aceleradores y retardadores para cubrir un amplio rango de profundidades y temperaturas de pozos.	
Especiales	Puzolana			> 200 °F	Combinación de cemento portland y ceniza volcánica de origen natural o artificial. Esta ceniza volcánica no se diluye e incrementa la resistencia a la compresión de la lechada.
	Cal – Puzolana				Combinación de cemento portland y ceniza volcánica mezclada con pequeñas partículas clorhidrato de calcio. Usada debido a su bajo costo, bajo peso, capacidad de mantener su rigidez a elevadas temperaturas y la facilidad para retardar su tiempo de endurecimiento.
	Plásticos o de Resinas		60 °F – 200 °F	Estas lechadas son utilizadas para el taponamiento selectivo a hueco abierto, para la cementación remedial y para cementar pozos muertos. Se logran a través de la mezcla de resinas diluidas en agua, catalizadores y cementos API A, B, G o H. Al someter esta lechada de cemento a condiciones de presión la fase resinosa penetra las zonas permeables creando un sello hidráulico.	
	Diesel			Este tipo de lechadas es el resultado de mezclar un cemento clase A, B, G o H, con diésel o kerosene y surfactante. Tiene un tiempo de bombeabilidad ilimitado y no fragua a menos que se ubique en zonas con presencia de agua. Usados para cementar pozos con alta producción de agua y para controlar pérdidas de circulación.	

2.3.1.1 Objetivos de la cementación primaria. Los objetivos de las operaciones de cementación primaria están descritos en el **Cuadro 2**.

Cuadro 2. Objetivos de la cementación primaria.

Generar aislamiento de las formaciones productoras de fluidos (agua, gas y petróleo), evitando comunicaciones innecesarias entre las formaciones e impidiendo el influjo de fluidos no deseados a través del pozo.
Fija y brinda apoyo a la tubería de revestimiento, ya que este ejerce soporte axial a la tubería de revestimiento.
Protege la tubería de revestimiento contra la corrosión ocasionada por los fluidos presentes en el pozo, los cuales pueden contener H ₂ S y CO ₂ .
Evita problemas de pérdida de circulación de fluidos.
El cemento proporciona soporte al revestimiento y al pozo en formaciones no consolidadas.

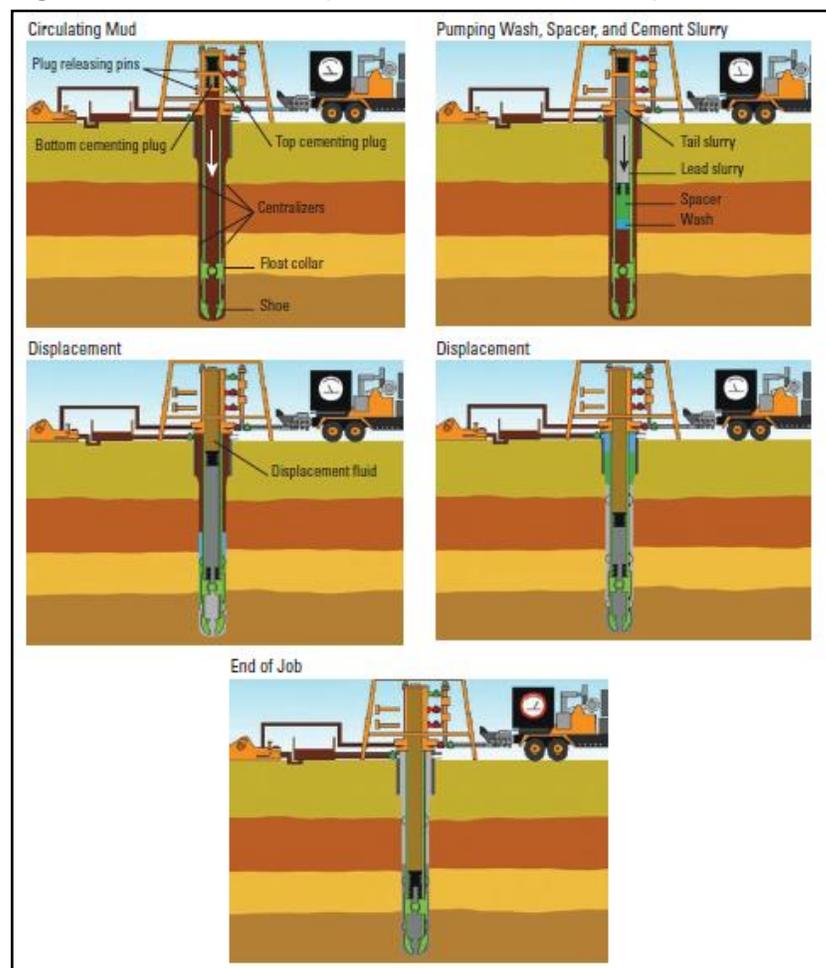
2.3.1.2 Procedimiento de cementación primaria. La cementación primaria se logra a través de un proceso en el que se realiza el emplazamiento del cemento en donde interactúan dos taponeros, para realizar la operación de cementación es necesario seguir el siguiente procedimiento, el cual se puede observar de manera gráfica en la **Figura 4**.

- **Paso 1.** Después de realizar la perforación de la sección a cementar se debe remover la sarta de perforación dejando en su interior únicamente fluido de perforación para realizar el control de presión del pozo.
- **Paso 2.** Se inicia el descenso de la sarta de tubería de revestimiento en el pozo, esta tubería se encuentra protegida en su parte inferior con una zapata guía o zapata flotante, estas zapatas son dispositivos ahusados, con el extremo en forma de bala con el fin de minimizar el contacto de la punta del revestimiento con los bordes del pozo, la diferencia entre estos dos dispositivos radica en que la zapata guía posee una válvula de retención, la cual impide el flujo inverso a través de ella. Otro accesorio que lleva la tubería de revestimiento son los centralizadores, los cuales son ubicados en las secciones críticas de la tubería de revestimiento para evitar que esta se atasque durante su descenso en el pozo, y también sirven para centrar la tubería y de esta manera asegurar la distribución uniforme del cemento a través del pozo.
- **Paso 3.** A medida que la tubería de revestimiento desciende por el pozo puede desplazar el fluido de perforación presente en el pozo, es por ello que esta desciende con fluido de perforación en su interior para evitar un desequilibrio en la presión del fondo del pozo.
- **Paso 4.** Para que una buena operación de cementación sea llevada a cabo, es de vital importancia tener certeza acerca de la limpieza del pozo, es por ello

que se bombean fluidos espaciadores con el propósito de desplazar el fluido de perforación del pozo y a su vez de limpiar la cara del pozo.

- **Paso 5.** En la parte superior del fluido de desplazamiento se bombea un tapón, este es el tapón inferior de la lechada, el cual posee una membrana que al momento en el que el tapón se asienta en el fondo, esta se rompe y da paso al cemento para que circule hacia el espacio anular.
- **Paso 6.** En la parte superior del cemento se ubica otro tapón, que en este caso no posee ningún tipo de membrana, ya que un fluido espaciador será bombeado dentro de la tubería de revestimiento para desplazar el cemento a su totalidad hacia el espacio anular.

Figura 4. Ilustración del proceso de cementación primaria.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 462.

Posterior a esta operación se espera a que el cemento se cure, fragüe y desarrolle resistencia, este es un proceso al cual se le conoce como espera al fraguado de cemento o WOC (Waiting On Cement), este tiempo puede durar entre unas

cuantas horas y varios días, dependiendo en la dificultad del trabajo de cementación.

2.3.2 Cementación secundaria. También llamada cementación remedial o squeeze, son operaciones que tienen lugar en el caso en el que la cementación primaria obtuvo resultados negativos, es decir, en casos donde la integridad del cemento y del pozo se ven comprometidos. Ocurre o se da lugar en el momento en el que los registros de cementación muestran una falla producida durante la cementación primaria. Este proceso consiste en inyectar el cemento dentro de perforaciones realizadas en la tubería de revestimiento y en el cemento posicionado en la cementación primaria del pozo, la cementación secundaria o remedial lleva a cabo distintos objetivos o cumple diferentes funciones las cuales son.

2.3.2.1 Objetivos de la cementación remedial. Los objetivos de las operaciones de cementación secundaria o remedial están descritos en el **Cuadro 3**.

Cuadro 3. Objetivos de la cementación remedial.

Sellar los canales presentes en el cemento inyectado en el pozo durante la cementación primaria.
Sellar o reducir el espesor de los intervalos productores, con la finalidad de disminuir las relaciones gas/petróleo y agua/petróleo en la producción.
Sellar posibles filtraciones en el revestimiento, el cual puede estar afectado por la presencia de fluidos corrosivos o también para sellar perforaciones del revestimiento.
Evitar la comunicación vertical entre formaciones productoras.
Evitar que el fluido de producción migre hacia formaciones depletadas.
Prevenir la migración de fluidos.
Fijar tapones de abandono en pozos muertos.
Fijar tapones en zonas comprometidas del pozo para dar lugar a operaciones de desvío del pozo.

2.3.2.2 Tipos de cementación remedial. Es necesario resaltar que la cementación secundaria se divide en dos clasificaciones principales, las cuales son.

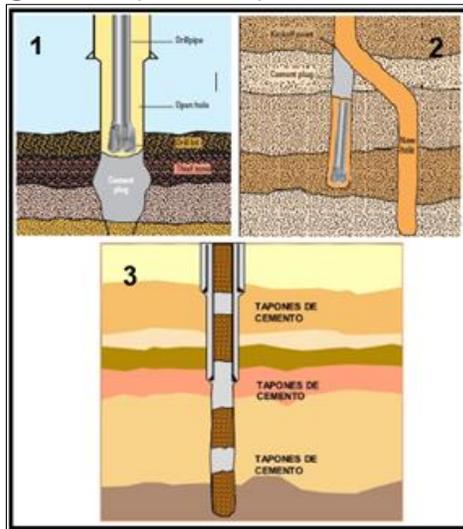
➤ **Cementación a presión o squeeze.** El proceso de cementación forzada a presión o squeeze se les denomina a las operaciones realizadas para introducir el cemento a través de los espacios creados en el cemento posicionado durante la cementación primaria. Esta técnica de cementación se logra a través del control de la presión de bombeo con el propósito de corregir errores originados durante la cementación primaria, aislar perforaciones o reparar daños en el revestimiento y en el liner.

➤ **Tapones de cemento.** El bombeo de volúmenes de lechada dentro del pozo en secciones revestidas y a hueco abierto se realiza con el fin de aislar o impedir el flujo de fluidos dentro de pozo y las formaciones aledañas a este. Comúnmente

se le da uso a la aplicación de tapones de cemento para abandonar zonas depletadas, crear un sello hidráulico capaz de evitar influjos, en casos en los cuales se necesita realizar una operación de desviación y para el abandono de pozos secos. Los tapones pueden ser tapones de desvío, ubicados para realizar perforaciones desviadas; pueden ser de abandono en pozos secos o depletados (en caso que la recuperación primaria, secundaria y terciaria no haya dado resultado de producción) y por último estos se realizan para evitar pérdidas de circulación donde se busca sellar las formaciones ladronas donde se pueden presentar pérdidas significativas de circulación.

En la **Figura 5** se puede observar breve ilustración de algunos de los tipos de tapón de cemento, en la imagen 1 se puede observar un tapón utilizado para aislar en pozo de una formación que genera pérdidas de fluidos, en la imagen 2 el tapón es utilizado para hacer un desvío direccional, por último y no menos importante en la imagen 3 se ilustra un pozo abandonado con diferentes tapones.

Figura 5. Tipos de tapones de cemento.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing.

2.4 ADITIVOS DE CEMENTACIÓN

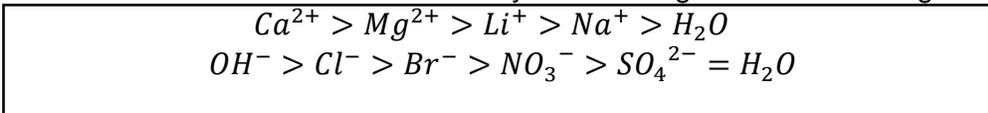
Su definición hace referencia a todo tipo de químicos y materiales que son adicionados a las lechadas de cemento con la única finalidad de alterar las propiedades físicas o químicas del cemento fraguado. Los aditivos de cementación pueden ser comercializados en forma de polvo o en forma líquida, de esta manera puede darse una flexibilidad al momento de realizarse la preparación de las lechadas. Los diferentes materiales adicionados a las lechadas pueden ser clasificados en diferentes líneas básicas como lo son²⁷:

²⁷ SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 50.

- Aceleradores.
- Retardadores.
- Densificantes.
- Extendedores.
- Aditivos de control de pérdida de filtrado.
- Aditivos de control de pérdida de circulación.
- Otros aditivos especiales.

2.4.1 Aceleradores. Este tipo de aditivo es agregado a la lechada en pozos en pozos de baja profundidad y de baja temperatura. Esta clase de aditivos es empleada para obtener cortos tiempos de espesamiento y en menor tiempo obtiene un óptimo desarrollo de resistencia a la compresión, es decir, este tipo de aditivos reduce el tiempo de fraguado de las lechadas de cemento. Los aceleradores actúan rompiendo la película que se forma alrededor de la partícula de cemento. Los más usados son sales, entre ellas sales inorgánicas entre las cuales se destacan los cloruros, pero también se encuentra otro tipo de sales como los carbonatos, silicatos, aluminatos, sulfatos, tiosulfatos y algunas bases alcalinas. Es necesario resaltar que entre los cloruros el efecto de aceleración se vuelve más fuerte a medida que aumenta la valencia y el radio iónico del catión acompañante (**Ecuación 1**), la siguiente clasificación propuesta por Edwards y Angstadt (1966) clasifica los cationes y aniones de acuerdo a su eficiencia como acelerantes²⁸.

Ecuación 1. Clasificación de cationes y aniones según Edwards & Angstadt.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 50.

A continuación, son descritos algunos de los aceleradores más utilizados en la industria petrolera.

2.4.1.1 Cloruro de Calcio. Entre los distintos aceleradores el Cloruro de Calcio es sin duda alguna el acelerador más económico y eficiente de todos, se usa con una concentración de 2% - 4% BWOC, dependiendo del tiempo de bombeabilidad que se desea obtener. No es posible predecir los resultados si la concentración de este aditivo excede el 6% BWOC. El uso del Cloruro de Calcio en una lechada afecta la reología de esta, ya que inicialmente el punto de cedencia de la lechada incrementa mientras la viscosidad plástica se mantiene constante, aunque después de 30 min de la hidratación este valor comienza a incrementar, otro factor es el grado de tixotropía de la lechada, el cual mejora sustancialmente evitando la

²⁸ Ibid., p. 50.

sedimentación de partículas en la suspensión. La lechada desarrolla mejores resistencias a la compresión en presencia de estos aditivos²⁹.

2.4.1.2 Cloruro de Sodio. Las concentraciones comunes para el uso de Cloruro de Sodio se encuentran entre el 2% - 2.5% BWOC, también se tiende a usar en concentraciones hasta del 10% por peso de agua de mezcla, en el caso que su concentración se encuentre entre el 10% - 18% se obtiene un tiempo de fraguado similar al obtenido con agua dulce. A concentraciones mayores que 18% tiende a cumplir las veces de retardador de fragüe. Mejora la adherencia del cemento a formaciones lutíticas, minimiza el daño en zonas sensibles al agua dulce, produce una ligera expansión de la lechada y actúa como dispersante en las lechadas, es decir, reduce su viscosidad. Sin embargo, su uso también genera efectos adversos, como la creación de espuma durante su mezclado y tiene problemas de compatibilidad con la mayoría de los reductores de filtrado³⁰.

2.4.1.3 Silicato de Sodio. Este aditivo es comúnmente utilizado en casos en que se encuentre presente en la lechada el retardante carboximetil hidroxietil celulosa³¹.

2.4.1.4 Agua salada. Este aditivo es ampliamente utilizado como acelerador de tiempo de fraguado en locaciones costa afuera (off shore), ya que el agua de mar contiene una concentración de 25 gr de NaCl (cloruro de sodio) por cada litro de agua, brindando la concentración propicia para dicho fin³².

2.4.1.5 Sulfato de calcio. Este es un material que aporta a la expansión del cemento fraguado ya que posee características cementantes, y es usado como acelerador dosificándolo con respecto al tiempo que se desea y a la temperatura de trabajo. Normalmente maneja concentraciones entre el 50% - 100% BWOC, aunque altas concentraciones de este material pueden generar un efecto adverso y funcionar como retardante de tiempo de fraguado³³.

2.4.2 Retardadores. Estos aditivos controlan y prolongan el tiempo de fraguado inicial del cemento y a su vez permiten trabajar con el cemento en condiciones de presión y temperatura, los retardadores son aditivos ampliamente usados en la cementación de pozos profundos, ya que en pozos profundos es necesario prolongar el tiempo de bombeabilidad para evitar los riesgos de un fraguado prematuro, los tipos de retardadores de fraguado más usados son el lignosulfonato de sodio y de calcio, ácidos hidroxilcarboxílicos y organofosfonatos³⁴.

²⁹ Ibid., p. 50.

³⁰ SUPERIOR ENERGY SERVICES. p. 3

³¹ Ibid., p. 3.

³² Ibid., p. 3.

³³ Ibid., p. 3.

³⁴ SCHLUMBERGER, Op cit., p. 54.

2.4.2.1 Lignosulfonato (0.1% - 1.5% BWOC). Compuestos por ácidos lignosulfónicos de sodio y calcio, los cuales son polímeros derivados de la pulpa de madera, los cuales son compuestos no refinados y en ellos existe presencia de compuestos sacaroides. Estos son compuestos altamente efectivos con todo tipo de cementos, su rango de uso va hasta 250°F (122°C) de temperatura de circulación en el fondo del pozo y hasta 600°F (315°C) cuando es mezclado con borato de sodio. Han sido usados ampliamente en la industria petrolífera con toda clase de cementos API en profundidades de 12000 - 14000 ft de profundidad y en rangos de temperatura de 260 - 290°F³⁵.

2.4.2.2 Acido hidroxilcarboxílico (0.1% - 0.3% BWOC). Este es un tipo de retardador que trabaja con un amplio espectro de temperatura la cual puede variar entre 200°F - 300°F (93°C -143°C). Este es un aditivo que además de ser utilizado como retardador cumple funciones como dispersante de cemento. Los ácidos hidroxilcarboxílicos están compuestos por grupos hidroxilicos y carboxílicos, el ácido cítrico actúa como un excelente retardante de este grupo³⁶.

2.4.2.3 Organofosfonatos. Los organofosfonatos son aditivos aplicados a altas temperaturas de circulación por encima de 400°F (204°C), dos de sus principales características son que estos compuestos tienden a disminuir la viscosidad de las lechadas densificadas y muestran insensibilidad ante la variación de la composición de la lechada³⁷.

2.4.3 Reductores de densidad. También llamados extendedores son utilizados comúnmente para disminuir la densidad de la lechada con el fin de reducir la presión de la columna hidrostática en el pozo durante la cementación y así evitar la pérdida de circulación al crear posibles fracturas en zonas débiles o no consolidadas y ayuda disminuyendo el número de etapas requeridas para la cementación del pozo, otro de sus propósitos es aumentar el rendimiento de la lechada ya que el uso de extendedores disminuye notablemente la cantidad de cemento requerida para producir un volumen determinado³⁸.

2.4.3.1 Bentonita. Este es el aditivo más usado para disminuir la densidad del cemento, el compuesto principal de la bentonita es la esmectita (85%). La bentonita posee la cualidad de expandir varias veces su volumen original al agregarle agua, aumentando la viscosidad del fluido, la fuerza de gel y la habilidad de suspensión de sólidos. La bentonita es adicionada hasta en 20% BWOC, a pesar de sus ventajas, la presencia de este aditivo puede ocasionar un aumento en la permeabilidad del cemento a medida que la concentración de bentonita

³⁵ Ibid., p. 54.

³⁶ Ibid., p. 55.

³⁷ Ibid., p. 56.

³⁸ Ibid., p. 58.

aumenta, la disminución de la resistencia del cemento frente a aguas con presencia de sulfatos y otros fluidos corrosivos³⁹.

2.4.3.2 Puzolanas. Son materiales silíceos y alumínicos que por sí solos no poseen ningún tipo de propiedad cementante, pero en presencia de humedad tiende a reaccionar con el hidróxido de calcio presente durante la hidratación del cemento para crear compuestos con propiedades cementantes. Existen dos tipos de puzolanas, las primeras son de origen natural (cenizas volcánicas y tierras diatomeas) y las artificiales (cenizas volantes)⁴⁰.

2.4.3.3 Tierras diatomeas. Este tipo de material permite la retención de la mayor cantidad posible de agua debido a su área superficial, disminuyendo de esta manera la densidad de la lechada, este material se comporta de una manera similar a la bentonita, aunque a pesar de ello no aumentan la viscosidad de la lechada de una manera pronunciada, pero la fuerza desarrollada por los cementos que contienen tierras diatomeas es mucho mayor que de aquellos que contienen bentonita. Este material se adiciona en un porcentaje que varía entre 10% - 40% BWOC⁴¹.

2.4.3.4 Metasilicato de sodio anhidro. Su porcentaje de adición varía entre el 1% - 3% BWOC, y el porcentaje de agua utilizado varía dependiendo de la dosis adicionada de este material a la lechada de cemento. Existen diferentes ventajas del uso de este aditivo como la alta compatibilidad del mismo con respecto a diferentes productos químicos, su alta eficiencia y economía⁴².

2.4.4 Densificantes. También denominados agentes pesantes, utilizados para controlar la presión hidrostática en presencia de formaciones con elevadas presiones porales, formaciones inestables, plásticas y deformables; en presencia de estos casos es necesario que los fluidos de perforación posean una densidad igual a 18ppg y en el caso de las lechadas de cemento se requiere una densidad igual o mayor. Estos materiales deben ser inertes con respecto al cemento y a su hidratación, e inclusive deben ser compatibles con otros aditivos; y por último esos deben poseer un bajo requerimiento de agua, son aditivos empleados para el aumento de la densidad de las lechadas⁴³.

2.4.4.1 Ilmenita (FeTiO₃). Este es un material granular de coloración negra cuya gravedad específica es de 4.45. Una de sus principales características es la baja incidencia en la hidratación del cemento, para el uso de este material es necesario que la viscosidad sea ajustada adecuadamente ya que su granulometría muestra

³⁹ Ibid., p. 59.

⁴⁰ Ibid., p. 61.

⁴¹ Ibid., p. 62.

⁴² Ibid., p. 60.

⁴³ Ibid., p. 69.

tamaños gruesos, normalmente es usada para llegar a densidades mayores o iguales a 20ppg⁴⁴.

2.4.4.2 Hematita (Fe₂O₃). Con una gravedad específica de 4.95, este material es usado comúnmente en la preparación de lechadas cuya densidad es igual o superior a 19ppg, aunque también es utilizado en la preparación de fluidos de perforación iguales o mayores a 22ppg. La hematita no tiene una única función ya que esta además de cumplir el propósito de un material dispersante, su adición en altas concentraciones permite evitar el exceso de viscosidad de la lechada⁴⁵.

2.4.4.3 Barita (BaSO₄). Tiene apariencia de polvo blanco cuya gravedad específica es de 4.2 y es ampliamente usado en la industria petrolera a pesar que la eficiencia como material pesante no es mejor que la de los otros materiales pesantes. Es necesaria que sus partículas sean hidratadas, requiriendo agua adicional, este factor reduce su efectividad como densificante, la necesidad de adicionar agua en exceso para hidratar el material disminuye el desarrollo de resistencia a la compresión, sin embargo, la barita es usada para densificar lechadas por encima de 19ppg⁴⁶.

2.4.4.4 Tetraóxido de manganeso (Mn₃O₄). Este es un polvo café rojizo, cuenta con una gravedad específica de 4.84, es posible encontrarlo en la industria en forma sólida o líquida, su forma líquida normalmente es aplicada en operaciones costa afuera. Cuenta con un tamaño promedio y por ello cuenta con una mayor área superficial que los demás agentes densificantes. Es utilizado en cambios de último minuto en operaciones de cementación primaria y en trabajos de emergencia de respuesta rápida. Gracias a su tamaño reducido, es factible su uso para reducir el tiempo de bombeabilidad de la lechada, y a su vez alcanzar densidades de 22 ppg usando el tetraóxido de manganeso como material densificante⁴⁷.

2.4.5 Dispersantes (Reductores de fricción). Debido a que las lechadas de cemento son suspensiones con altas concentraciones de partículas sólidas en agua, se evidencia la afectación de la reología de la lechada a diferentes niveles, ya que el fluido o fase líquida aporta las principales características reológicas de la lechada, a su vez la reología se ve afectada por la fracción de volumen sólido presente en forma de partículas disueltas en la fase líquida y las interacciones presentes entre las partículas. En este caso la fase acuosa de la lechada contiene especies iónicas y aditivos orgánicos, es decir, en caso en los cuales se adicionan polímeros solubles de alto peso molecular, afectan directamente las propiedades

⁴⁴ Ibid., p. 70.

⁴⁵ Ibid., p. 70.

⁴⁶ Ibid., p. 70.

⁴⁷ Ibid., p. 70.

reológicas de la fase acuosa. En lechadas altamente extendidas el valor de la fracción de volumen sólido presente se encuentra en 0,2 mientras que en lechadas de agua reducida es de 0,7. Este tipo de aditivo es utilizado para reducir la viscosidad al mejorar las propiedades de flujo de las lechadas, ya que permiten llegar a regímenes turbulentos a bajos caudales de bombeo y reducen la fricción entre las partículas en suspensión. Es necesario mantener un régimen de flujo turbulento durante el bombeo de los colchones de limpieza para realizar la mejor limpieza del pozo, el número de Reynolds el cual describe el régimen de flujo de estos fluidos puede estar entre 3.000 y 4.000 e inclusive por encima de este rango para garantizar la correcta limpieza del pozo. Normalmente son adicionados sales de ácidos grasos las cuales son agregadas entre el 0,2% – 2,5% BWOC, aunque es posible que también puedan ser agregados polímeros entre 0,3 – 0,5 lb/Sx, sal en dosificaciones de 1 – 16 lb/Sx y lignosulfonato de calcio en dosis de 0,5 – 1,5 lb/Sx⁴⁸.

2.4.6 Aditivos para el control de pérdida de filtrado. En los casos en los que una lechada es bombeada frente a una formación permeable de baja presión, se da el proceso de filtración, en el cual la fase acuosa de la lechada migra hacia la formación dejando atrás la fase sólida de la lechada, esto corresponde al proceso de pérdida de fluido. En casos donde la pérdida de fluidos no es controlada se presentan circunstancias adversas que comprometen la operación de cementación, debido a que el volumen de fase líquida de la mezcla se ve afectada, la densidad de la mezcla incrementa, desviándose del diseño original de la lechada. En casos donde la migración de fase líquida es lo suficientemente elevada la lechada no podrá ser bombeada. Según la American Petroleum Institute (API) las pérdidas de circulación de una lechada generalmente exceden los 1.500 mL cada 30 min, es necesario controlar las pérdidas hasta llevarlas a menos de 50 mL cada 30 min para mantener las condiciones de la lechada, el control de las pérdidas se logra a partir de la adición de material de control de pérdidas incluidos en el diseño de la lechada. Aun no se tiene total claridad de cómo funcionan estos agentes de control de pérdida de fluido sin embargo se conocen algunos de los procesos que ocurren, una vez este material entra en contacto con la formación se crea la capa en la cara del pozo a la que se llama retorta o “filtercake” de cemento, en ella hacen efecto los agentes de control de pérdida de fluido disminuyendo la permeabilidad de la retorta y aumentando la viscosidad de esta capa. Existen dos tipos de materiales de control de pérdida los cuales pueden ser polímeros solubles en el agua y material particulado fino⁴⁹.

2.4.6.1 Material particulado. El primer agente particulado de control de pérdida de fluido fue la bentonita ya que su tamaño permitía controlar la permeabilidad de la retorta, sin embargo, hoy en día se utilizan diferentes agentes particulados para el control de pérdida de fluido son el polvo de carbonato, carbón negro,

⁴⁸ Ibid., p. 71.

⁴⁹ Ibid., p. 80.

microsilicatos, asfáltenos y resinas termoplásticas; el uso de cemento de látex para el control de pérdida de fluido tuvo resultados positivos, el látex es una emulsión de polímeros, en la que se encuentran partículas finas en suspensión, donde su tamaño puede variar entre 30 - 200 nanómetros, la mayoría de suspensiones de látex contiene un 45% de sólidos en suspensión. Existen distintos tipos de látex usados en cementación de pozos petroleros entre los cuales se encuentran el cloruro de vinilidieno, el acetato de polivinilo y el estireno-butadieno⁵⁰.

2.4.6.2 Polímeros solubles en agua. Estos aditivos aumentan la viscosidad de la fase acuosa y disminuyen al mismo tiempo la permeabilidad de la retorta formada en la cara del pozo, el uso de estos aditivos requiere la adición de dispersantes a la lechada para optimizar el control de la pérdida.

Aunque generalmente los aditivos utilizados para realizar el control de filtrado son derivados de la celulosa como lo son la carboximetil celulosa del 0.3 % - 1% BWOC y los polímeros orgánicos que se dosifican entre el 0.5% - 1.5% BWOC. La American Petroleum Institute propone los siguientes parámetros para evaluar la pérdida de filtrado según las operaciones a realizar, en cementación de tubería de revestimiento no debe ser mayor a 200cm³, en cementación de tubería corta o liner no debe sobrepasar los 50cm³ y en cementación forzada de 30 – 50 cm³. Estos valores de filtrados son medidos en un lapso de 30 min donde están sometidos a una presión diferencial de 1.000 psi⁵¹.

2.4.7 Agentes de control de pérdida de circulación. La pérdida de circulación o pérdida de retorno durante la operación de cementación primaria acarrea graves consecuencias que por lo general llevan a la aplicación de cementación remedial, este fenómeno se describe como la pérdida total o parcial de los fluidos de perforación y lechadas de cementación que tiene lugar en presencia de formaciones cavernosas, en formaciones altamente fracturadas y en zonas con un bajo punto de fractura, es decir, este tipo de formaciones no soportan la presión hidrostática del fluido en el pozo y tiende a fracturarse, creando cavidades por donde migra el fluido. Generalmente este tipo de zonas son identificadas durante la operación de perforación, de esta manera es posible realizar un plan de acción frente a la solución del problema durante la cementación. Las pérdidas han sido clasificadas de menores a completas dependiendo de su severidad⁵².

⁵⁰ Ibid., p. 80.

⁵¹ Ibid., p. 83.

⁵² Ibid., p. 88.

Tabla 2. Clasificación de la severidad de las pérdidas de circulación.

Tipo de pérdida	Severidad
Menor	<10 barriles / hora
Parcial o media	10 a 100 barriles / hora
Severa o masiva	100 a 500 barriles / hora
Total	Imposible mantener el pozo lleno

Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 203.

El control de pérdida de circulación se puede lograr a partir del uso o aplicación de dos materiales.

2.4.7.1 Cementos tixotrópicos. Son lechadas que durante su periodo de mezcla y desplazamiento se comportan como fluidas y finas, pero pueden cambiar rápidamente cuando el bombeo cesa y forma una estructura auto soportante cuyo comportamiento y estructura es el similar al de un gel. Este comportamiento de gel se rompe al momento que se realiza la agitación del sistema, y la fluidez de la lechada se recupera, al momento en el que se realice un cese del esfuerzo al que se somete la lechada, el comportamiento de gel reaparece; esta es una condición reversible y característica de las lechadas tixotrópicas. Las lechadas tixotrópicas tienden a comportarse reologicamente bajo las características propuestas por el modelo de Bingham al momento en el cual se le imparte un esfuerzo a la lechada⁵³.

2.4.7.2 Material fibroso. El uso de monofilamentos para el control de pérdida de circulación, son adicionadas a las lechadas como agentes para el control de pérdida de circulación, frente a las formaciones problemas estas microfibras crean una capa que evita la migración de la lechada y a su vez promueve la formación de la retorta en la cara del pozo, el uso de estos monofilamentos varia de 2 - 3 lb/bbl. Entre estas microfibras se destaca el homopolímero de polipropileno, el cual es un monofilamento sintético el cual se adiciona en una proporción de 2 lb/Sx de cemento⁵⁴.

2.4.7.3 Agentes puenteantes. Estos son agentes que funcionan como bloqueo frente a las zonas fracturadas y débiles, estos materiales incrementan la resistencia de la zona para presionar la ruptura, una de las principales características de los agentes puenteantes es que son químicamente inertes frente a la hidratación de la lechada de cemento. Existen materiales granulares como la gilsonita y el carbón, que son materiales extendedores, funcionan también como agentes puenteantes; otros agentes puenteantes son la cascara de nuez, los granos de formica, cascara de pacana, bentonita gruesa e inclusive elotes. Otro agente puenteante de gran importancia es el celofán en copos, frente a las zonas de perdida de circulación los copos forman esferas en la cara de la fractura, e inclusive logran bloquear las zonas de alta permeabilidad. El tamaño de estos

⁵³ Ibid., p. 89.

⁵⁴ Ibid., p. 207.

copos varía ente 0.2 - 0.6 mm, en condiciones planas puede medir 1cm en cada uno de sus lados. La concentración de adición de celofán varía entre 0.125 - 0.5 lb/Sx. Otro método de aplicación de los agentes puenteantes para el control de pérdida de circulación, es la mezcla de monofilamentos sintéticos con otros materiales granulares de distintos tamaños, que permitan sellar las zonas problema al bloquear las fracturas y fallas, debido a sus distintos tamaños de selección, lo cual permite obtener un sello de mayor eficiencia⁵⁵.

2.4.8 Aditivos especiales. Son materiales adicionados a la lechada en caso de requerir la solución de un problema focalizado, normalmente dichos materiales no pueden ser clasificados

2.4.8.1 Agentes antiespumantes. Durante el mezclado del cemento puede generarse espuma, la cual puede acarrear efectos perjudiciales para la lechada. La lechada se puede gelificar, perdida de la presión hidrostática durante el bombeo debido a la cavitación presente en el sistema de mezclado y como último un aumento en la densidad de la lechada. Los agentes antiespumantes pueden ser mezclados al agua de mezcla o pueden ser mezclados en seco con el cemento para evitar este tipo de problemas. Los agentes antiespumantes pueden atacar las condiciones que permiten que se forme espuma, como lo son la tensión superficial y la dispersibilidad de los sólidos. Para que los agentes espumantes cumplan con su objetivo deben ser insolubles en sistemas espumantes y deben poseer una tensión superficial menor que el sistema espumante. En la cementación de pozos petroleros existen dos agentes antiespumantes que son usados comúnmente, como lo son los éteres de poliglicol y las siliconas, y su uso en concentraciones de 0.1% por peso de agua (BWOW) previene la formación de espumas. El poli etilenglicol es de bajo costo y altamente efectivo en la mayoría de los casos, pero debe ser adicionado al sistema antes de mezclarlo. Las siliconas son altamente efectivas sin importar el momento de su adicción a la mezcla⁵⁶.

2.4.8.2 Agentes de fortalecimiento. La adición de materiales fibrosos al cemento en concentraciones que varían entre el 0.15% - 0.5% BWOC, aumentan la resistencia del cemento a las operaciones de cementación, fracturamiento y al movimiento de las formaciones, ya que el esfuerzo focalizado es transmitido a todo el cemento por medio de la matriz fibrosa, normalmente se usan fibras de nylon, fibras metálicas, rubber particulado e inclusive el cemento – látex se muestran como materiales que aportan al fortalecimiento de las lechadas⁵⁷.

2.4.8.3 Agentes de rastreo radioactivo. Son usados para determinar el llenado de la columna de cemento detrás del revestimiento, normalmente son utilizados en

⁵⁵ Ibid., p. 88.

⁵⁶ Ibid., p. 89.

⁵⁷ Ibid., p. 89.

la cementación remedial de pozos, con el objetivo de determinar el posicionamiento final de la lechada inyectada. Inicialmente se corre un registro antes de la operación de cementación para determinar la radiactividad natural de la formación y uno posterior a la cementación para determinar el posicionamiento del cemento⁵⁸.

2.4.8.4 Descontaminantes de lodo. Para evitar problemas operacionales en la cementación debido a la presencia de aditivos del fluido de perforación presentes en el pozo (tanino, ligninas, celulosa, lignosulfonato) se puede retardar la lechada de cemento en la ocasión en el que la lechada y el fluido de perforación se mezclen, es por ello que es necesario el uso de agentes que minimicen o eviten esta mezcla como paraformaldehído y la mezcla de paraformaldehído y cromato de sodio⁵⁹.

2.5 PROPIEDADES DE UNA LECHADA DE CEMENTO

No todas las lechadas de cemento de pozos petroleros poseen las mismas propiedades, ya que cada lechada es diseñada previamente de acuerdo a las necesidades del pozo a cementar, esto se debe a que existe gran variación entre sus propiedades y características. Las cuales son determinadas o se logran a partir de la variación de la concentración de los componentes de la lechada (agua, cemento y aditivos), estas propiedades y características son analizadas a nivel de laboratorio antes de realizar el proceso de cementación, todo con la finalidad de que esta cumpla con las necesidades del pozo y que garantice la calidad del cemento en fondo. A nivel de laboratorio en la industria petrolera se recomienda seguir los procedimientos establecidos en las normas API 10A "Specifications for cements and materials for well cementing" la cual establece las especificaciones de los cementos y los materiales para la cementación, de igual forma se recomienda seguir los procedimientos que se encuentran en la norma API 10B "Recommended practices for testing well cements" que hace referencia a las prácticas recomendadas para probar los cementos de pozos. Las normas enunciadas anteriormente proponen la medición estandarizada de algunas de las propiedades que poseen las lechadas de cementación, las cuales se explicaran a continuación.

2.5.1 Densidad. "Esta propiedad indica la cantidad de masa por unidad de volumen, en el caso de la lechada de cemento será expresada en libras por galón (ppg). A pesar del hecho que no todas las lechadas son iguales, existen valores promedios, los cuales serán presentados como valores de una lechada típica, en ella la densidad se puede encontrar entre 11.5ppg - 19ppg, en otros casos existen lechadas especiales, las cuales requieren una densidad diferente, como es el caso de los cementos espumados y la cementación con distribución de tamaño de

⁵⁸ Ibid., p. 90.

⁵⁹ Ibid., p. 90.

partícula donde la densidad de estos varía entre 7ppg – 23ppg”. En las lechadas de cemento la densidad es una propiedad que varía principalmente en la concentración de cemento y agua utilizados, aunque también puede existir presencia de agentes densificantes, encargados de reducir la cantidad de cemento utilizado y a su vez incrementando la densidad de la lechada, existen diversos tipos de aditivos que afectan la densidad de la lechada, la bentonita, las tierras diatomeas y la gilsonita funcionan como reductores de densidad, y la barita, limelita y hematita funcionan para aumentar la densidad.

Esta propiedad afecta directamente el peso de la lechada en fondo, ya que de ella depende la presión hidrostática de la columna de fluido, la presión hidrostática no debe superar la presión de fractura de la formación, para el cálculo de la presión hidrostática se debe tener en cuenta la densidad de la lechada y el tope del cemento⁶⁰.

2.5.2 Rendimiento. Esta propiedad define la cantidad de volumen que ocupa la lechada de cementación (cemento, agua y aditivos) posterior a la realización de la mezcla de los componentes, se expresa en pies cúbicos por saco (pie^3/saco o ft^3/sx), cabe resaltar que esta propiedad varía dependiendo de la clase de cemento utilizado. El rendimiento se calcula mediante la **Ecuación 2**. Fuente: Curso de cementación / Superior Energy Services / 2017

Ecuación 2. Rendimiento de lechada.

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{volumen por saco} \left[\frac{\text{galon}}{\text{saco}} \right]}{7.48 \left[\frac{\text{gal}}{\text{pie}^3} \right]} = \frac{\text{pie}^3}{\text{saco}}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Cementación 2017.

En donde el volumen por saco representa los galones de lechada que se generan usando un saco de cemento, y la constante 7.48 es un factor de conversión usado para pasar galones a pies cúbicos.

2.5.3 Tiempo de bombeabilidad. Este hace referencia al tiempo de espesamiento de la lechada de cementación cuyas unidades de medición son los Bearden (Bc), esta es la propiedad que define el tiempo en el que la lechada se encuentra hidratada en el fondo de pozo, bajo condiciones de presión y temperatura; puede ser bombeada a través del espacio anular sin que esta inicie su fraguado. Esta propiedad se encuentra ligada a la composición de la lechada, debido a que existen aditivos que pueden retardar o acelerar el proceso de fraguado. Fuente: Curso de cementación / Superior Energy Services / 2017

⁶⁰ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op cit.,

2.5.4 Requerimiento de agua. Hace referencia a la cantidad de agua para la mezcla con un saco de cemento, teniendo en cuenta las diferentes concentraciones de aditivos agregados a la mezcla. Las unidades de medición están dadas en galones por saco de cemento (gal/Sx), donde se debe tomar en cuenta que un saco de cemento pesa aproximadamente 94 lb y la gravedad específica de los aditivos que han de ser adicionados a la mezcla, ya que es necesario realizar un balance de masa y volumen a partir de la **Ecuación 3**. Fuente: Curso de cementación / Superior Energy Services / 2017

Ecuación 3. Densidad.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Cementación 2017.

Dónde:

- ρ : Es densidad.
- m : Es masa.
- v : Es volumen.

Como se puede observar en la **Ecuación 4**, la densidad de una lechada de cemento es igual a la sumatoria de masa de cada uno de los elementos que componen la lechada sobre la sumatoria del volumen de cada uno de los elementos de la misma.

Ecuación 4. Cálculo de la densidad de una lechada.

$$\rho_{lechada} = \frac{m_{cem} (lb/Sx) + \sum m_{adts} (lb/Sx) + (\rho_{agua(ppg)} * v_{agua}(gal/Sx))}{v_{cem} (gal/Sx) + \sum v_{adts} (gal/Sx) + v_{agua}(gal/Sx)}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Cementación 2017.

Dónde:

- $\rho_{lechada}$: Es la densidad de la lechada, en unidades de ppg.
- m_{cem} : Es la masa de cemento en unidades de lb/Sx que para el cemento usado es de 94 lb/Sx.
- $\sum m_{adts}$: Es la sumatoria del peso de los diferentes aditivos usados en la lechada, en unidades de lb/Sx.
- ρ_{agua} : Es la densidad de agua calculada a partir de la gravedad específica en el laboratorio y la densidad del agua a 60°F, dada en ppg.

- v_{agua} : Es el requerimiento de agua necesario a partir de la densidad requerida para la lechada, en unidades de gal/Sx.
- v_{cem} : Es el volumen de cemento calculado a partir del peso de un saco de cemento sobre la densidad del cemento, en unidades de gal/Sx.
- Σv_{adts} : Es la sumatoria del volumen de los diferentes aditivos usados en la lechada, en unidades de gal/Sx.

Despejando de v_{agua} de **Ecuación 4**, se obtiene la ecuación definitiva para realizar el cálculo de requerimiento de agua en una lechada de cemento (**Ecuación 5**).

Ecuación 5. Volumen de agua requerido.

$$v_{agua} = \frac{\Sigma m_{adts} - (\rho_{lechada} * \Sigma v_{adts})}{\rho_{lechada} - \rho_{agua}}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Cementación 2017.

Dónde:

- v_{agua} : Es el requerimiento de agua necesario a partir de la densidad requerida para la lechada, en unidades de gal/Sx.
- Σm_{adts} : Es la sumatoria del peso de los diferentes aditivos usados en la lechada, en unidades de lb/Sx.
- $\rho_{lechada}$: Es la densidad de la lechada, en unidades de ppg.
- Σv_{adts} : Es la sumatoria del volumen de los diferentes aditivos usados en la lechada, en unidades de gal/Sx.
- ρ_{agua} : Es la densidad de agua calculada a partir de la gravedad específica en el laboratorio y la densidad del agua a 60°F, dada en ppg.

La **Ecuación 6** es la ecuación definitiva para calcular el requerimiento de agua.

2.5.5 Fluido de mezcla. Esta propiedad se ve afectada directamente por la cantidad de fluido total con la que se va a mezclar un saco de cemento, donde se tienen en cuenta el agua de mezcla, la cantidad de aditivos líquidos y el volumen de aditivos sólidos, el cálculo de esta propiedad se encuentra representado por la **Ecuación 6**.

Ecuación 6. Fluido de mezcla.

$$V_{fluido}(gal) = V_{agua}(gal) + V_{aditivos\ líquidos}(gal) + V_{aditivos\ sólidos}(gal)$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Cementación 2017.

Dónde:

- v_{fluido} : Es volumen final obtenido de la mezcla del volumen de agua volumen de aditivos líquidos y volumen de aditivos sólidos, el cual se expresa en gal.
- v_{agua} : Es el requerimiento de agua necesario a partir de la densidad requerida para la lechada, expresado en gal.
- $v_{aditivos\ líquidos}$ Hace referencia al volumen total de aditivos líquidos agregados a la mezcla, expresado en gal.
- $v_{aditivos\ sólidos}$ Hace referencia al volumen total de aditivos sólidos agregados a la mezcla, expresado en gal

2.5.6 Reología. Su término hace referencia al estudio del flujo y la deformación de los fluidos en este caso usando un enfoque al cemento petrolero, la reología es usada para evaluar la mezcla y la bombeabilidad de las lechadas, para determinar las tasas de desplazamiento correctas para la exitosa remoción del fluido de perforación y para estimar las presiones de fricción. A partir de las propiedades de la reología de una lechada es posible determinar la viscosidad plástica (VP) y el punto cedente (YP). El enfoque de este proyecto se encamina a describir el comportamiento de lechadas de cemento, las cuales se describen como fluidos no newtonianos; para la descripción del comportamiento reológico de dichos fluidos fueron desarrollados distintos modelos que pretenden describir su comportamiento.

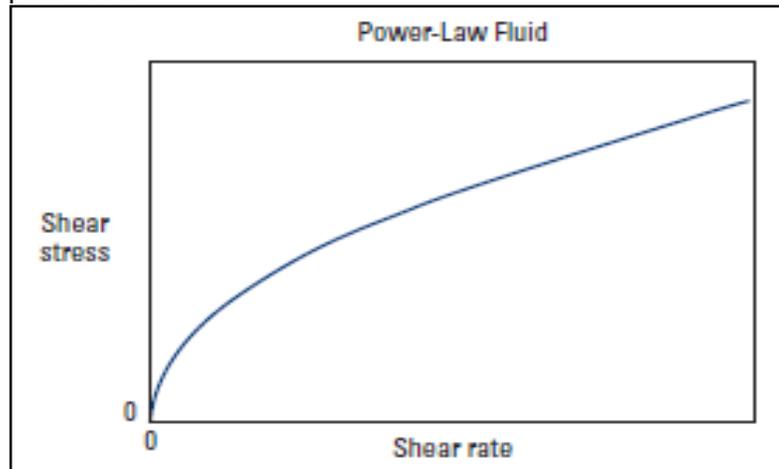
- Modelo de ley de potencias de fluido.
- Modelo de Bingham.
- Modelo Herschel-Bulkley.

2.5.6.1 Clasificación de los modelos reológicos. Para entender estos modelos es necesario entender el esfuerzo de corte y la tasa de corte donde el esfuerzo de corte es: “La fuerza por unidad de superficie requerida para mantener una velocidad constante de movimiento de un fluido”; y la tasa de corte es: “Surge a partir del gradiente de velocidad medida a través del diámetro de un canal de fluido, la tasa de corte hace referencia al cambio de velocidad a la cual una capa de fluido pasa por encima de una capa adyacente

➤ **Modelo de ley de potencias.** Este modelo matemático describe el comportamiento de los fluidos de tipo Pseudo-plásticos, al igual que los fluidos newtonianos, los fluidos Pseudo-plásticos que se ajustan a ley de potencias fluyen tan pronto se les aplica un gradiente de presión, pero a diferencia de los fluidos newtonianos el comportamiento de este tipo de fluidos no es lineal, la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte se puede evidenciar en la **Figura 6**⁶¹.

⁶¹ SCHLUMBERGER, Op cit., p. 96.

Figura 6. Descripción de fluido Pseudo - plástico de la ley de potencias.



El modelo de ley de potencias es descrito a través de las **Ecuaciones 7 y 8.**

Ecuación 7. Esfuerzo de corte según Modelo de Ley de Potencias.

$$\tau = k\dot{\gamma}^n$$

Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 96.

Dónde:

- τ : Valor del esfuerzo de corte, en unidades $\text{lb}/100\text{ft}^2$.
- K : Constante de consistencia, es un valor adimensional.
- $\dot{\gamma}$: Velocidad de corte, en unidades s^{-1} .
- n : Índice de Ley de Potencia, es un valor adimensional.

Ecuación 8. Viscosidad según Modelo de Ley de Potencias.

$$\mu = k\dot{\gamma}^{n-1}$$

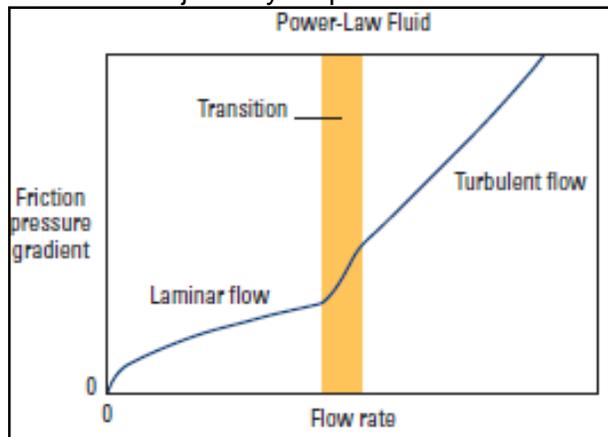
Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 96.

Dónde:

- μ : Es la viscosidad del fluido, expresado en cp.
- K: Es el valor de índice de consistencia.
- γ : Velocidad de corte, en unidades s^{-1} .
- n: Índice de Ley de Potencia, es un valor adimensional.

Donde a medida que el fluido se mantenga en flujo laminar, la relación entre el gradiente de la presión de fricción y la tasa de flujo se comportan bajo la ley de potencias. Sin embargo, a medida que la tasa de flujo aumenta, el comportamiento de flujo cambia a flujo turbulento, a su vez la relación cambia y la presión de fricción aumenta más rápido de lo predicho por el modelo laminar, como se puede evidenciar en la **Figura 7**.

Figura 7. Descripción del flujo laminar y turbulento bajo la ley de potencias.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 97.

➤ **Modelo plástico de Bingham.** La característica principal de este modelo es que el fluido se mantendrá inalterado hasta que le sea aplicado un mínimo esfuerzo de corte, este modelo fija dos parámetros inicialmente a partir de su gráfica, en los cuales se encuentra:

- El valor del esfuerzo de corte (τ) se define en el punto en el que la tasa de corte (γ) es igual a cero, es decir, este corresponde al valor del punto de esfuerzo cedente de Bingham (τ_y).

- La pendiente de la recta representa la viscosidad plástica (μ_p), el cual es un valor constante⁶².

El modelo matemático de Bingham se basa en las **Ecuaciones 9 y 10**.

Cuando $\tau > \tau_y$

Ecuación 9. Esfuerzo de corte según Modelo plástico de Bingham.

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}$$

Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 97.

Dónde:

- τ_y : Es el esfuerzo de corte cuando la velocidad de corte es cero, se expresa en unidades $\text{lbf}/100\text{ft}^2$.
- μ_p : Representa la viscosidad plástica, se expresa en unidades cp.
- $\dot{\gamma}$: Representa la velocidad de corte, expresada en s^{-1} .

Cuando $\tau \leq \tau_y$

Ecuación 10. Tasa de corte según Modelo plástico de Bingham.

$$\dot{\gamma} = 0$$

Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 97.

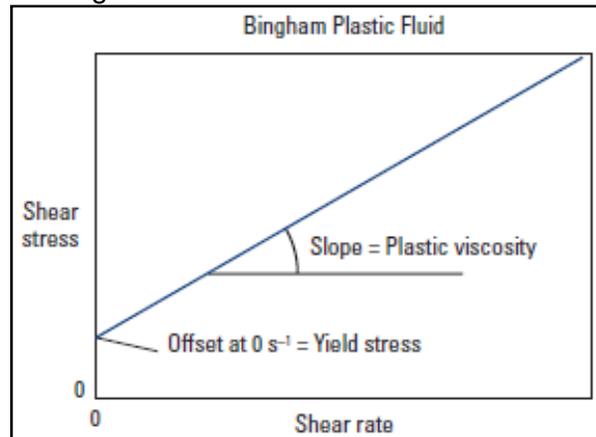
Dónde:

- $\dot{\gamma}$: Representa la velocidad de corte, expresada en s^{-1} .
- τ : Valor del esfuerzo de corte, en unidades $\text{lbf}/100\text{ft}^2$.
- τ_y : Es el esfuerzo de corte cuando la velocidad de corte es cero, se expresa en unidades $\text{lbf}/100\text{ft}^2$.

⁶² Ibid., p. 97.

Es decir, la curva del modelo matemático de Bingham se comportaría como en la **Figura 8**, un comportamiento lineal, en el cual el corte de la curva determinaría el esfuerzo inicial de corte y la pendiente de la curva determinará la viscosidad plástica del fluido, la cual se mantendrá constante.

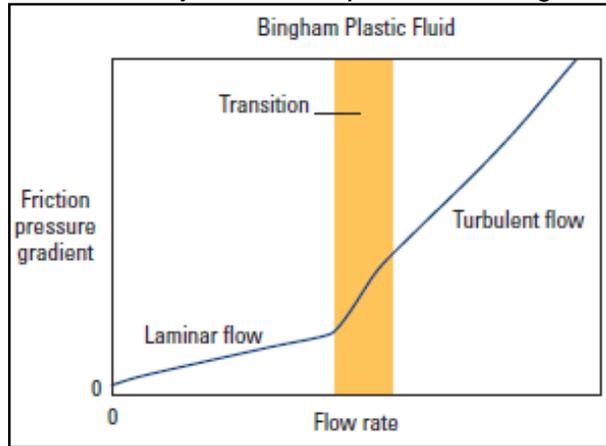
Figura 8. Comportamiento del modelo plástico de Bingham.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing, p. 97.

Los fluidos plásticos que son descritos con el modelo matemático de Bingham requieren un valor mínimo de presión para iniciar el flujo. Mientras este se mantenga en régimen de flujo laminar, la relación entre el gradiente de presión de fricción y la tasa de flujo aumentará de una manera no lineal y después tenderá a comportarse linealmente. De esta manera, el comportamiento difiere del comportamiento de la relación entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte, ya que no se puede considerar que la tasa de flujo no puede ser considerada como proporcional a la tasa de esfuerzo. Al igual que en otros modelos, a medida que la tasa de flujo aumenta y se comporta como régimen de flujo turbulento, la relación cambia y la presión de fricción aumenta más rápido de lo predicho por el modelo laminar, como se puede evidenciar en la **Figura 9**.

Figura 9. Descripción del flujo laminar y turbulento bajo el modelo plástico de Bingham.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing, p. 97.

➤ **Modelo de Herschel-Buckley.** Este modelo surge de la combinación de los modelos de Ley de potencias de fluidos Pseudo-plásticos y de fluidos plásticos de Bingham. En donde se requiere de un esfuerzo inicial de cedencia para que el flujo del fluido se inicié, y al igual que en la ley de potencia de fluidos, la relación entre la tasa de corte y el esfuerzo de corte se comportan bajo dicho modelo⁶³. El modelo de Herschel – Buckley se rige por las **Ecuaciones 11** y **12**, y su comportamiento es descrito en la **Figura 10**.

Ecuación 11. Esfuerzo de corte del modelo Herschel – Buckley.

$$\tau = \tau_y + k * \gamma^n$$

Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing, p. 97.

Cando

$$\tau > \tau_y$$

Dónde:

- τ : Valor del esfuerzo de corte, en unidades $\text{lbf}/100\text{ft}^2$.
- τ_y : Es el esfuerzo de corte cuando la velocidad de corte es cero, se expresa en unidades $\text{lbf}/100\text{ft}^2$.

⁶³ Ibid., p. 97.

- K : Es el valor de índice de consistencia.
- γ : Representa la velocidad de corte, expresada en s^{-1} .
- n : Índice de Herschel - Buckley, este es un valor adimensional.

Ecuación 12. Viscosidad del modelo Herschel – Buckley.

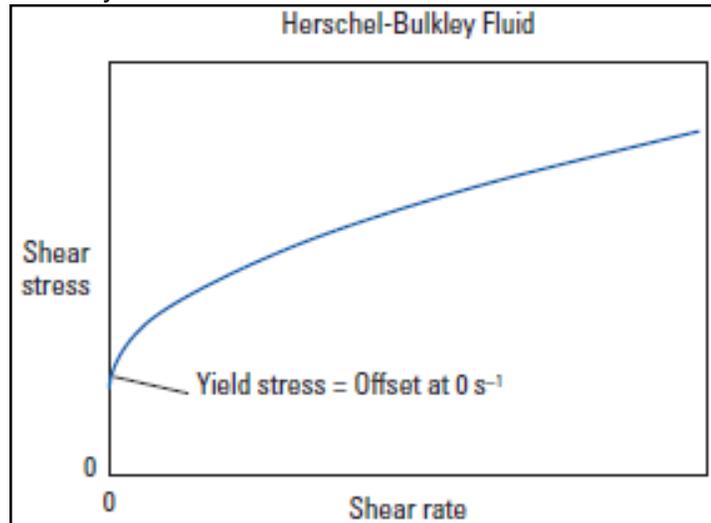
$$\mu = \frac{\tau_y + k * \gamma^n}{\gamma}$$

Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 97.

Dónde:

- μ : Viscosidad, unidades expresadas en cp.
- τ : Valor del esfuerzo de corte, en unidades $lbf/100ft^2$.
- τ_y : Es el esfuerzo de corte cuando la velocidad de corte es cero, se expresa en unidades $lbf/100ft^2$.
- K : Es el valor de índice de consistencia.
- γ : Representa la velocidad de corte, expresada en s^{-1} .
- n : Índice de Herschel - Buckley, este es un valor adimensional.

Figura 10. Comportamiento de modelo Herschel – Buckley.

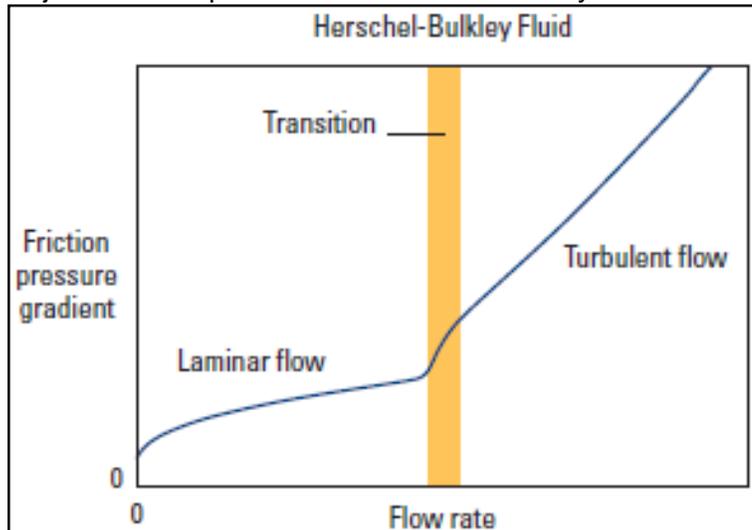


Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 98.

Siempre que el fluido esté en flujo laminar, la relación entre el gradiente de presión de fricción / tasa de flujo comienza con un desplazamiento en el índice de flujo 0 y luego aumenta de forma no lineal como se aprecia en la **Figura 11**. A medida que

la velocidad de flujo aumenta y el flujo comienza a volverse turbulento, la relación cambia y las presiones de fricción aumentan mucho más rápido de lo que predice la relación laminar.

Figura 11. Descripción del flujo laminar y turbulento bajo el modelo plástico de Herschel- Buckley.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 98.

2.5.6.2 Viscosidad Plástica. Esta propiedad de la lechada hace referencia a la parte de la resistencia al flujo causada por la fricción, la cual se ve afectada por los sólidos, es decir por su tamaño y forma de partícula y a su vez afectada por la viscosidad de la fase líquida, esta propiedad tiende a incrementar a medida que aumenta la cantidad de partículas sólidas presentes en la lechada. Según el modelo de Bingham esta es la pendiente de la línea de esfuerzo cortante, o velocidad de corte por encima del umbral de fluencia plástica o punto de cedencia, esta propiedad se expresa en centipoise (cp)⁶⁴.

2.5.6.3 Punto cedente. Este es el esfuerzo mínimo de corte que se le debe aplicar a un fluido para que este comience a desplazarse, es decir, esta es la primera resistencia de un fluido que presenta a fluir. También es llamado Yield Point y se expresa en libras de fuerza por 100 pies cuadrados ($lbf/100ft^2$)⁶⁵.

2.5.6.4 Esfuerzo de Geles. Esta propiedad corresponde a la medida que existe entre las fuerzas de atracción entre las partículas presentes dentro del fluido en condiciones estáticas. Para la medición del esfuerzo de geles es necesario el uso de viscosímetro, existen dos tiempos para medir este valor a 10 s y a 10 min, en ambos casos se apaga el viscosímetro por dicho periodo, después se inicia la

⁶⁴ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op cit.,

⁶⁵ Ibid.,

rotación por parte del viscosímetro a una frecuencia de 3 RPM (5.1 s^{-1}) para cuantificar la sensibilidad del corte de gel. La resistencia de gel puede ser medida después de un ciclo de histéresis o como una medida independiente⁶⁶.

2.5.7 Pérdida de fase líquida. La pérdida de la fase líquida de la lechada de cemento es un factor característico del proceso de cementación, debido a que es necesario que se produzca una deshidratación o pérdida controlada de la fase líquida de la lechada para que se lleve a cabo la solidificación de la misma, existen estándares internacionales propuestos por la API para denotar los valores a los cuales puede presentarse pérdida de fluido durante un proceso de cementación de un pozo dependiendo del tipo de operación de cementación, bien sea primaria, forzada, de liner y también para pozos horizontales⁶⁷.

2.5.8 Fuerza de compresión. Esta propiedad indica el grado de consistencia del cemento, es decir, cuantifica la presión que soporta la lechada y está dada en unidades de libras sobre pulgada cuadrada (Psi). La lechada de cemento una vez deshidratada debe ser capaz de soportar el peso de la tubería de revestimiento, soportar las vibraciones y movimientos generados por la broca y la tubería de perforación, y a su vez las perturbaciones causadas por el cañoneo de las formaciones. La resistencia inicial a la compresión que debe desarrollar el cemento para realizar las operaciones anteriormente mencionadas debe ser mayor a 500 Psi, este tiempo de espera para la continuación se le conoce como “tiempo de espera en cemento o waiting on cement” (WOC). El desarrollo de la compresión es una función que se encuentra dependiente de variables como lo son la temperatura, presión, cantidad de agua añadida en la mezcla y el tiempo transcurrido desde la mezcla de los componentes de la lechada. Esta última propiedad se puede afectar directamente, es decir, el tiempo de fragüe de la lechada puede variar dependiendo de la cantidad de acelerador o del retardante⁶⁸.

2.5.9 Fluidéz de la lechada. Se refiere a la cualidad de la lechada de ser mezclada, la cual se ve afectada directamente por la presencia de material dispersante, sin embargo también se ve afectada por la presencia y concentración de los distintos aditivos agregados a la mezcla, esta es una propiedad que se evalúa empíricamente al momento de realizar la mezcla de manera cualitativa, dependiendo de la formación o no del vórtice de mezcla presente en el mezclador, en caso de presentarse dicho vórtice, es posible afirmar que esta es una lechada con la que se puede operar, de lo contrario no es recomendable para la operación de cementación⁶⁹.

⁶⁶ SCHLUMBERGER, Op cit., p. 101.

⁶⁷ SUPERIOR ENERGY SERVICES, Op cit.,

⁶⁸ Ibid.,

⁶⁹ Ibid.,

2.5.10 Sedimentación de la lechada de cemento. Esta muestra en qué grado se han precipitado los sólidos presentes en la lechada, esta propiedad indica la homogeneidad presente en la lechada de cemento, en el caso de presentarse sedimentación de las partículas sólidas del cemento se ocasionarán problemas operacionales o daños en las operaciones⁷⁰.

2.5.11 Permeabilidad de la lechada de cemento. Esta es una propiedad de la lechada la cual debe ser casi inexistente, esta propiedad viene dada en milidarcys (md) la cual para el caso de la lechada no debe sobrepasar el valor de 0.1 md, debido a que la presencia de permeabilidad en la lechada hace inefectiva su función al comprometer la integridad del pozo y las de los fluidos a producir⁷¹.

2.6 PROPIEDADES DE LA LECHADA EN CAMPO CASTILLA

Durante la cementación de las secciones superior e intermedia de cada pozo de Campo Castilla se implementaron dos lechadas con dos densidades diferentes cada una. La lechada de mayor densidad se le llama lechada principal o tail, esta se encuentra en la parte inferior de la sección a cementar, la razón de que esta tenga una mayor densidad es para proporcionar una mejor aislación a la formación y dar un mejor soporte al revestimiento. La lechada de menor densidad es llamada lechada de relleno o lead, esta se encuentra desde la profundidad a la cual termina la lechada principal hasta tener una altura aproximada de unos 1.000 ft, esta lechada posee unas propiedades más pobres con respecto a la principal como lo es tener una baja resistencia y una alta porosidad, no obstante, es capaz de soportar y proteger el revestimiento. Una de las razones por la que es usado este método de cementación con lechadas de diferente densidad es para reducir costos en la operación sin poner en peligro esta.

2.6.1 Sección superior de 17 ½” CSG 13 3/8”. Para la sección superior de 17 ½” con revestimiento de 13 3/8” se utilizó una lechada principal con una densidad de 15.6 ppg y una lechada de relleno con una densidad de 13.6 ppg, la lechada principal se encuentra desde los 1001 ft hasta los 800 ft y la lechada de relleno desde los 800ft hasta superficie. Las dos lechadas se sometieron a una profundidad verdadera (TVD) de 1000 ft, con un gradiente geotérmico de 1.2 °F cada 100 ft el cual es correspondiente para Campo Castilla, se determinó que la temperatura estática en fondo (BHST) es de 92°F y la temperatura de circulación en fondo (BHCT) es de 85°F para esta sección. A continuación, se habla de la composición inicial de las lechadas y de algunos requerimientos que deben cumplir las dos lechadas de dicha sección.

2.6.1.1 Lechada Principal. Como se puede observar en la **Tabla 3** la lechada principal está compuesta por antiespumante a 0.01% GPS, acelerador al 0.7%

⁷⁰ Ibid.,

⁷¹ Ibid.,

BWOC. El tiempo de bombeabilidad debe ser mayor al tiempo de operación en 1.5 h y debe estar entre las (2,5 – 3,5) h. De los resultados obtenidos a partir de la prueba de resistencia a esfuerzos compresivos ensayo no destructivo se requiere que la resistencia a la compresión tenga un valor mayor a los 2000psi a las 24h después de iniciar la prueba.

Tabla 3. Composición de la lechada de relleno para la sección de superficie de 17 1/2" CSG de 13 3/8".

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"		
Densidad		15,6 ppg
Cemento		Agua
	758,41	357,26
Aditivo	Concentración	gr
Acelerante	0,7% BWOC	5,31
Antiespumante	0,01% Gal/Sx	0,67

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES.

2.6.1.2 Lechada de Relleno. Como se puede observar en la **Tabla 4** la lechada de relleno está compuesta por antiespumante a 0.01% GPS, acelerador al 1% BWOC. El tiempo de bombeabilidad debe ser al igual que para la lechada principal mayor al tiempo de operación en 1.5 h, el tiempo de operación se estima que sea de 1 h y 39 min. De los resultados obtenidos a partir de la prueba de resistencia a esfuerzos compresivos ensayo no destructivo se estima que a las 6h después de iniciar la prueba, la lechada de cemento empiece a generar resistencia a la compresión.

Tabla 4. Composición de la lechada de relleno para la sección de superficie de 17 1/2" CSG de 13 3/8".

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"		
Densidad		13,6 ppg
Cemento		Agua
	548,49	423,37
Aditivo	Concentración	gr
Acelerante	1% BWOC	5,48
Antiespumante	0,01 Gal/Sx	0,49

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES.

2.6.2 Sección intermedia de 12 1/4" CSG DE 9 5/8". Para la sección superior de 12 1/4" con revestimiento de 9 5/8" se utilizó una lechada principal con una densidad de 15.8 ppg y una lechada de relleno con una densidad de 13.6 ppg, la lechada principal se encuentra desde los 6727 ft hasta los 5475 ft y la lechada de relleno desde los 5475 ft hasta los 4175 ft. Las dos lechadas se sometieron a una profundidad verdadera (TVD) de 6281 ft, con un gradiente geotérmico de 1.2 °F cada 100 ft el cual es correspondiente para Campo Castilla, se determinó que la temperatura estática en fondo (BHST) es de 160 °F y la temperatura de circulación en fondo (BHCT) es de 119 °F para esta sección. A continuación, se hablará de la

composición inicial de las lechadas y de algunos requerimientos que deben cumplir las dos lechadas de dicha sección.

2.6.2.1 Lechada Principal. Como se puede observar en la **Tabla 5** la lechada de relleno está compuesta por antiespumante al 0.01% GPS, extendedor al 0.02% BWOC, retardador al 0.04% BWOC, controlador de filtrado 1 al 0.5% BWOC y controlador de filtrado 2 al 0.8% BWOC. El tiempo de bombeabilidad debe ser mayor al tiempo de operación en 1 h y debe estar entre las (5 – 6) h. De los resultados obtenidos a partir de la prueba de resistencia a esfuerzos compresivos ensayo no destructivo se requiere que la resistencia a la compresión tenga un valor cercano a los 3000psi a las 24h después de iniciar la prueba. La prueba de filtrado debe ser menor a 50 mL durante los 30 min que dura la prueba, a partir de los resultados de reología se espera que la viscosidad plástica sea de.

Tabla 5. Composición de la lechada principal para la sección intermedia de 12 1/4" CSG de 9 5/8".

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"		
Densidad		15,8 ppg
Cemento		Agua
	776,87	348,06
Aditivo	Concentración	Gr
Extendedor	0,02% BWOC	0,16
Controlador de Filtrado 1	0,5% BWOC	3,88
Controlador de Filtrado 2	0,8% BWOC	6,21
Antiespumante	0,01% Gal/Sx	0,69
Retardador	0,04% BWOC	0,31

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES.

2.6.2.2 Lechada de Relleno. Como se puede observar en la **Tabla 6** la lechada de relleno está compuesta por antiespumante al 0.01% GPS, retardador al 0.23% BWOC y controlador de filtrado 1 a una concentración de 1% BWOC. El tiempo de bombeabilidad debe ser mayor al tiempo de operación en 1h, el tiempo de operación se estima que es de 3 h y 55 min. De los resultados obtenidos a partir de la prueba de resistencia a esfuerzos compresivos ensayo no destructivo se estima que a las 6 h y 40 min después de iniciar la prueba, la lechada de cemento empiece a generar resistencia a la compresión. La prueba de filtrado debe ser menor a los 100 mL durante los 30 min que dura la prueba.

Tabla 6. Composición de la lechada de relleno para la sección intermedia de 12 1/4" CSG de 9 5/8".

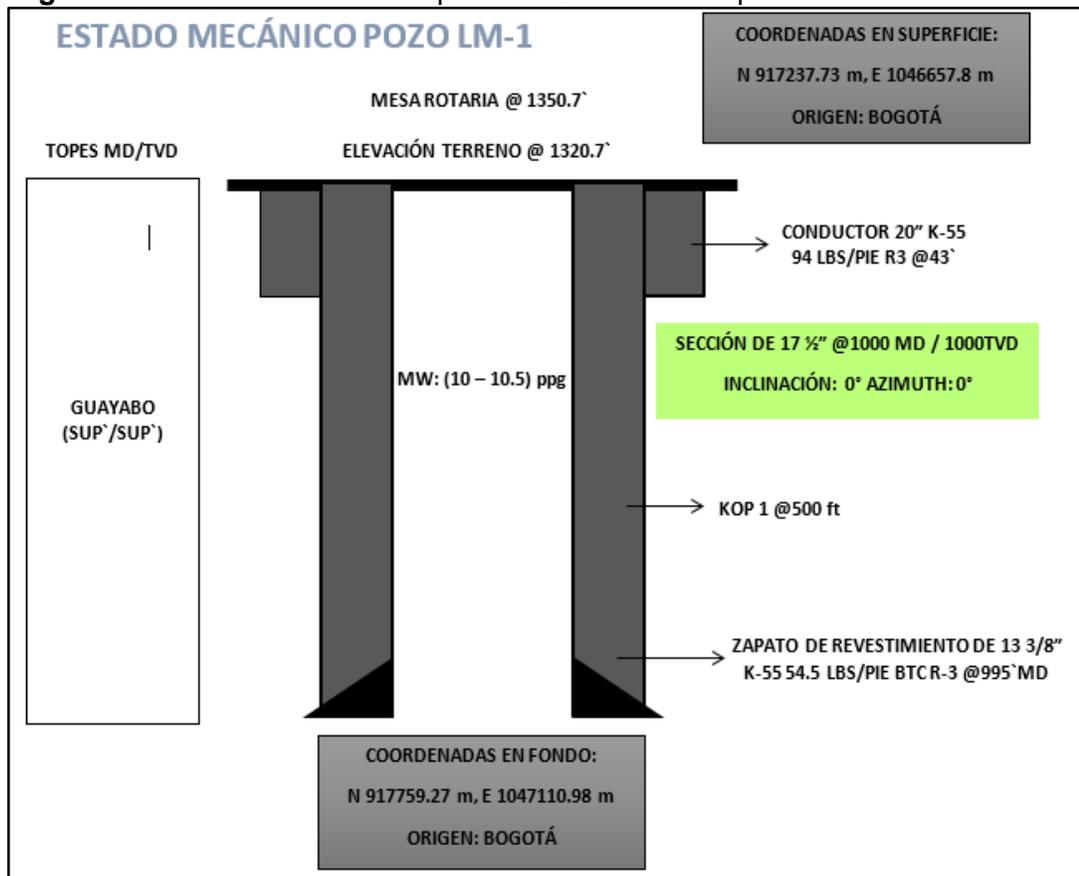
SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"		
Densidad		13,6 ppg
Cemento		Agua
	550,51	420,07
Aditivo	Concentración	gr
Controlador de Filtrado 1	1% BWOC	5,51
Antiespumante	0,01% Gal/Sx	0,49
Retardador	0,23% BWOC	1,27

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES.

2.7 ESTADO MECÁNICO POZO LM-01 SECCIÓN SUPERIOR

En esta sección se ilustrará el estado mecánico del pozo LM-01 para la sección superior como se puede observar en la **Figura 12**.

Figura 12. Estado mecánico del pozo LM-01 sección superior.

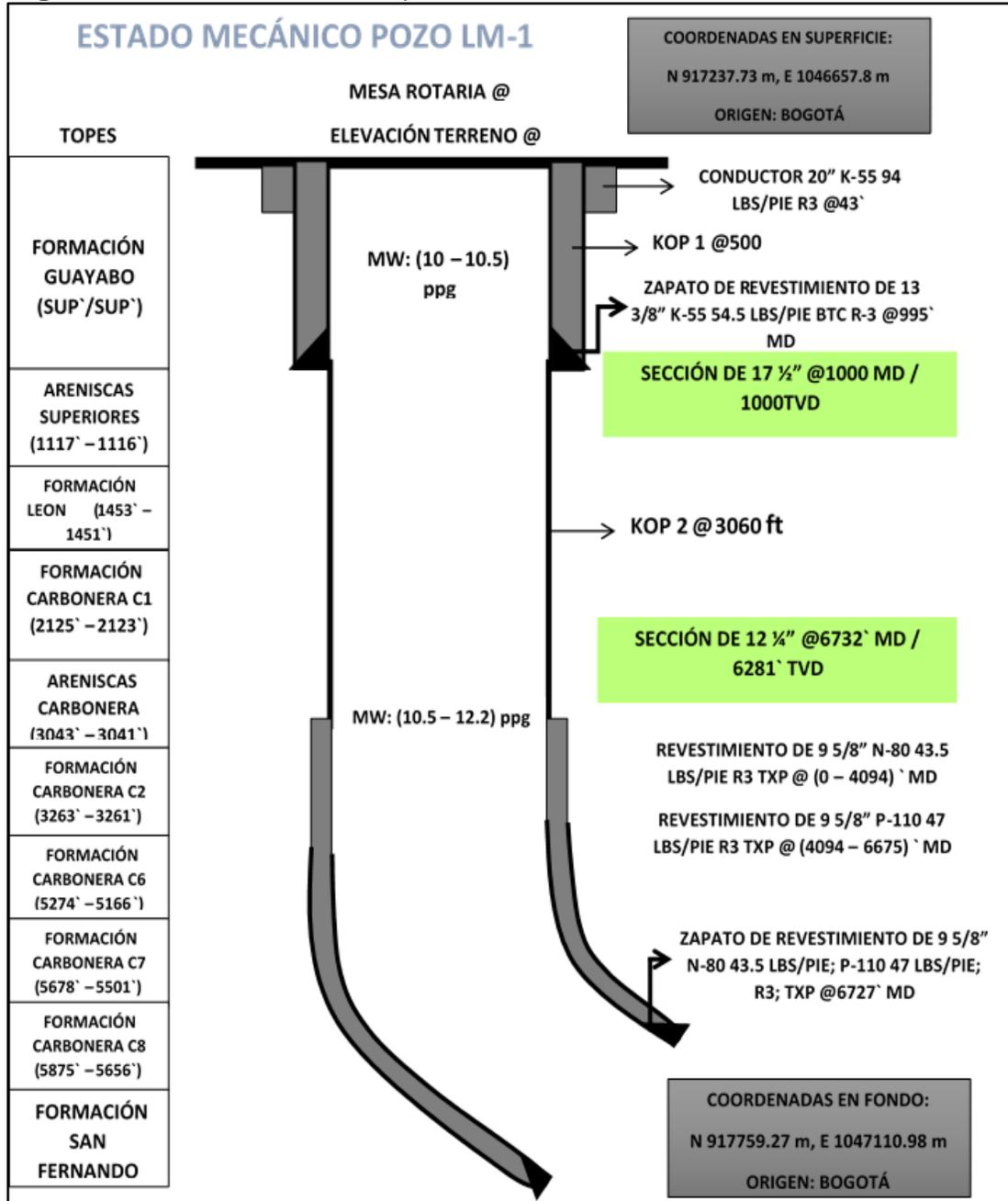


Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES.

2.8 ESTADO MECÁNICO POZO LM-01 SECCIÓN INTERMEDIA

En esta sección se ilustrará el estado mecánico del pozo LM-01 para la sección intermedia como se puede observar en la **Figura 13**.

Figura 13. Estado mecánico del pozo LM-01 sección intermedia.



Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES.

3. USO DEL CAUCHO RECICLADO EN LA INDUSTRIA

Antes de hacer un enfoque del caucho reciclado en la industria de los fluidos de cementación de pozos petroleros se hace una breve descripción de las diferentes formas de disposición a la cual son sometidos los neumáticos que han cumplido con su principal propósito, posteriormente se dará una descripción del grano de caucho reciclado, las propiedades de este, los tipos de malla para la selección del tamaño adecuado y su uso en la industria.

3.1 DISPOSICIÓN DE LOS NEUMÁTICOS

Una vez los neumáticos han cumplido su principal función estos generalmente son desechados. En Colombia gran parte de estos neumáticos son almacenados en depósitos, patios de casas, techos, lagos, ríos y calles; causando problemas de contaminación y salud cuando son sometidos a quema directa emitiendo diferentes gases o partículas nocivas para el entorno, de igual forma al permitir proliferar distintos roedores e insectos. La disposición de estos neumáticos debe ser adecuada y esto no se logra fácilmente de no tener el conocimiento apropiado, incluso si son dispuestos como desechos en rellenos sanitarios, pueden a llegar a demorar más de 100 años en desintegrarse.

En gran parte del mundo poco tiempo atrás, se empezó a tomar conciencia de la importancia de clasificar los diferentes desechos para de esta forma disponer estos materiales de la mejor manera, en algunos países se han impuesto leyes para favorecer esta práctica.

En el último año el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emitió la Resolución No. 1326 en el año 2017 *“por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones”*. En el cual se definen: el almacenamiento de llantas usadas, que es el grano de caucho reciclado, quienes son productores de llantas, los diferentes sistemas de recolección, obligaciones de los productores, obligaciones de los distribuidores y comercializadores, obligaciones de los municipios y distritos, información concerniente a la disposición final y prohibiciones entre otros.

Por otra parte, alguna de la normativa que rige en casos de tener un inadecuado manejo o disposición de llantas con respecto a recursos naturales

Hoy en día estos neumáticos pueden ser dispuestos para uso artesanal, energético y reciclado los cuales van a ser explicados a continuación.

3.1.1 Artesanal. Con el propósito de aprovechar este material y aportar a la solución ambiental y de salud. Diferentes artistas y artesanos utilizan los neumáticos y los someten a diferentes procesos para obtener un subproducto con un valor agregado. Con estos neumáticos logran obtener subproductos como:

Sillas, zapatos, diques, bolsos, materas, diferentes adornos domésticos o de jardinería, entre otros productos. En la **Figura 14** se puede observar algunas de las transformaciones finales que se le pueden dar a los neumáticos.

Figura 14. Algunas disposiciones finales de los neumáticos.



Fuente: <<https://i.pinimg.com/236x/6a/cd/38/6acd38992a333417c705e6ff4befa284--recycle-tires-tire-planters.jpg>>.

3.1.2 Energético. Los neumáticos son utilizados como una fuente de energía alternativa en hornos de cemento, calderas o termoeléctricas debido a que presenta un elevado poder calorífico, el cual es de aproximadamente de 37 Megajulios por kilogramo o 8300 kilocaloría por kilogramo el cual es comparable o mayor al poder calorífico del carbón de buena calidad cuyo valor es de aproximadamente 7400 kilocaloría por kilogramo, estos neumáticos pueden ser usados de igual forma para la obtención de energía eléctrica; en la **Figura 15** se puede observar una termoeléctrica la cual es un muestra ejemplar de los procesos en los cuales son usados los neumáticos como fuente de energía alternativa.

Cuando el neumático es sometido a un proceso de incineración en hornos o calderas donde el material es sometido a temperaturas elevadas (entre los 1500 – 1.600 grados centígrados) haciendo que este tenga una combustión exotérmica y de esta forma aprovechar la energía resultante de este proceso, en este proceso todos los materiales presentes en los neumáticos reaccionan.

En el caso de las calderas el calor liberado por el neumático provoca que el agua presente en la caldera se evapore, este vapor que se encuentra a alta temperatura y alta presión es dirigido a una turbina, el paso del vapor de agua a través de la turbina hace que esta se mueva. Esta turbina debe tener un generador acoplado produciendo de esta forma electricidad la cual posteriormente debe ser transformada para uso directo.

El proceso de incineración de los neumáticos tiene un problema asociado a los gases producidos durante este proceso debido a que se producen gases tóxicos como: dióxido de azufre (SO_2), ácido sulfhídrico (H_2S), entre otros. También se emiten metales de Zinc, Cadmio, Plomo, Níquel y Cromo. Por esta razón se debe tener sistemas adicionales de control, no obstante, la emisión de dióxido de carbono (CO_2) disminuye comparándolo con combustibles primarios.

Figura 15. Planta termoeléctrica.



Fuente: TERMOBARRANQUILLA. Disponible en: < <http://www.andeg.org/node/15>>

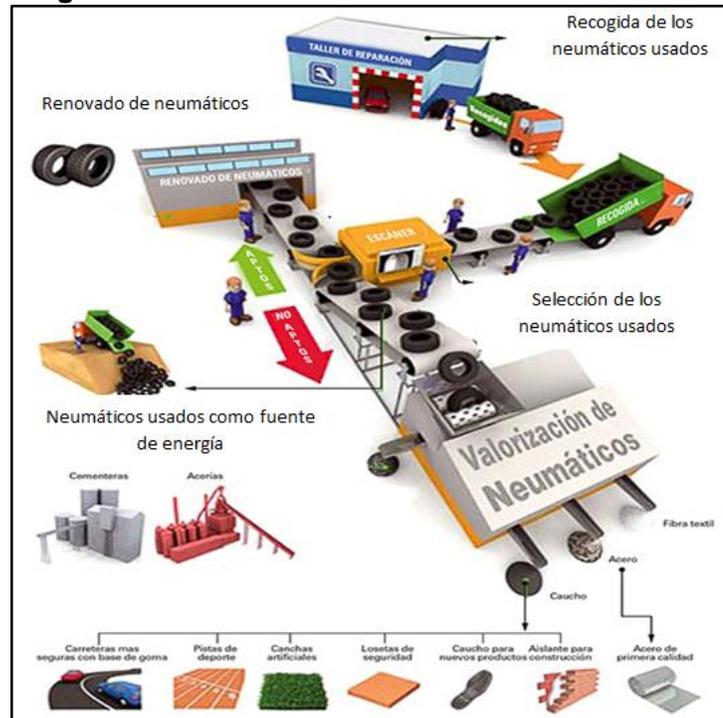
3.1.3 Reciclado. En este tipo de disposición, los neumáticos son sometidos a algunos procesos con el fin de obtener los diferentes materiales de los cuales está compuesto el neumático, en la **Figura 16** se hace una descripción muy breve del proceso de transformación de los neumáticos y cuáles son sus posibles usos finales. Entre ellos se tiene la termólisis, pirolisis, trituración criogénica y trituración mecánica.

3.1.3.1 Termólisis. En este procedimiento el neumático es sometido a un calentamiento en un medio anaeróbico, las condiciones de alta temperatura y ausencia de oxígeno provocan la ruptura de los enlaces químicos. De esta forma se obtiene de nuevo los compuestos originales de los cuales están compuestos los neumáticos como los metales, hidrocarburos sólidos y gaseosos para ser utilizados en la elaboración de neumáticos nuevamente o con otros fines.

3.1.3.2 Pirolisis. Este proceso es similar al de la termólisis debido a que involucra degradación térmica de los materiales en un medio anaeróbico en hornos que trabajan en temperaturas de 400 – 800 °C; los materiales orgánicos de las llantas se descomponen químicamente con excepción de los metales y vidrios. En este

proceso no se producen dioxinas o furanos los cuales son muy tóxicos para los seres humanos y un alto contaminante para el medio ambiente, algunos de los productos obtenidos son gas natural pobre, aceite líquido y acero.

Figura 16. Ciclo de transformación de neumáticos.



Fuente: AUTOCRASH. Disponible en: <<http://www.revistaautocrash.com/colombia-se-inunda-llantas-usadas/>>

3.1.3.3 Trituración Criogénica. Este proceso consiste en congelar los neumáticos reciclados con nitrógeno líquido, posterior a la congelación los neumáticos son golpeados para separar de esta forma los diferentes materiales de los cuales están constituidos los neumáticos. Una de las razones por la cual este proceso no es recomendado es debido a la baja calidad de los productos obtenidos, requiriendo de esta manera un proceso de purificación y separación más complejo. Por esta razón las instalaciones son más complejas y menos rentables.

3.1.3.4 Trituración Mecánica. Es un proceso netamente mecánico, no intervienen agentes químicos o calor. Consiste en pasar los neumáticos por un proceso en serie de diferentes maquinas trituradoras, los productos que proporciona son de alta calidad limpios de impurezas haciendo más fácil la disposición de estos. El acero es separado mediante un separador magnético, el material textil mediante clasificadores neumáticos y el caucho es separado en gránulos a partir de mallas permitiendo el paso de los granos de ciertos tamaños; es el proceso de separación más usado actualmente.

3.2 OBTENCIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO

Este material granular es posible obtenerlo a partir de la degradación física o térmica de los neumáticos, los cuales han cumplido su ciclo de vida útil con respecto a su función primaria y han sido dispuestos como material de desperdicio, que al momento de iniciar el proceso de recuperación del caucho y los distintos compuestos del neumático, se convierte en una nueva materia prima. Este material obtenido a partir de la degradación mecánica o térmica puede ser presentado en distintos tamaños, al producto final de las separaciones y degradaciones del caucho se le conoce como Grano de Caucho Reciclado o rubber.

A continuación, se menciona las propiedades del grano de caucho, ciertos elementos de protección que pueden ser requeridos al momento de manipular el grano de caucho y también los tamaños de malla más comunes en los que se puede obtener este grano.

3.2.1 Propiedades. Algunas de las ventajas que presenta este producto es que es un material no tóxico para el hombre, es un producto 100% ecológico al ser un material reutilizado, no representa ningún peligro al medio ambiente y en su composición carece de presencia de látex. En el **Cuadro 4** se muestran algunas propiedades físicas y químicas del grano de caucho.

Cuadro 4. Propiedades del grano de caucho reciclado.

Propiedad	Característica
Estado físico	Sólido granular
Aspecto	Negro
Olor	Ninguno
Presión de vapor	NA
Densidad de vapor	NA
Gravedad específica	1,15 ± 0,05
Peso específico	2,7
Estabilidad	Estable
Polimerización peligrosa	Ninguno
Velocidad de evaporación	NA
pH (en agua)	Neutro
Punto de ebullición	>1000° C
Punto de congelación	Ninguno, sólido
Viscosidad	Ninguna, sólido
Solubilidad en agua	Insoluble
Descomposición peligrosa	Ninguno
Temperatura de degradación	788°F – 1112°F

Fuente: GERCONS COLOMBIA.

Esta información mencionada anteriormente en el **Cuadro 4** abarca muchos tipos de grano de caucho. Otras propiedades de este grano es el no ser combustible ni explosivo, no obstante, es recomendable no inhalar este material ya que puede generar asfixia, la exposición prolongada sin los debidos implementos de protección puede llegar a causar cáncer. Se puede deducir que este producto es prácticamente no reactivo con otras sustancias, pero esto no quiere decir que se pueda eliminar de cualquier forma, este producto no debe ser vertido en ningún cuerpo de agua o disperso en el aire, su eliminación debe ser de acuerdo a la normativa a nivel nacional, regional o departamental dependiendo de la regulación propuesta por la Resolución No. 1326 del 2017.

No tiene restricciones de almacenamiento en presión o temperatura, pero se recomienda usar equipos de protección personal cuando se interactúe con este material. En condiciones comunes (lugares donde el grano no este mezclado o disperso en el aire) no se requiere protección respiratoria pero de ser necesario se debe contar con un respirador aprobado por el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) él cual debe estar ajustado correctamente y en buenas condiciones, también se recomienda usar gafas de seguridad o anteojos aprobados por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) al momento de manipular el producto y en situaciones que den lugar a la formación de abrasiones se recomienda el uso de guantes. La ropa polvorienta y equipos protectores deben quedar limpios antes de ser usados nuevamente.

3.2.2 Tamaños de malla. Para empezar a hablar del tamaño del grano de caucho es necesario saber el tamaño de la malla ya que este da un promedio del tamaño que tendrá el grano de caucho. La nomenclatura usada para el tipo de malla es representada por un número el cual indica el número de hilos cruzados por cada pulgada cuadrada, por ejemplo: una malla # 60 quiere decir que tiene 60 hilos verticales y 60 hilos horizontales formando una cuadrículo por cada pulgada cuadrada, cada abertura tiene un tamaño y para el caso anterior la malla tiene una abertura de 0,25 milímetros o 0,0098 pulgadas. Cuando se encuentra una malla con dos cifras como por ejemplo 10 x 40 quiere decir que es un rango de partículas que van de la malla 10 (2 milímetros) y hasta la malla 40 (0,42 milímetros), en otras palabras, se tiene partículas de grano entre 0,42 - 2 milímetros.

Los tamaños de malla en la que se puede obtener el grano de caucho reciclado van desde:

- Malla > 40 (>0,400 milímetros).
- Malla 40 (0,400 milímetros).
- Malla 50 (0,297 milímetros).
- Malla 60 (0,250 milímetros).

- Malla 70 (0,210 milímetros).
- Malla 80 (0,177 milímetros).
- Malla 100 (0,149 milímetros).

Para obtener grano de caucho de malla 80 a 100 es necesario utilizar procesos de trituración mucho más específicos como la trituración criogénica o trituración mecánica implementando maquinaria más compleja. Para este estudio se pretende implementar grano de caucho proveniente de malla 80 – 99 obteniendo partículas con tamaños alrededor de los 0,149 milímetros.

3.3 USO EN LA INDUSTRIA

El grano de caucho reciclado actualmente puede ser implementado en tres sectores de la industria como lo es la elaboración de pisos de caucho reciclado, como fuente de energía, en mezclas asfálticas y mezclas de concreto para la industria civil. A continuación, se menciona como ha afectado cada sector.

3.3.1 Pisos de caucho. Producto el cual aproximadamente el 90% de sus componentes es caucho reciclado proveniente de trituración mecánica. La elaboración de las baldosas consiste en verter la mezcla del grano de caucho con una resina, finalmente la mezcla en el molde es sometida a un proceso de compresión. Las baldosas pueden ser coloreadas usando tintes, pero las propiedades de atracción y abrasión son inferiores al producto natural sin tinte, en la **Figura 17** se puede observar algunos de los colores que pueden tener el producto terminado.

Figura 17. Piso elaborado a partir del grano de caucho reciclado.



Fuente: Disponible en: <<http://rrstroy.ru/rubber-coating>>.

Algunas de las características de estas baldosas son:

- Antideslizante.
- Absorbe los impactos.
- Absorbe el ruido.
- Aislante térmico y eléctrico.
- Permeable al agua.
- Flexible y de fácil instalación.

3.3.2 Fuente de energía. Como se mencionó anteriormente debido al elevado poder calorífico del caucho de los neumáticos (Poder calorífico de 8300 kilocaloría por kilogramo, comparable con el del Carbón), estos neumáticos son utilizados como fuente de energía alternativa en hornos o calderas para generar un ahorro en combustibles fósiles no renovables y para contribuir a la gestión sostenible de los residuos. Este material no reemplaza del todo los otros combustibles que se usan en los diferentes hornos, solo reemplaza un porcentaje para tener controlado la emisión de contaminantes al medio ambiente cumpliendo los parámetros impuestos por ley.

3.3.3 Mezclas asfálticas. La incorporación del grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas es con el fin de mejorar el desempeño de estas mezclas al aumentar la resistencia a la deformación, los esfuerzos de tensión iterativos, aumentar la resistencia a la fatiga, reducir el agrietamiento y tolerar mejor los cambios de temperatura haciendo que el asfalto tenga mayor vida útil.

El proceso consiste en adicionar y mezclar el grano de caucho con la mezcla asfáltica en caliente (a temperaturas de 180°C) para mejorar una mayor homogeneidad de la nueva mezcla y de igual forma la adición de un dispersor de asfalto el cual también contribuye a mejorar el proceso de mezclado. El tamaño de grano de caucho usado puede ser de malla 8 (2,38 milímetro), malla 18 (1 milímetro) o malla 25 (0,707 milímetro), en la **Figura 18** se puede observar brevemente el proceso al cual son sometidos los neumáticos antes de ser combinados con la mezcla asfáltica. Fuente: H. A. Rondón, Y. Molano y A. M. Tenjo, "Influence of compaction temperature on resistance under monotonic loading of Crumb-Rubber Modified Hot-Mix asphalts", Tecno Lógicas, no. 29, pp. 13-31, 2012.

Figura 18. Implementación del grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas.



3.3.4 Mezcla de concreto. La implementación del grano de caucho en mezclas de concreto no ha sido muy efectiva ya que las investigaciones previas demostraron que las propiedades de la mezcla endurecida como la resistencia y la durabilidad disminuyen con respecto a una mezcla de concreto convencional debido a que el grano de caucho presenta una baja adherencia, entre mayor el porcentaje del grano de caucho y material detrítico, se ven afectadas estas propiedades en mayor proporción.

Dichas investigaciones también determinaron que el porcentaje máximo de reemplazo del grano de caucho con respecto a agregados finos debe ser 10% para uso estructural, concluyendo que el grano de caucho debe reemplazar arena y no grava al momento de la elaboración de las lechadas.

Las propiedades de la mezcla en estado fresco se mantienen dentro de los parámetros establecidos por la Norma Técnica Colombiana (NTC). No obstante, el grano de caucho hace que la mezcla tenga menor fluidez sin volverla rígida, la mezcla retiene más cantidad de aire haciendo que la mezcla en estado sólido sea más porosa.

Las lechadas de cemento modificado con grano de caucho reciclado se podrían utilizar comercialmente con ciertas limitaciones comerciales debido a que la adición del grano de caucho no presenta ningún beneficio en ninguna de las propiedades mecánicas. Asimismo, la implementación de este producto no es económicamente viable puesto que el material que se pretende reemplazar es la arena y esta tiene un menor costo con respecto al grano de caucho.

4. DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS PARA LA SELECCIÓN DE LA MEJOR LECHADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO

El presente capítulo tiene por propósito la selección de la lechada de cemento que presenta mejor comportamiento frente a las pruebas de reología, control de filtrado, mezclabilidad y agua libre efectuadas en el laboratorio de la empresa Superior Energy Services. Previo a la discusión referente a las pruebas de laboratorio, los resultados, análisis de resultados y criterios de selección de las lechadas, es necesario explicar un poco de los cálculos necesarios de masa y volumen de cada compuesto presente en las lechadas principales que se utiliza actualmente en pozos de Campo Castilla con la diferencia que se va a introducir el cálculo del grano de caucho reciclado. Cabe resaltar que todas las pruebas de laboratorio se les realizan únicamente a las lechadas principales de las secciones de superficie e intermedia.

4.1 CÁLCULOS PARA UNA LECHADA DE CEMENTO DE 15,8 PPG CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO

En esta sección del capítulo se realizan los cálculos respectivos para conocer la cantidad de cemento, agua y aditivos que componen una lechada utilizada previamente en Campo Castilla incluyendo el cálculo del grano de caucho reciclado el cual tendrá una concentración de 5% BWOC, para hacer los cálculos más representativos dichos cálculos se le realizarán a la lechada principal que se usará en la sección intermedia. El volumen de muestra necesario para correr las diferentes pruebas de laboratorio es de 600 mL, en la **Tabla 7** se observa la composición de la lechada principal de 15,8 ppg usada en la sección intermedia de 12 ¼" a la cual se le realizan los cálculos de masa para cada compuesto presente en la lechada.

Tabla 7. Composición de la lechada de relleno de 15,8 ppg de la sección intermedia de 12 ¼".

Aditivo	Concentración
Antiespumante	0,01 GPS
Extendedor	0,02% BWOC
Retardador	0,04% BWOC
Controlador de Filtrado 1	0,5% BWOC
Controlador de Filtrado 2	0,8% BWOC
Grano de Caucho Reciclado	5,00% BWOC

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES COLOMBIA. 2017.

Para el cálculo de requerimiento de agua, el antiespumante no es tenido en cuenta debido a que la concentración de este la cual es de 0,01% GPS y no afecta en gran medida la densidad de la lechada. El cálculo de requerimiento de agua se realiza a partir de las **Ecuación 5**, no obstante, es necesario el cálculo previo de la

masa de cada aditivo para un saco de cemento (un saco de cemento pesa 94lb) como se puede observar en el **Cálculo 1**.

Cálculo 1. Peso de aditivos para un saco de cemento.

$$m_{Aditivo} = 94_{lb/Sx} * Concentración [\%BWO] = masa [lb/Sx]$$

$$m_{Ext} = 94_{lb/Sx} * 0,02\% = 0,019 \text{ lb/Sx}$$

$$m_{Ret} = 94_{lb/Sx} * 0,04\% = 0,038 \text{ lb/Sx}$$

$$m_{CF1} = 94_{lb/Sx} * 0,5\% = 0,470 \text{ lb/Sx}$$

$$m_{CF2} = 94_{lb/Sx} * 0,8\% = 0,752 \text{ lb/Sx}$$

$$m_{GCR} = 94_{lb/Sx} * 5\% = 4,70 \text{ lb/Sx}$$

Una vez calculada la masa de cada aditivo para un saco de cemento se procede a realizar el cálculo de la densidad de cada compuesto que compone la lechada de cemento, todo eso a partir de la gravedad específica de cada uno de los componentes de la lechada y la densidad del agua a 60°F que tiene un valor de 8,33 ppg como se puede observar en el **Cálculo 2**.

Cálculo 2. Determinación de las densidades de cada componente de la lechada de relleno para la sección de 12 ¼".

$$\rho_{Aditivo} = GE_{Aditivo} * \rho_{agua @60°F [ppg]} = \rho [ppg]$$

$$\rho_{Anti} = 1,03 * 8,330 = 8,580 \text{ ppg}$$

$$\rho_{Ext} = 1,45 * 8,330 = 12,079 \text{ ppg}$$

$$\rho_{Ret} = 1,33 * 8,330 = 11,079 \text{ ppg}$$

$$\rho_{CF1} = 1,80 * 8,330 = 14,994 \text{ ppg}$$

$$\rho_{CF2} = 1,80 * 8,330 = 14,994 \text{ ppg}$$

$$\rho_{GCR} = 1,15 * 8,330 = 9,580 \text{ ppg}$$

$$\rho_{Cem} = 3,18 * 8,330 = 26,489 \text{ ppg}$$

$$\rho_{Agua} = 0,998 * 8,330 = 8,313 \text{ ppg}$$

Es importante aclarar que la gravedad específica de cada componente varía según el lote y para ello se trabaja con el mismo lote de cada producto para todas las pruebas de laboratorio. Las gravedades específicas de los aditivos se pueden

observar en la **Tabla 8**, la gravedad específica del agua es calculada a partir de la densidad determinada en el laboratorio.

Tabla 8. Gravedades específicas de los componentes de la lechada de relleno para la sección de 12 ¼”.

Aditivo	Gravedad específica
Antiespumante	1,03
Extendedor	1,45
Retardador	1,33
Controlador de Filtrado 1	1,80
Controlador de Filtrado 2	1,80
Grano de Caucho Reciclado	1,15
Cemento	3,18
Agua	0,998

A partir de la obtención de los datos de masa y densidad de cada uno de los aditivos que componen la lechada se procede a realizar el cálculo de los diferentes volúmenes para los aditivos teniendo en cuenta un saco de cemento como se puede observar en el **Cálculo 3**.

Cálculo 3. Determinación de los diferentes volúmenes de los aditivos de la lechada de relleno para la sección de 12 ¼”.

$$V_{Aditivo} = \frac{m_{aditivo} [lb/Sx]}{\rho [ppg]} = V_{[gal/Sx]}$$

$$V_{Ext} = \frac{0,019 \text{ lb/Sx}}{12,079 \text{ ppg}} = 0,0016 \text{ gal/Sx}$$

$$V_{Ret} = \frac{0,038 \text{ lb/Sx}}{11,079 \text{ ppg}} = 0,0034 \text{ gal/Sx}$$

$$V_{CF1} = \frac{0,47 \text{ lb/Sx}}{14,994 \text{ ppg}} = 0,031 \text{ gal/Sx}$$

$$V_{CF2} = \frac{0,752 \text{ lb/Sx}}{14,994 \text{ ppg}} = 0,05 \text{ gal/Sx}$$

$$V_{GCR} = \frac{4,70 \text{ lb/Sx}}{9,580 \text{ ppg}} = 0,491 \text{ gal/Sx}$$

$$V_{Cem} = \frac{94 \text{ lb/Sx}}{26,489 \text{ ppg}} = 3,549 \text{ gal/Sx}$$

Con los datos de masa y volumen de cada uno de los aditivos y del cemento, aplicando la **Ecuación 5** se procederá a realizar el cálculo del requerimiento de agua. Antes de determinar el requerimiento de agua se determina la sumatoria de masa y volumen como se observa en el **Cálculo 4**.

Cálculo 4. Determinación de la sumatoria de masa y volumen.

$$\Sigma m_{Aditivos} [lb/Sx] = m_{Cem} + m_{Ext} + m_{Ret} + m_{CF1} + m_{CF2} + m_{Ret} + m_{GCR}$$

$$\Sigma m_{Aditivos} = 94 \text{ lb/Sx} + 0,019 \text{ lb/Sx} + 0,038 \text{ lb/Sx} + 0,47 \text{ lb/Sx} + 0,752 \text{ lb/Sx} + 4,7 \text{ lb/Sx}$$

$$\Sigma m_{Aditivos} = 99,978 \text{ lb/Sx}$$

$$\Sigma V_{Aditivos} [lb/Sx] = V_{Cem} + V_{Ext} + V_{Ret} + V_{CF1} + V_{CF2} + V_{Ret} + V_{GCR}$$

$$\Sigma V_{Aditivos} = 3,549 \text{ gal/Sx} + 0,0016 \text{ gal/Sx} + 0,0034 \text{ gal/Sx} + 0,031 \text{ gal/Sx} + 0,05 \text{ gal/Sx} + 0,491 \text{ gal/Sx}$$

$$\Sigma V_{Aditivos} = 4,126 \text{ gal/Sx}$$

En el **Cálculo 5** se reemplazan los valores previamente obtenidos y reemplazados en la **Ecuación 4**.

Cálculo 5. Determinación del requerimiento de agua.

$$V_{Agua} = \frac{\Sigma m_{adts} [lb/Sx] - (\rho_{lechada} [ppg] * \Sigma V_{adts} [gal/Sx])}{(\rho_{lechada} - \rho_{agua}) [ppg]} = V_{Agua} [gal/Sx]$$

$$V_{Agua} = \frac{99,978 \text{ lb/Sx} - (15,8_{ppg} * 4,126 \text{ gal/Sx})}{(15,8 - 8,313) [ppg]}$$

$$V_{Agua} = 4,647 \text{ gal/Sx}$$

Una vez obtenido el requerimiento de agua (**Ecuación 4**) se determina el rendimiento del cemento a partir de la **Ecuación 1** como se puede observar en el **Cálculo 6**, dicho rendimiento se puede expresar en ft^3/Sx y posteriormente gal/Sx .

Cálculo 6. Rendimiento del cemento.

$$Rendimiento = \Sigma V_{Aditivos} + V_{Agua} = Rendimiento_{[gal/Sx]}$$

$$Rendimiento = 4,126_{gal/Sx} + 4,647_{gal/Sx}$$

$$Rendimiento = 8,773_{gal/Sx}$$

$$Rendimiento = \frac{8,773_{gal/Sx}}{7,48_{gal/ft^3}}$$

$$Rendimiento = 1,173_{ft^3/Sx}$$

A partir del requerimiento de agua y el rendimiento de cemento para un saco de cemento se puede determinar el requerimiento de agua y rendimiento de cemento para un volumen de lechada diferente, para el caso nuestro va a ser un volumen de 600 mL como se mencionó anteriormente. Con la **Ecuación 13** se puede determinar la masa de la lechada expresada en gramos.

Ecuación 13. Peso de una lechada de cemento.

$$m_{Lechada} = m_{Cem} + m_{Agua} + \Sigma m_{Aditivos(l)} + \Sigma m_{Aditivos(s)}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso de cementación 2017.

Dónde:

- $m_{Lechada}$: Es el peso de la lechada de 600 mL, expresada en gr.
- m_{Cem} : Es el peso del cemento para una lechada de 600 mL, expresado en gr.
- m_{Agua} : Es el peso del agua para una lechada de 600 mL, expresado en gr.
- $\Sigma m_{Aditivos(l)}$: Es la sumatoria del peso de los aditivos líquidos para una lechada de 600 mL, expresado en gr.
- $\Sigma m_{Aditivos(s)}$: Es la sumatoria del peso de los aditivos sólidos para una lechada de 600 mL, expresado en gr.

El cálculo de la masa del cemento en gramos se determina a partir de la **Ecuación 14**.

Ecuación 14. Peso del cemento en una lechada de cemento.

$$m_{Cem} = \frac{V_{muestra} * 0,01601847666}{Rendimiento} * W_{cem}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso de cementación 2017.

Dónde:

- m_{Cem} : Es la cantidad de cemento necesario para preparar el volumen de muestra, expresado en gr.
- $V_{muestra}$: Es el volumen de la muestra a preparar, expresado en mL.
- 0,01601847666: Es el factor de conversión para pasar el volumen de mL a $gr * ft^3 / lb$, esta expresado en $gr * ft^3 / lb * mL$.
- Rendimiento: Es el rendimiento del cemento, expresado en ft^3 / Sx .
- W_{cem} : Es el peso de un saco de cemento, expresado en lb/Sx.

En el **Cálculo 7** se observa cómo se determina la cantidad de cemento en gramos.

Cálculo 7. Determinación de los gramos de cemento necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio.

$$m_{Cem} = \frac{600 \text{ mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr / lb * mL}}{1,173_{ft^3 / Sx}} * 94_{lb / Sx}$$
$$m_{Cem} = 770,291_{gr}$$

El cálculo de la masa de agua en gramos se puede determinar a partir de la **Ecuación 15**.

Ecuación 15. Peso del agua en una lechada de cemento.

$$m_{Agua} = \frac{V_{muestra} * 0,01601847666}{Rendimiento} * V_{Agua} * \rho_{Agua}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso de cementación 2017.

Dónde:

- m_{Agua} : Es la cantidad de agua necesaria para preparar el volumen de muestra, expresado en gr.
- $V_{muestra}$: Es el volumen de la muestra a preparar, expresado en mL.

- 0,01601847666: Es el factor de conversión para pasar el volumen de mL a $gr * ft^3 / lb$, esta expresado en $gr * ft^3 / lb * mL$.
- Rendimiento: Es el rendimiento del cemento, expresado en ft^3 / Sx .
- V_{Agua} : Es el requerimiento de agua para preparar un saco de cemento, expresado en gal/Sx.
- ρ_{Agua} : Es la densidad del agua calculado a nivel de laboratorio, expresado en ppg.

En el **Cálculo 8** se puede observar cómo se determina la cantidad de agua en gramos.

Cálculo 8. Determinación de los gr de agua necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio.

$$m_{Agua} = \frac{600 \text{ mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr / lb * mL}}{1,173_{ft^3 / Sx}} * 4,647_{gal / Sx} * 8,313_{ppg}$$

$$m_{Agua} = 316,595_{gr}$$

El cálculo de la masa de los aditivos líquidos en gramos se determina a partir de la **Ecuación 16**.

Ecuación 16. Peso de los aditivos líquidos en una lechada de cemento.

$$\Sigma m_{Aditivos (l)} = \frac{V_{muestra} * 0,01601847666}{Rendimiento} * Concentración_{Aditivos (l)} * \rho_{Aditivo (l)}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso de cementación 2017.

Dónde:

- $\Sigma m_{Aditivos (l)}$: Es la cantidad de aditivo líquido necesario para preparar el volumen de muestra, expresado en gr.
- $V_{muestra}$: Es el volumen de la muestra a preparar, expresado en mL.
- 0,01601847666: Es el factor de conversión para pasar el volumen de mL a $gr * ft^3 / lb$, esta expresado en $gr * ft^3 / lb * mL$.
- Rendimiento: Es el rendimiento del cemento, expresado en ft^3 / Sx .
- $Concentración_{Aditivos (l)}$: Es la concentración del aditivo líquido, expresado en GPS.
- $\rho_{Aditivo (l)}$: Es la densidad del aditivo líquido, expresado en ppg.

Para el caso nuestro el único aditivo líquido que se tiene en la composición de la lechada es el antiespumante. En el **Cálculo 9** se puede observar cómo se determina la cantidad de antiespumante en gramos.

Cálculo 9. Determinación de los gr de antiespumante necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio.

$$m_{Antiespumante} = \frac{600 \text{ mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr/lb * mL}}{1,173_{ft^3/Sx}} * 0,01_{GPS} * 8,58 \text{ ppG}$$

$$m_{Antiespumante} = 0,703_{gr}$$

El cálculo de la masa de los aditivos sólidos en gramos se puede determinar a partir de la **Ecuación. 17.**

Ecuación 17. Peso de los aditivos sólidos en una lechada de cemento.

$$\Sigma m_{Aditivos (s)} = \frac{V_{muestra} * 0,01601847666}{Rendimiento} * W_{Cem} * \frac{Concentración_{Aditivos (s)}}{100}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso de cementación 2017.

Dónde:

- $\Sigma m_{Aditivos (s)}$: Es la cantidad de aditivo sólido necesario para preparar el volumen de muestra, expresado en gr.
- $V_{muestra}$: Es el volumen de la muestra a preparar, expresado en mL.
- 0,01601847666: Es el factor de conversión para pasar el volumen de mL a $gr * ft^3/lb$, esta expresado en $gr * ft^3/lb * mL$.
- Rendimiento: Es el rendimiento del cemento, expresado en ft^3/Sx .
- W_{Cem} : Es el peso de un saco de cemento, expresado en lb.
- $Concentración_{Aditivos (s)}$: Es la concentración del aditivo sólido, expresado en %BWOC.

En el **Cálculo 10** se observa cómo se determina la cantidad de aditivos sólidos en gramos.

Cálculo 10. Determinación de los gramos de aditivos solidos necesarios para preparar la lechada a nivel de laboratorio.

$$m_{Ext} = \frac{600_{mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr/lb * mL}}{1,173_{ft^3/Sx}} * 94_{lb/sx} * \frac{0,02\%_{BWOC}}{100} = 0,154_{gr}$$

$$m_{Ret} = \frac{600_{mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr/lb * mL}}{1,173_{ft^3/Sx}} * 94_{lb/sx} * \frac{0,04\%_{BWOC}}{100} = 0,308_{gr}$$

$$m_{CF5} = \frac{600_{mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr/lb * mL}}{1,173_{ft^3/Sx}} * 94_{lb/sx} * \frac{0,5\%_{BWOC}}{100} = 3,851_{gr}$$

$$m_{CF6} = \frac{600_{mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr/lb * mL}}{1,173_{ft^3/Sx}} * 94_{lb/sx} * \frac{0,8\%_{BWOC}}{100} = 6,162_{gr}$$

$$m_{GCR} = \frac{600_{mL} * 0,01601847666_{ft^3 * gr/lb * mL}}{1,173_{ft^3/Sx}} * 94_{lb/sx} * \frac{5\%_{BWOC}}{100} = 38,515_{gr}$$

En la **Tabla 9** se observan los gramos necesarios de cada componente que contiene la lechada de 15,86 ppg y un volumen de muestra de 600 mL.

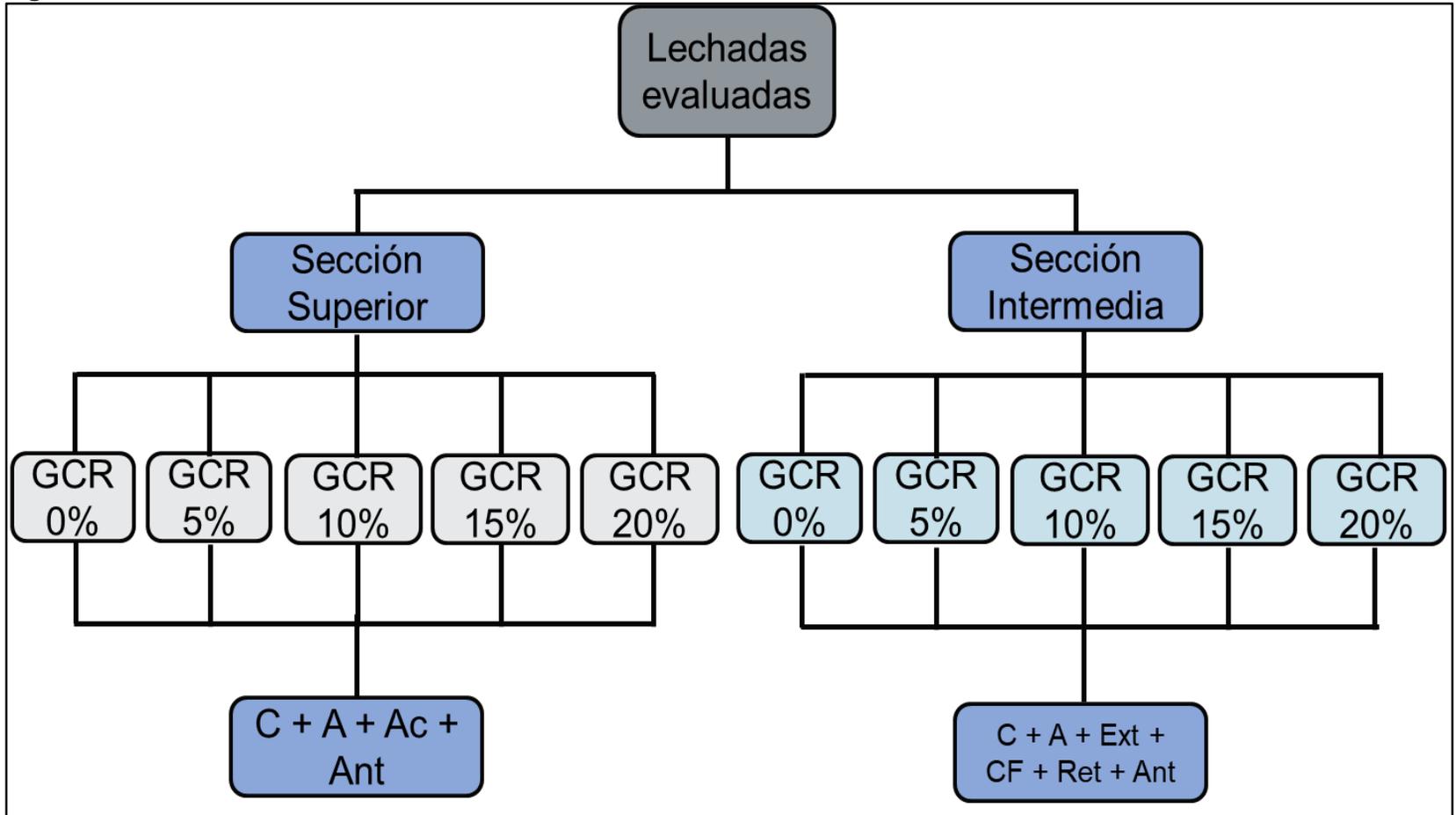
Tabla 9. Gramos de los diferentes componentes de la lechada para la sección de 12 ¼”.

Aditivo	Gramos
Antiespumante	0,703
Extendedor	0,154
Retardante	0,308
Controlador de Filtrado 1	3,851
Controlador de Filtrado 2	6,162
Grano de Caucho Reciclado	38,515
Cemento	770,291
Agua	316,595

4.2 PLAN DE PRUEBAS INICIALES A NIVEL DE LABORATORIO

En esta sección del capítulo se realiza el diseño inicial para lechadas principales de las secciones superficial e intermedia, se realiza el plan de pruebas inicial, se explica de forma breve en que consiste cada una de las pruebas y el procedimiento a seguir en cada una de ellas basados en la norma API 10A y 10B. Como se puede observar en la **Figura 19** se propone el diseño inicial para las lechadas a evaluar en cada una de las secciones del pozo con los diferentes porcentajes de GCR.

Figura 19. Diseño de lechadas iniciales a evaluar.

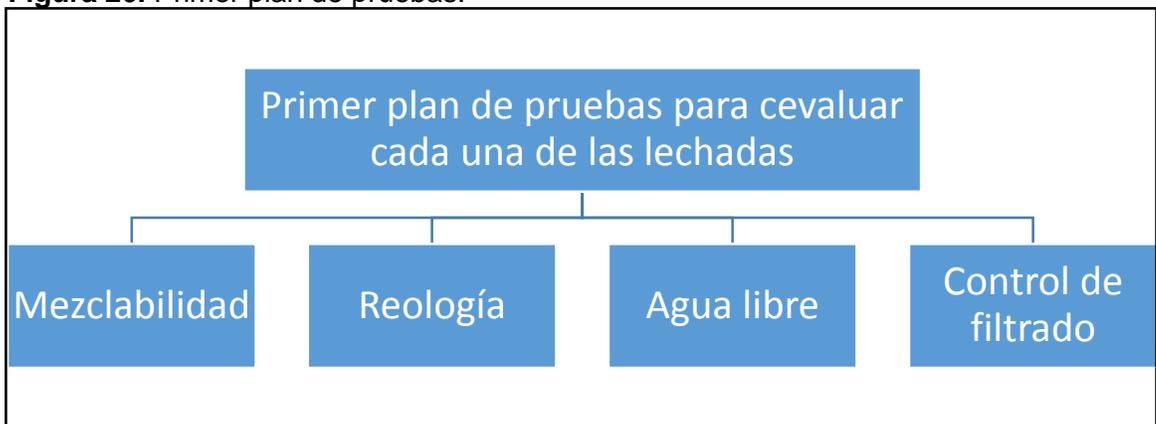


Dónde:

- C: Cemento.
- A: Agua.
- Ac: Acelerante.
- Ant: Antiespumante.
- Ext: Extendedor.
- CF: Controlador de filtrado.
- Ret: Retardador.

El diseño de plan de pruebas iniciales a seguir se puede observar en la **Figura 20**.

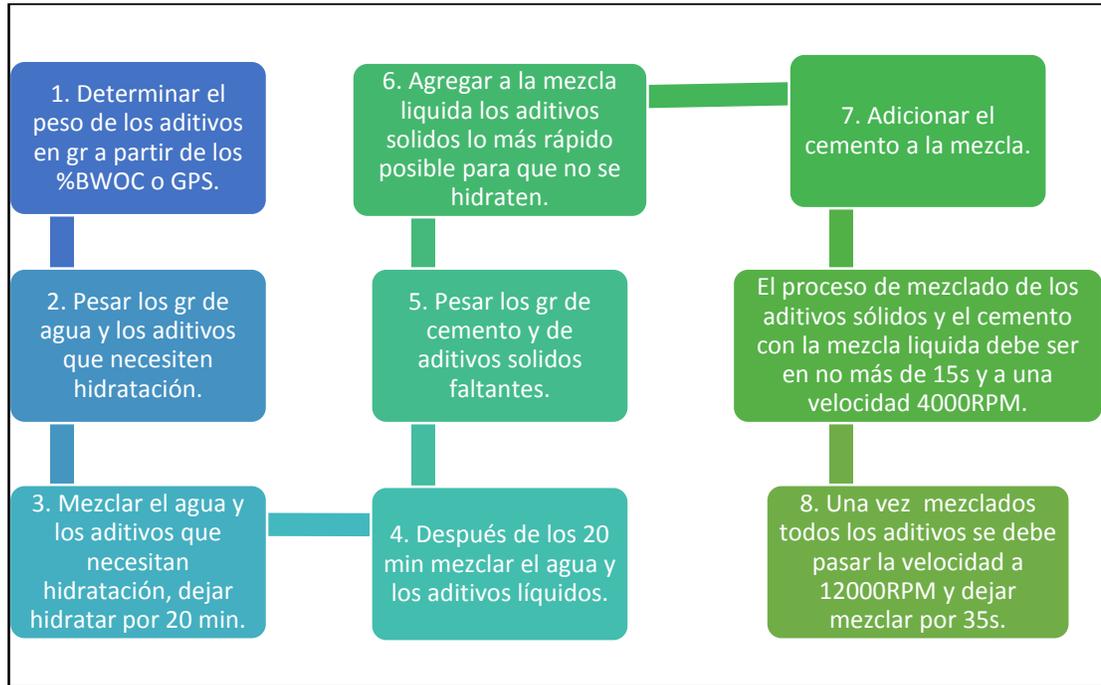
Figura 20. Primer plan de pruebas.



Una vez definido el plan de pruebas a realizar, se explica en que consiste cada una de ellas y su respectivo procedimiento, siguiendo los lineamientos propuestos por la API en la norma API RP 10A y API RP 10B. Partiendo de los resultados obtenidos de las pruebas, se selecciona la lechada PRO para cada una de las secciones, estas lechadas son aquellas que muestran el mejor comportamiento, para cada una de las pruebas realizadas, es decir, estas lechadas cumplen con los requerimientos operacionales para los pozos de Campo Castilla.

4.2.1 Mezclabilidad. La prueba de mezclabilidad consiste en la preparación de una lechada de cemento, con el fin determinar si la lechada una vez mezclada con todos los aditivos que requiere tiene fluidez, esto se puede evidenciar al formarse un vórtice cuando del mezclador (mixer) se encuentre en funcionamiento. Los equipos que se utilizan en esta prueba son: la balanza electrónica y el mezclador. En la **Figura 21** se puede observar de forma breve el procedimiento que se debe usar al momento de preparar una lechada de cemento.

Figura 21. Procedimiento de mezclado de una lechada de cemento según la norma API RP 10B.



En caso de que la lechada contenga microesferas o nitrógeno, no es recomendable realizar el paso #8, en lugar de realizar dicho paso se recomienda seguir a 4000RPM por 5,5 min o 335s. En la **Figura 22** se puede observar un ejemplar del equipo utilizado para mezcla de lechadas de cemento.

Figura 22. Ejemplo de un equipo de mezcla de cemento.

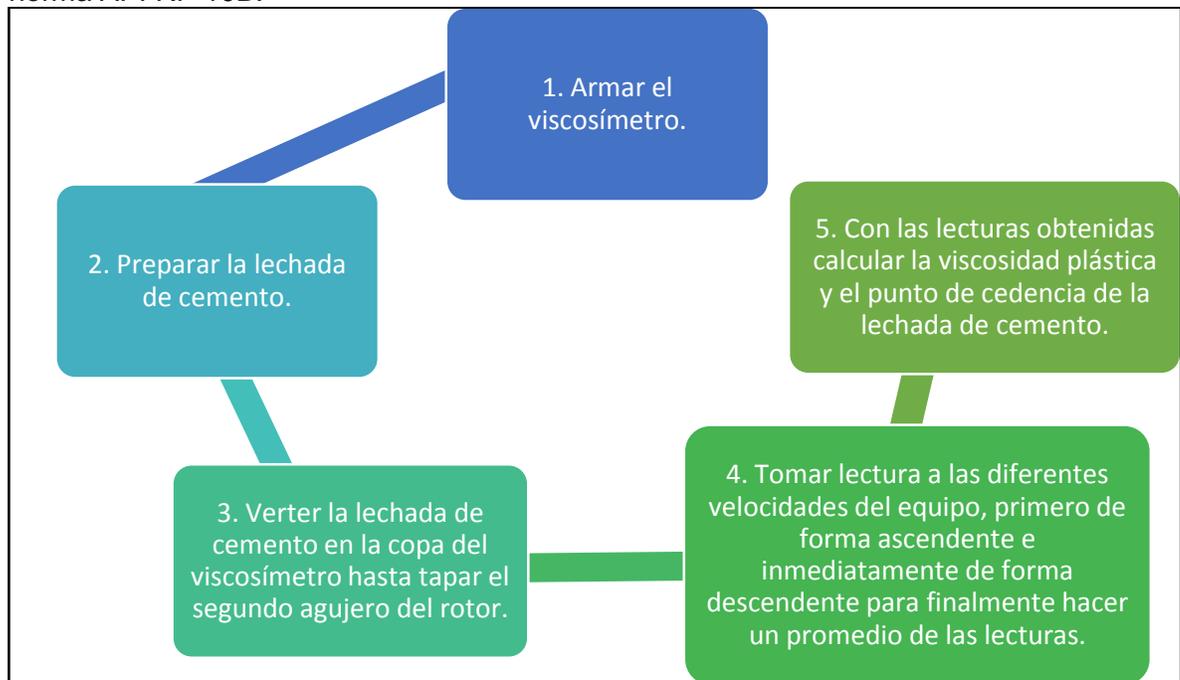


Fuente: CHANDLERENG. Oil Products. Disponible en: <https://www.chandlereng.com/products/oilwellcementing/slurry-preparation/wettability-testers/model-3065>.

4.2.2 Reología. Esta prueba es realizada a las lechadas de cemento para determinar el comportamiento reológico a condiciones de presión atmosféricas y a temperatura circulante o temperatura ambiente, esta prueba lo que pretende es determinar la relación entre la velocidad de flujo (tasa de corte) y los esfuerzos de corte con el fin de establecer la viscosidad de los fluidos. Los datos obtenidos a partir de esta prueba de laboratorio son la viscosidad plástica, el punto de cedencia (yield point) y esfuerzos de geles.

Los lodos de perforación, lechadas de cemento y aceites pesados pueden ser descritos por diferentes modelos reológicos como lo son el modelo de Ley de Potencia, el modelo de Herschel-Bulkley y el modelo de Bingham, siendo este último el más aceptado. Los equipos utilizados son: el viscosímetro rotacional y en el caso de simular la temperatura circulante es necesario un acondicionamiento previo de la lechada para el cual es necesario usar el consistómetro atmosférico. En la **Figura 23** se puede observar de forma breve el procedimiento que se debe usar estando la muestra a presión atmosférica y temperatura ambiente.

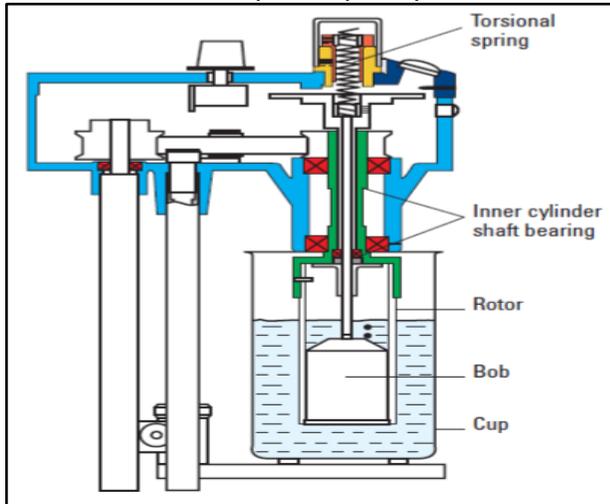
Figura 23. Procedimiento de la prueba de reología a una lechada de cemento según la norma API RP 10B.



El cálculo de la viscosidad plástica y punto cedente se puede realizar mediante la **Ecuación 8** y **9**, siguiendo el modelo reológico de Bingham. Cuando la prueba se debe realizar a condiciones de presión atmosférica y temperatura circulante es necesario un acondicionamiento previo de la lechada, consecutivamente realizar el mismo procedimiento descrito para la muestra de presión atmosférica y

temperatura ambiente. En la **Figura 24** se puede observar un viscosímetro rotacional con sus partes principales.

Figura 24. Ejemplar de un viscosímetro rotacional con sus partes principales.



Fuente: SCHLUMBERGER. Well Cementing. p. 100.

4.2.2.1 Esfuerzos de geles. Esta prueba busca medir el esfuerzo cortante medido a una baja velocidad de corte (3RPM) después de que la lechada ha permanecido en reposo por un periodo de tiempo (a los 10s y a los 10 min), el cálculo de los esfuerzos de geles se realiza una vez terminado el procedimiento de determinación de las propiedades reológicas, se reporta el valor máximo observado.

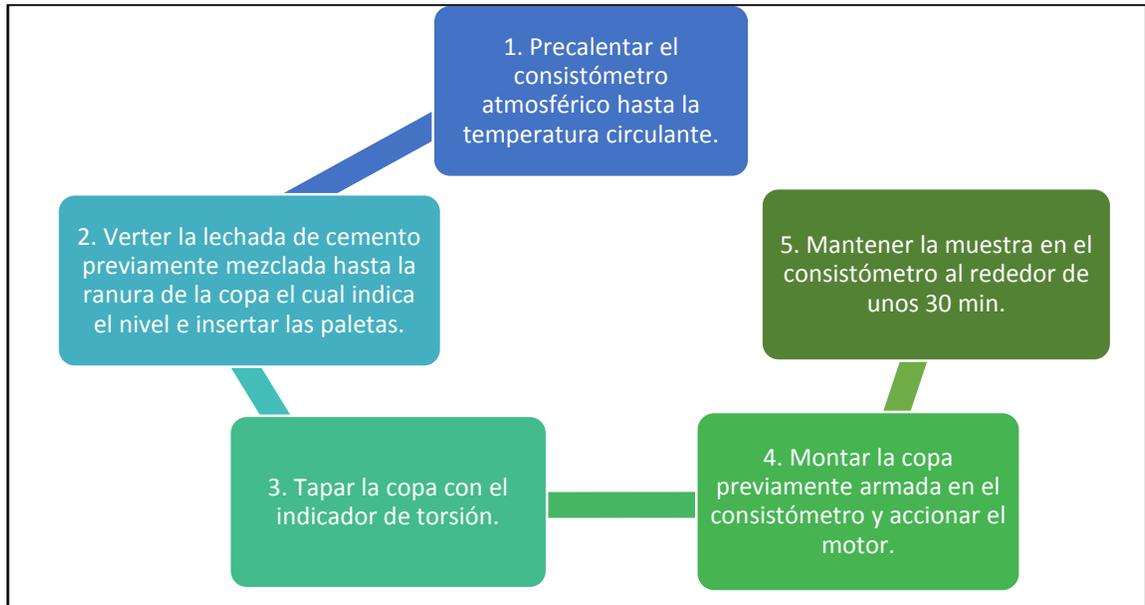
4.2.3 Acondicionamiento de lechadas. Es un procedimiento que se le realizan a ciertas lechadas para posteriormente ser sometidas a otras pruebas que requieran que la muestra este a condiciones de temperatura circulante, esta prueba lo que busca es llevar la lechada a la temperatura circulante y simular el movimiento de esta dentro del pozo agitando la muestra a una velocidad de 150RPM. El equipo utilizado es el consistómetro atmosférico, en la **Figura 25** se puede observar una ejemplar del equipo utilizado. En la **Figura 26** se puede observar de forma breve el procedimiento que se debe realizar al implementar esta prueba.

Figura 25. Ejemplar de un consistómetro atmosférico.



Fuente: CHANDLERENG. Oil Products. Disponible en: <https://www.chandlereng.com/products/oilwellcementing/slurry-preparation/wettability-testers/model-3065>.

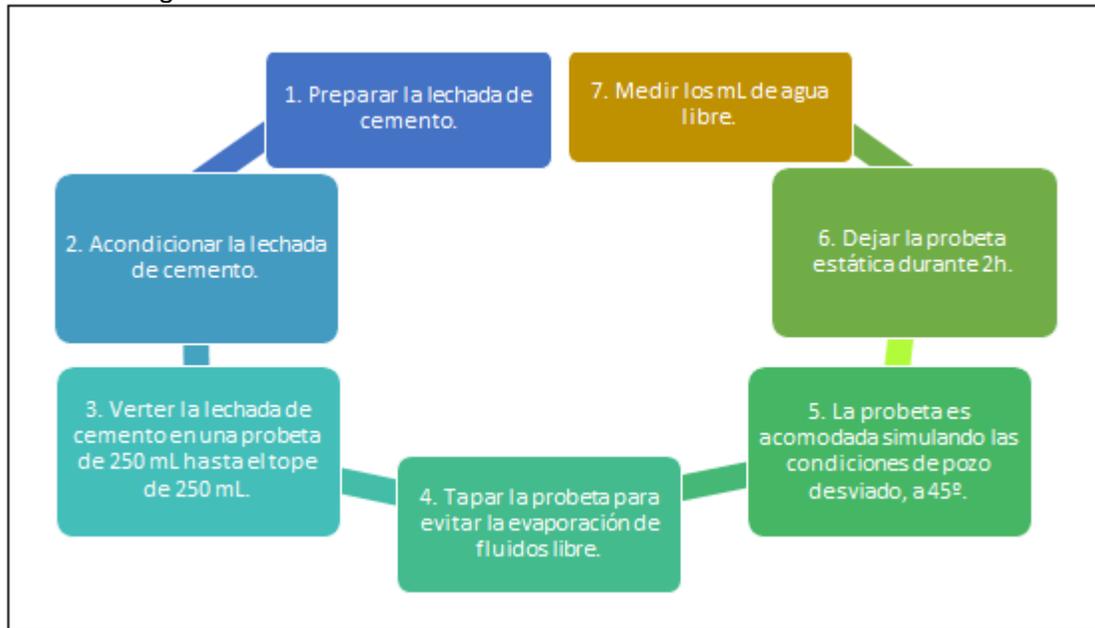
Figura 26. Procedimiento para el acondicionamiento de una lechada de cemento según la norma API RP 10B.



4.2.4 Agua libre. Esta prueba lo que busca medir es la estabilidad estática de una lechada de cemento, es la separación de la fase líquida (agua) cuando se encuentra asentada en el pozo antes de que la lechada de cemento fragüe, durante la prueba se simula un pozo desviado al darle una inclinación a la probeta de 45°. El equipo utilizado es una probeta de 250 mL. En la **Figura 27** se puede

observar de forma breve el procedimiento que se debe realizar al implementar esta prueba.

Figura 27. Procedimiento para la determinación del agua libre en una lechada de cemento según la norma API RP 10B.



4.2.5 Pérdida de filtrado estática. Esta prueba de laboratorio pretende determinar la velocidad con la que se deshidrata una lechada de cemento durante la cementación, cuando la lechada está en contacto con la formación y es sometida a un diferencial de presión de 1000 psi. En la prueba el contacto con una formación permeable es simulado con una malla de 325 permite el paso de partículas con un tamaño menor a $45\mu\text{m}$, esta se ubica hacia la parte interna de la celda y es la que está en contacto con el fluido, la malla 60 permite el paso de partículas con un tamaño menor a $250\mu\text{m}$, al momento de armar la celda antes de poner a precalentar se recomienda verificar que esté cerrada la válvula que se encuentra en la parte inferior, el diferencial de presión al que es sometida la lechada es ejercido al suministrar nitrógeno en la parte superior de la celda.

Los equipos utilizados son el consistómetro atmosférico, filtro-prensa HPHT, cilindro de nitrógeno comprimido y una probeta de 25mL, en la **Figura 28** se puede observar un ejemplar del filtro-prensa utilizada para esta prueba. En la **Figura 29** se puede observar de forma breve el procedimiento que se debe realizar al implementar esta prueba.

Figura 28. Ejemplar de una filtroprensa HPHT estática.



Fuente: Disponible en: <http://www.directindustry.es/prod/rigchina-group-company/product-39431-1594254.html>.

Figura 29. Procedimiento para la determinación de la pérdida de filtrado estática en una lechada de cemento según la norma API RP 10B.



Según la norma API RP 10B el resultado de esta prueba se expresa en mililitros cada 30min, si la lechada no se deshidrata se reporta a partir de la **Ecuación 18**.

Ecuación 18. Determinación del valor de filtrado API.

$$API_{\text{pérdida de Filtrado}} = 2 \times V_{30\text{min}}$$

Fuente: API. Norma API RP 10B. 2013. p. 57.

Dónde:

- $V_{30\text{min}}$: Es el volumen de filtrado obtenido durante 30min, se expresa en mL.

En caso de que la lechada se deshidrate en menos de los 30min, lo cual se puede evidenciar al empezar a salir nitrógeno por la parte inferior de la celda. El cálculo de la pérdida de filtrado para este caso se realiza a partir la **Ecuación 19**.

Ecuación 19. Determinación del valor de filtrado API para deshidratación en un lapso menor a 30 minutos.

$$API_{\text{pérdida de Filtrado}} = 2V_t \times \sqrt{\frac{30}{t}}$$

Fuente: API. Norma API RP 10B. 2013. p. 57.

Dónde:

- V_t : Es el volumen de filtrado obtenido antes de los 30min, se expresa en mL.
- t: Es el lapso de tiempo que duro en deshidratarse la lechada, se expresa en min.

4.3 RESULTADOS PRUEBAS INICIALES Y ANÁLISIS

Como se mencionó anteriormente el porcentaje de GCR para las dos secciones se planteó inicialmente con una variación de 5% llegando hasta el 20%. A continuación, se hablará de los resultados y las conclusiones a las que se llegaron al analizar los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las diferentes lechadas.

4.3.1 Sección de 17 ½" CSG 13 3/8". Antes de dar inicio a los resultados obtenidos a las lechadas de esta sección es necesario aclarar que a estas lechadas no se les evaluó la pérdida de filtrado debido a que las composiciones de estas lechadas no tienen en su composición controladores de filtrado. En el **Cuadro 5** se observan los resultados de mezclabilidad, reología y agua libre que se le realizaron a las 5 lechadas.

Cuadro 5. Resultados de las pruebas iniciales realizadas a la sección de superficie de 17 ½" con una densidad de 15,6 ppg.

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"																
Lechada de 15.6 ppg (Agua + Cemento + Acelerante [0.7%BWOC] + Antiespumante)																
# Lechada	% GCR	Mezclabilidad	Reología											Agua Libre		
			Temp. [°F]	3 RPM	6 RPM	30 RPM	60 RPM	100 RPM	200 RPM	300 RPM	Estado	Vp [cP]	[Lbf/100ft ²]	Esfuerzos de geles		Vff [mL]
												Bingham		10 s	10 min	
1	0	SI	85	12	16	33	40	46	51	64	A	27,75	36,25	12	17	1
				13	18	36	42	45	56	64	D					
				12,5	17	34,5	41	45,5	53,5	64	Prom					
2	5	SI	85	17	22	52	65	76	97	117	A	59,25	57,75	19	30	0
				17	23	56	69	79	99	117	D					
				17	22,5	54	67	77,5	98	117	Prom					
3	10	SI	85	9	9	77	115	139	240	281	A	199,5	81,5	0	0	0
				27	36	80	116	157	225	281	D					
				18	22,5	78,5	115,5	148	232,5	281	Prom					
4	15	NO	85								A	0	0	0	0	0
											D					
				0	0	0	0	0	0	0	Prom					
5	20	NO	85								A	0	0	0	0	0
											D					
				0	0	0	0	0	0	0	Prom					

En la **Tabla 10** se observan los requerimientos operacionales necesarios para esta sección.

Tabla 10. Requerimientos operacionales para la sección de 17 1/2" CSG 13 3/8".

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"	
Tiempo bombeabilidad	(2,5 - 3,5) h
Resistencia a la compresión @24h	> 2000 psi
Viscosidad Plástica	(39 - 60) cp
Punto Cedente	(35 - 60)lbf/100ft2

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. 2017.

La prueba de mezclabilidad fue uno de los criterios principales para la selección de la lechada a escoger como la lechada PRO, a partir de esta prueba se dedujo que las lechadas con 15% y 20% de GCR no eran mezclables, debido a que la adición del contenido sólido para estas lechadas superaba los 15 segundos, este es el tiempo establecido por la norma API 10A, donde se especifica el tiempo en el cual se deben agregar los materiales solidos al momento de realizar la mezcla de la lechada.

En la **Figura 30** se puede observar la apariencia de la lechada con 10% BWOC de GCR, que al momento de preparar dicha la lechada en el equipo presentaba dificultad al mezclar y la temperatura del equipo se vio incrementada.

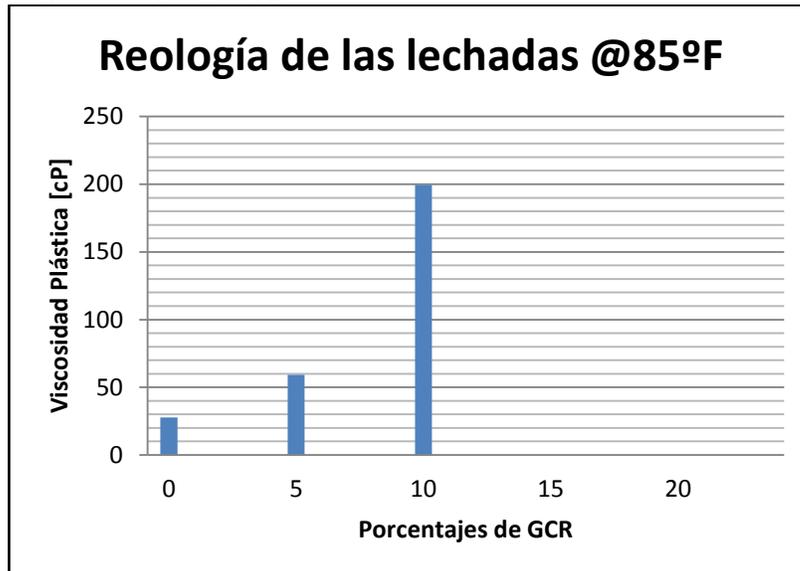
Figura 30. Mezcla de lechada con 10% BWOC de GCR.



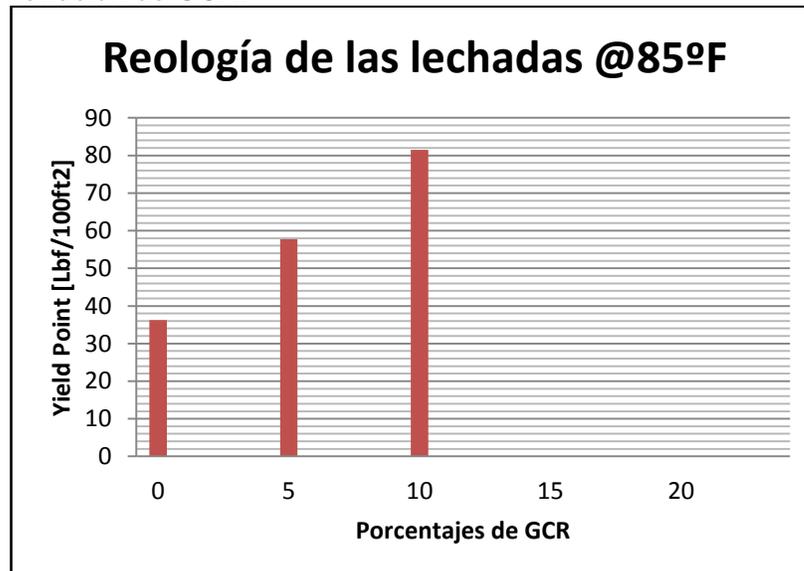
Por otra parte, durante la prueba de reología realizada a este mismo porcentaje de GCR la lechada presento una alta gelificación provocando datos inconsistentes al momento de tomar la lectura a los 300RPM. En la **Gráfica 1** y **2** se puede

observar de forma más clara como la presencia del GCR aumenta las propiedades reológicas como la viscosidad plástica y punto cedente respectivamente, debido al aumento de las partículas sólidas suspendidas en la lechada de cemento.

Gráfica 1. Comportamiento de la viscosidad plástica frente a la variación de GCR.



Gráfica 2. Comportamiento del punto cedente frente a la variación de GCR.



La prueba de agua libre realizada a las lechadas con 5% y 10% de GCR tuvieron como resultado de agua libre del 0mL lo que indica que las lechadas no sufren separación de la fase líquida. De los resultados obtenidos anteriormente se

plantea que el GCR aumenta la viscosidad de la lechada y el punto cedente, de igual forma se evidencia mediante la prueba de agua libre que el material disminuye la separación de agua libre.

A partir de los resultados se determinó que la lechada con 5% de GCR cumple con los criterios de viscosidad plástica y punto cedente observado en la **Tabla 10** requeridos por la empresa Superior Energy Services, así mismo se descartó la lechada con 10% de GCR al no cumplir con dichos criterios. Debido a esto se selecciona la lechada con 5% de GCR como la lechada PRO para esta sección a la cual se le va a realizar el segundo plan de pruebas, que se explican posteriormente.

Una de las conclusiones a la que se llegó con los resultados mencionados anteriormente fue la necesidad de hacer un cambio al porcentaje de variación del GCR para las pruebas que se le iban a realizar a las lechadas de la sección de 12 ¼". La determinación del porcentaje límite de mezclabilidad de las lechadas con GCR se realizó a partir de ensayo y error, dando como resultado que el porcentaje límite de mezclabilidad era del 8% de GCR, de esta forma se estableció cambiar los porcentajes de GCR a las lechadas de dicha sección dando como punto de inicio 0% de GCR con una variación de 1% hasta el 7% de GCR. Otra de las conclusiones a la que se llegó con los resultados de las pruebas fue que el GCR podría tener cualidades de un aditivo extendedor, para ello se resolvió eliminar el extendedor usado para las lechadas de la sección de 12 ¼", esta hipótesis será resuelta una vez se realice la prueba de sedimentación a la lechada PRO de la sección intermedia de 12 ¼".

4.3.2 Sección de 12 ¼" CSG 9 5/8". En la **Tabla 11** se observan los requerimientos a cumplir para dicha sección.

Tabla 11. Requerimientos operacionales para la sección de 12 ¼" CSG 9 5/8".

SECCIÓN DE 12 ¼" CSG 9 5/8"	
Tiempo bombeabilidad	(5 - 6) h
Resistencia a la compresión @24h	3000 psi
Viscosidad Plástica	(210 - 250) cp
Punto Cedente	(20 - 40) lbf/100ft ²

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. 2017.

Los resultados de las pruebas de mezclabilidad, reología, agua libre y filtrado que se le realizaron a las 8 lechadas se pueden observar en el **Cuadro 6**, con el cambio de los porcentajes de GCR propuesto anteriormente, las lechadas se pudieron mezclar correctamente, el resultado de la prueba de agua libre para todas las lechadas fue de 0 mL lo que indica que la fase líquida no se separó.

Cuadro 6. Resultados de las pruebas iniciales realizadas a la sección de superficie de 12 ¼" con una densidad de 15,8 ppg.

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"																			
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF5 [0,5%BWOC]+CF6 [0,8%BWOC] + Ret [0,04%BWOC] + Ext [0,02%BWOC])																			
# Lechada	% GCR	Mezclabilidad	Reología										Agua Libre		Filtrado				
			Temp. [°F]	3 RPM	6 RPM	30 RPM	60 RPM	100 RPM	200 RPM	300 RPM	Estado	Vp [cP]	Yp [Lbf/100ft ²]	Esfuerzos de geles [Lbsf/100ft ²]		Vff [mL]	V [mL]	t [min]	API
														10 s	10 min				
1	0	SI	85	16	21	57	65	105	189	254	A	220,5	33,5	14	35	0	38,5	30	77
				14	18	47	72	109	190	254	D								
				15	19,5	52	68,5	107	189,5	254	Prom								
			124	14	21	50	79	115	194	264	A	224,25	39,75	17	38				
				15	19	49	80	114	196	264	D								
				14,5	20	49,5	79,5	114,5	195	264	Prom								
2	1	SI	85	6	9	31	54	90	154	218	A	195	23	6	12	0	13	30	26
				5	9	29	52	86	153	218	D								
				5,5	9	30	53	88	153,5	218	Prom								
			124	4	6	24	41	64	129	177	A	168	9	4	6				
				3	5	22	42	66	124	177	D								
				3,5	5,5	23	41,5	65	126,5	177	Prom								
3	2	SI	85	6	10	37	68	100	184	274	A	255,75	18,25	6	14	0	12,5	30	25
				5	8	35	67	107	196	274	D								
				5,5	9	36	67,5	103,5	190	274	Prom								
			124	6	10	35	63	96	184	262	A	245,25	16,75	5	14				
				5	8	34	64	101	186	262	D								
				5,5	9	34,5	63,5	98,5	185	262	Prom								
4	3	SI	85	6	11	49	88	135	244	300	A	246	54	6	13	0	12	30	24
				5	9	44	85	137	252	300	D								
				5,5	10	46,5	86,5	136	248	300	Prom								
			124	9	15	49	84	127	250	300	A	258	42	5	12				
				5	9	44	82	129	252	300	D								
				7	12	46,5	83	128	251	300	Prom								

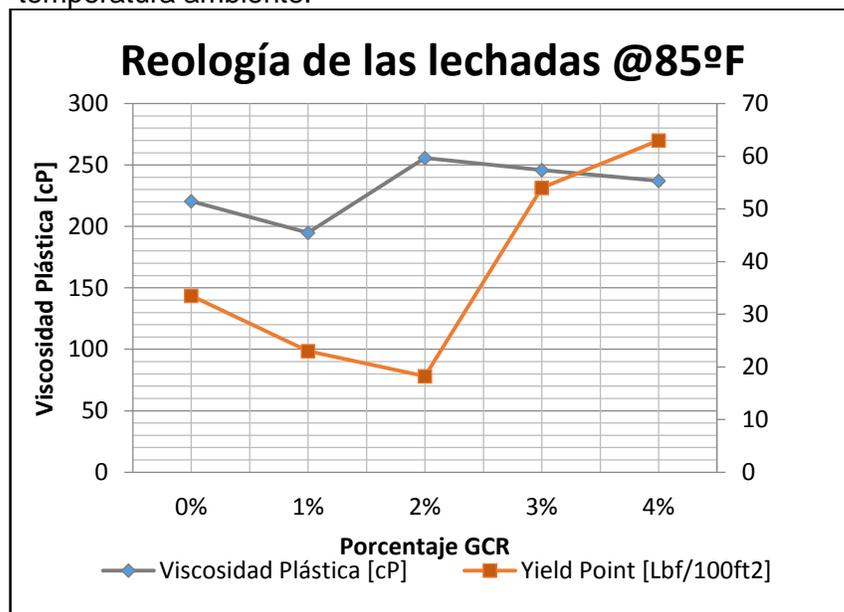
Cuadro 6. (Continuación)

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"																			
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF5 [0,5%BWOC] + CF6 [0,8%BWOC] + Ret [0,04%BWOC] + Ext [0,02%BWOC])																			
# Lechada	% GCR	Mezclabilidad	Reología											Agua Libre		Filtrado			
			Temp. [°F]	3 RPM	6 RPM	30 RPM	60 RPM	100 RPM	200 RPM	300 RPM	Estado	Vp [cP]	Yp [Lbf/100ft ²]	Esfuerzos de geles [Lbsf/100ft ²]		Vff [mL]	V [mL]	t [min]	API
												Bingham		10 s	10 min				
5	4	SI	85	4	8	47	85	133	274	300	A	237	63	5	13	0	11,5	30	23
				4	9	48	91	151	278	300	D								
				4	8,5	47,5	88	142	276	300	Prom								
			124	8	15	54	90	132	277	300	A	235,5	64,5	8	23				
				6	12	52	97	154	280	300	D								
				7	13,5	53	93,5	143	278,5	300	Prom								
6	5	SI	85	7	15	61	113	174	300	A	0	0	7	18	0	11,3	30	22,6	
				7	12	56	107	172	300	D									
				7	13,5	58,5	110	173	300	0									Prom
			124	13	22	75	119	181	300	A	0	0	11	32					
				11	18	61	109	170	300	D									
				12	20	68	114	175,5	300	0									Prom
7	6	SI	85	10	17	70	126	195	300	A	0	0	12	47	0	10,5	30	21	
				11	20	71	125	192	300	D									
				10,5	18,5	70,5	125,5	193,5	300	0									Prom
			124	30	46	112	173	255	300	A	0	0	34	87					
				31	41	110	175	253	300	D									
				30,5	43,5	111	174	254	300	0									Prom
8	7	SI	85	26	41	119	195	275	300	A	0	0	30	87	0	10	30	20	
				28	36	105	178	268	300	D									
				27	38,5	112	186,5	271,5	300	0									Prom
			124	54	66	156	221	300	A	0	0	49	118						
				48	58	155	234	300	D										
				51	62	155,5	227,5	300	0					0					Prom

Las pruebas de reología y filtrado fueron de gran peso para la selección de la lechada PRO, al implementar 1% BWOC de GCR en la lechada convencional mejora el control de filtrado un 33,8%. De los resultados obtenido se puede concluir que al variar en 1% BWOC el GCR en la lechada se favorece el controlar el filtrado, en promedio al incrementar 1% de GCR se reduce 1mL en 30min, de lo anterior se dedujo que el volumen de filtrado no varía significativamente con respecto a la variación de porcentaje de GCR adicionado.

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas de reología son esenciales al momento de seleccionar la lechada PRO, al tomar las lecturas de los valores a 300RPM a partir de la lechada con 3% BWOC de GCR en adelante presentaron inconvenientes. El equipo al momento de tomar las lecturas a 300RPM trataba de arrojar valores de esfuerzo de corte mayor a 300 generando de esta forma lecturas incongruentes, por esta razón las lecturas reportadas a 300RPM fueron de 300 la cual es la máxima lectura del equipo. A causa de ello los valores de viscosidad plástica empiezan a decrecer como se puede apreciar en la **Gráfica 3** y **4**.

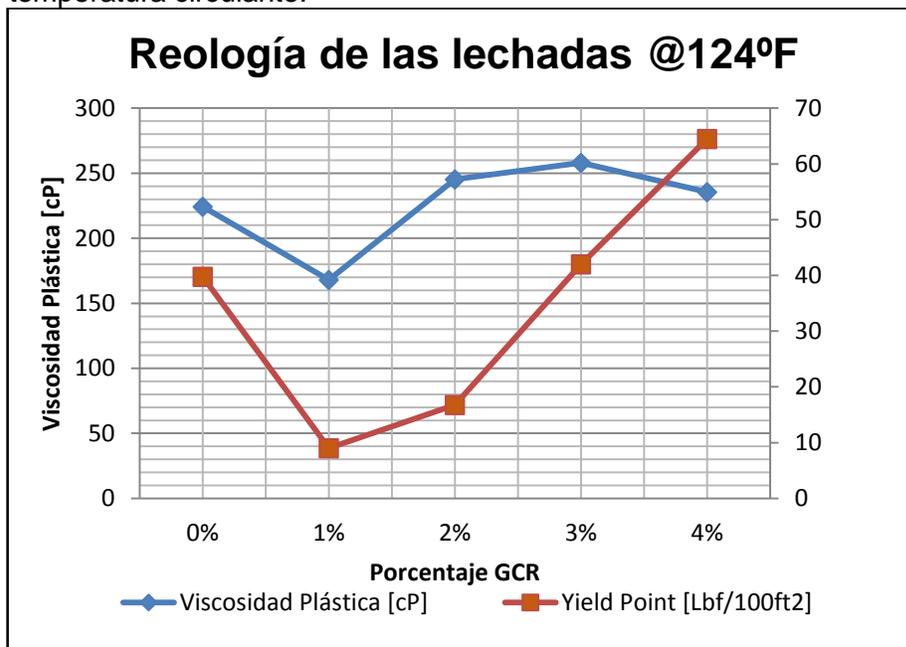
Gráfica 3. Comportamiento reológico de las lechadas con GCR a temperatura ambiente.



Como consecuencia a este hecho es posible afirmar que al intentar bombear una lechada con dicha viscosidad puede llegar a presentar problemas, es por este motivo que las lechadas a partir del 3% de GCR en adelante son descartadas. Se puede evidenciar en la **Gráfica 3** y **4** se evidencia el comportamiento de la reología de las lechadas a temperatura ambiente (85°F) ya temperatura circulante (124°F).

Entre las dos posibles lechadas a escoger se encuentran aquellas que poseen una concentración del 1% y 2% de GCR, las cuales tienen un control de filtrado similar, pero con respecto a la viscosidades plásticas estas dos presenten valores muy diferentes, la lechada de 1% de GCR evaluada con respecto a la lechada convencional (sin GCR) tiene una reducción de la viscosidad plástica y del punto cedente en un 25% y un 77% respectivamente, ya que los valores presentados se encontraban fuera del rango de criterio requeridos por la empresa (**Tabla 16**).

Gráfica 4. Comportamiento reológico de las lechadas con GCR a temperatura circulante.



Por el contrario, la lechada con 2% de GCR tiene un incremento en la viscosidad plástica de un 9,3% con respecto a la convencional, cumpliendo con los requerimientos impuestos por la empresa (**Tabla 11**), al mismo tiempo se presenta una reducción del valor del punto cedente del 57% de la lechada con 2% BWOC de GCR frente a la lechada convencional, sin embargo el valor presentado en la evaluación se ajusta a los criterios impuestos por la empresa (**Tabla 11**). Por lo anterior se descartó la lechada con 1% de GCR y se seleccionó la lechada de 2% de GCR como la lechada PRO para esta sección a la cual se le realizó el segundo tren de pruebas.

5. PRUEBAS REALIZADAS A LAS LECHADAS SELECCIONADAS (PRO)

El presente capítulo tiene por propósito la descripción del plan de pruebas realizadas a la lechada de cemento que ha sido seleccionada en el capítulo anterior, gracias a que esta cumple con los criterios de selección de las pruebas de laboratorio propuestas en la sección anterior. Posterior a la selección de estas lechadas sus propiedades son evaluadas frente a las pruebas de Ensayo destructivo, Ensayo no destructivo, Tiempo de bombeabilidad, Análisis de propiedades mecánicas. Sin embargo, antes de la descripción de los resultados obtenidos de las pruebas es necesario explicar cada prueba y los datos que son evaluados por cada una.

5.1 SEGUNDO PLAN DE PRUEBAS Y PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO

Este numeral pretende dar claridad al segundo plan de pruebas que se realiza a las lechadas PRO previamente seleccionadas como se puede observar en la **Figura 31** y a su vez dar una explicación teórica de las propiedades evaluadas durante la aplicación de las pruebas y el procedimiento standard propuesto por la norma API para la obtención de datos verídicos y concluyentes.

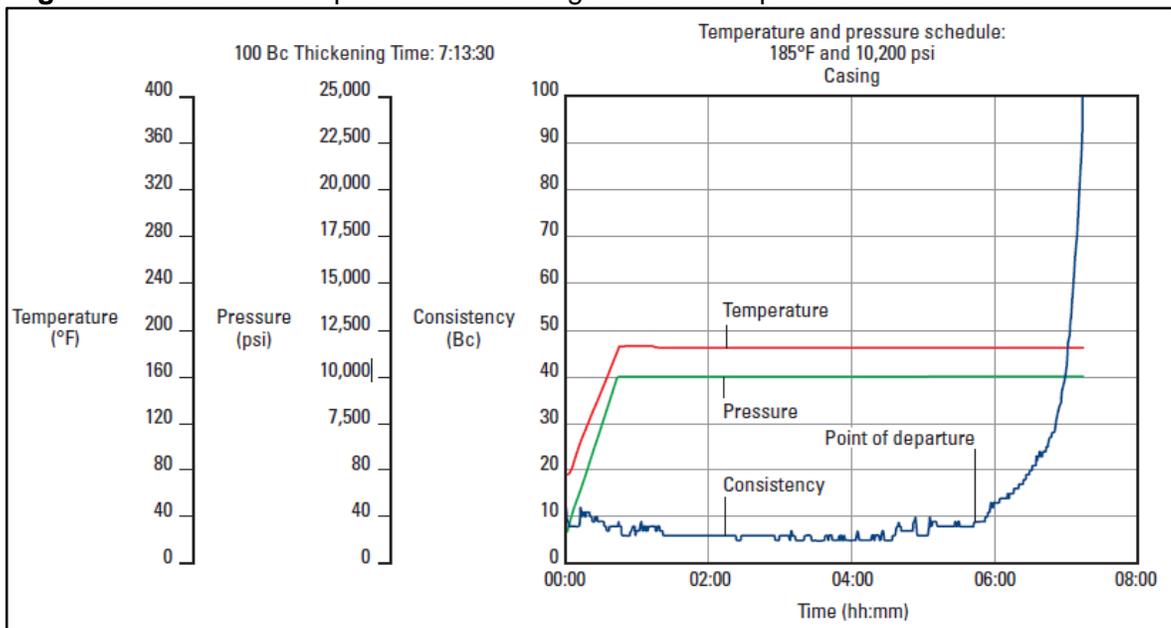
Figura 31. Esquema del segundo plan de pruebas.



5.1.1 Tiempo de bombeabilidad. El tiempo de bombeabilidad se refiere al espacio de tiempo en el cual la lechada de cemento se mantiene en un estado fluido y bombeable en condiciones de fondo de presión y temperatura, el procedimiento según la norma API 10B para determinar el tiempo de bombeabilidad de una lechada es a través del uso de un consistómetro presurizado, el cual se encarga de medir la consistencia de la lechada dispuesta dentro una copa rotatoria a condiciones de fondo. La consistencia de la lechada es medida en unidades Bearden (Bc), esta es una medida adimensional que no posee un factor de conversión a unidades comunes (SI o sistema inglés). El valor máximo deseado de esta prueba son 100 Bc, el cual demuestra la consistencia deseada de lechada, sin embargo, la prueba es realizada hasta que la lechada llega a un valor de 70 Bc ya que hasta este punto la lechada se encuentra en una

fase bombeable, este es el punto máximo de bombeabilidad de la lechada. Normalmente los perfiles de esta prueba muestran cómo se puede evidenciar en la **Figura 32** con un comportamiento nulo al inicio de la prueba, donde se refleja una baja consistencia la cual se mantiene por algunas horas y posterior a este periodo a medida que la lechada se asienta la consistencia de la misma comienza a aumentar y se ve reflejado en la pendiente de la gráfica que la describe con un comportamiento exponencial hasta que llega a 100 Bc. El valor de esta prueba puede diferir ya que no tiene en cuenta la pérdida de fluido y las condiciones a las que se encuentra la lechada en el pozo como lo son la temperatura de circulación y la presión de fondo.

Figura 32. Perfil de Comportamiento de la gráfica de tiempo de bombeabilidad.



Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. 2017.

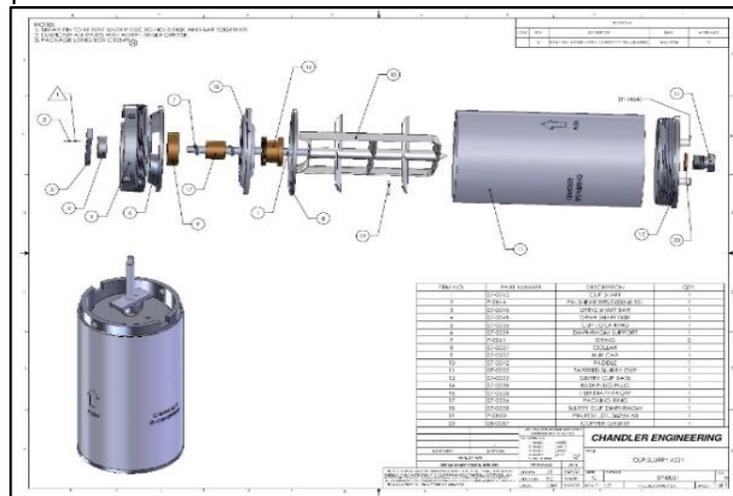
El equipo utilizado en prueba de tiempo de bombeabilidad es un consistómetro presurizado (**Figura 33**) con su respectiva celda (**Figura 34**).

Figura 33. Ilustración de consistómetro presurizado.



Fuente: CHANDLERENG. Oil Products. Disponible en: <https://www.chandlereng.com/products/oilwellcementing/slurry-preparation/wettability-testers/model-3065>.

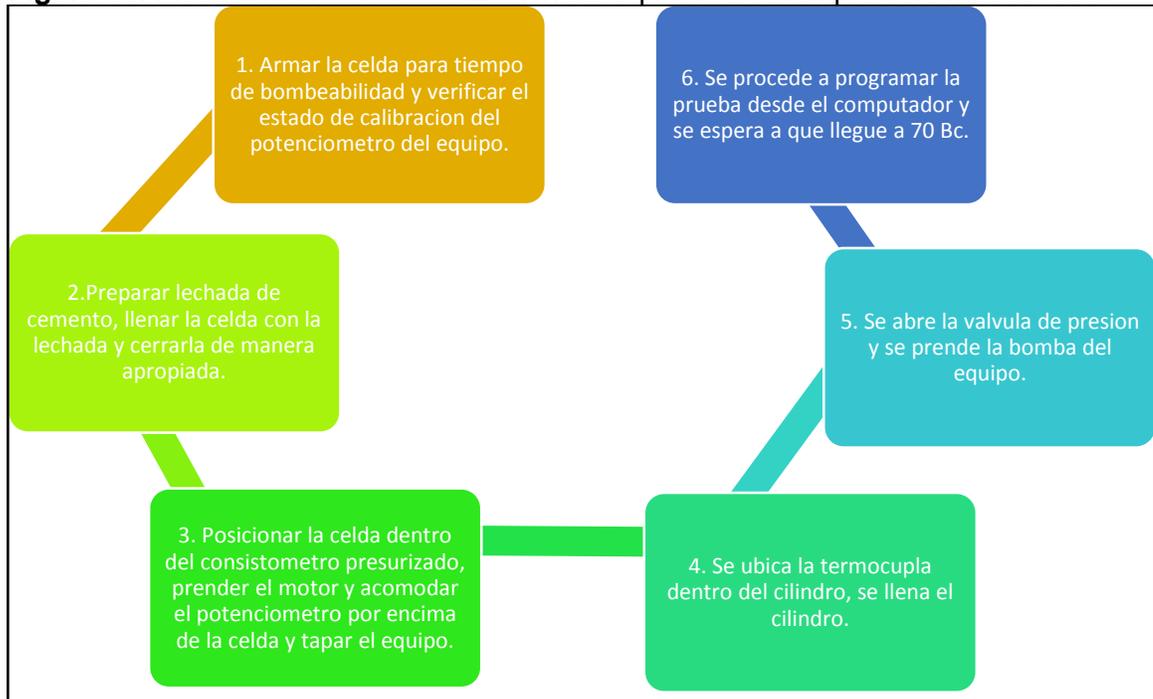
Figura 34. Plano de la celda del consistómetro presurizado.



Fuente "Instruction Manual PRESSURIZED CONSISTOMETER MODEL 7322" AMETEK-CHANDLER

Como se puede observar en la **Figura 35** se describe el procedimiento para realizar la prueba de tiempo de bombeabilidad, siguiendo los lineamientos propuestos por la norma API RP 10B.

Figura 35. Procedimiento de la realización de la prueba de tiempo de bombeabilidad.



5.1.2 Ensayo destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión de una lechada de cemento. El propósito de esta prueba busca determinar la resistencia a la compresión desarrollada por una lechada de cemento, la cual ha pasado por un proceso de curado previo a esta prueba para acondicionar los moldes de cemento a las condiciones de presión y temperatura presentes en el fondo del pozo. El tamaño y forma de las muestras sometidas a esta prueba, son cubos de 2 pulgadas, los cuales pasan por diferentes periodos de tiempo a temperaturas y presiones específicas. Una vez el periodo de curado ha terminado, los cubos de cemento son removidos de sus respectivos moldes y ubicados en una prensa hidráulica, en ella se ejerce presión uniaxial sobre la muestra hasta que esta colapse, en este punto se calcula el esfuerzo compresivo dividiendo la presión a la cual ocurre el colapso por el área de la muestra.

La resistencia de la lechada a la compresión se calcula mediante la **Ecuación 20**.

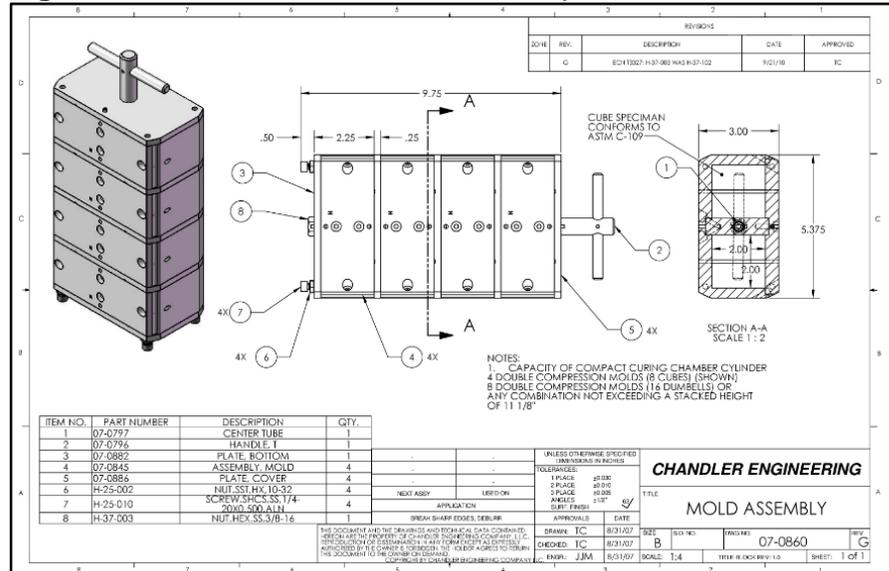
Ecuación 20. Determinación de la resistencia a la compresión.

$$\text{Resistencia a la compresión [Psi]} = \frac{\text{Fuerza [lb}_f\text{]}}{\text{Área [in}^2\text{]}}$$

Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. Curso de cementación. 2017.

Para la realización de la prueba se requiere utilizar: Moldes de curado (**Figura 36**), Cámara de curado (**Figura 37**) y Prensa Hidráulica (**Figura 38**).

Figura 36. Plano de Celda de moldes 2x2 para la cámara de curado.



Fuente: CHANDLER "Instruction Manual Prezurized Curing Chamber Model 7350, 7370 & 7375" AMETEK-

Figura 37. Equipo de cámara de curado.



Fuente: CHANDLERENG. Oil Products. Disponible en: <https://www.chandlereng.com/products/oilwell-cementing/slurry-preparation/wettability-testers/model-3065>.

Figura 38. Equipo de prensa hidráulica.



Fuente: CHANDLERENG. Products. Disponible en: www.chandlereng.com/products/oilwellcementing.

En la **Figura 39** se enuncia el procedimiento a seguir para la realización de la ensayo destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión basado en la norma API RP 10B.

Figura 39. Procedimiento de la realización de ensayo destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión.



5.1.3 Ensayo no-destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión de una lechada de cemento. La dureza del cemento puede ser estimada de manera indirecta a través del uso de ondas del ultrasonido, haciendo uso del “Twin Ultrasonic Cement Analyzer” (**Figura 40**) o del equipo de “Static Gel Strength Analyzer” (**Figura 41**), el cual mide el tiempo de tránsito de una onda ultrasónica a través de una muestra de cemento la cual se cura al mismo tiempo a condiciones de presión y temperatura, posterior a que el equipo toma dicha medida a través de sus sensores, un algoritmo programado en el procesador del equipo determina el valor de la resistencia de la muestra, el registro o medida de la dureza de la lechada se realiza de manera continua, a medida que la muestra fragua a alta presión y temperatura. Esta prueba determina la resistencia a la compresión de una lechada frente a un esfuerzo uniaxial sin necesidad de ejercer presión sobre la muestra.

Para la realización de la prueba es necesario hacer uso del equipo “Ultrasonic Cement Analyzer (UCA)” SGAS o el equipo “Twin Ultrasonic Cement Analyzer”. La diferencia entre estos equipos es que el equipo “SGSA” mide un parámetro más que el UCA TWIN, el cual es la resistencia de gel.

Figura 40. Equipo UCA TWIN
“*Ultrasonic Cement Analyzer*”.



Fuente: CHANDLERENG. Products.
Disponibile en: www.chandlereng.com/products/oilwellcementing.

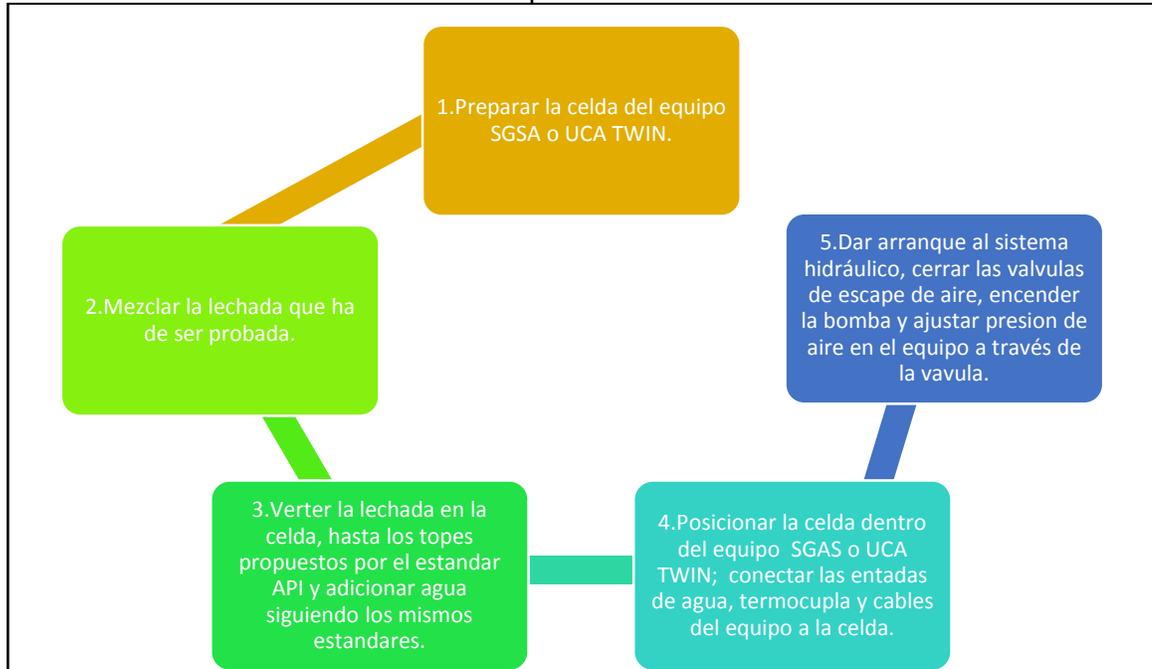
Figura 41. Equipo SGSA “*Static Gel Strength Analyzer*”.



Fuente: CHANDLERENG. Products. Disponible en: www.chandlereng.com/products/oilwellcementing.

En la **Figura 42** se pueden observar el procedimiento a seguir para la realización de las pruebas basado en las norma API RP 10B.

Figura 42. Procedimiento de la realización de ensayo no destructivo para la determinación de la resistencia a la compresión.



5.1.4 Determinación de las propiedades mecánicas de la lechada de cemento. Esta prueba determina o mide las propiedades elásticas de la lechada de cemento, mediante el equipo “*Mechanical Properties Analyzer*” o MPRO, el cual somete una muestra de cemento a condiciones de fondo (presión y temperatura) mientras mide las propiedades elásticas. Las propiedades medidas por el “*Mechanical Properties Analyzer*” son las siguientes:

- **Coeficiente de Poisson:** Este corresponde a la relación que existe entre la compresión y expansión de un material, al momento de realizar un esfuerzo de compresión uniaxial vertical sobre un material, este tenderá a expandirse hacia los otros ejes.
- **Módulo de Young:** Este módulo describe la relación existente entre la fuerza y la tensión de un material, el cual sustenta que a medida que el valor del mismo sea mayor, la elasticidad del material tenderá a ser mayor.
- **Módulo de Compresibilidad:** Como su nombre lo indica determina que tan compresible es un material, al igual que el “*Ultrasonic Cement Analyzer*” el equipo determina la compresibilidad del material por medio del uso de ondas

de sonido, donde se mide el tiempo de transito de estas a través de la muestra de cemento y así logra determinar esta propiedad de manera indirecta mediante el uso de algoritmos que relacionan la compresibilidad de la lechada con la velocidad de transito de las ondas en la muestra.

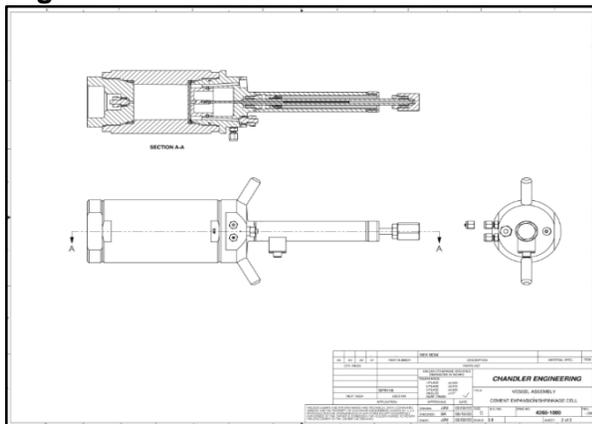
El equipo utilizado para esta prueba es “Mechanical Properties Analyzer” (**Figura 43**) con su respectiva celda (**Figura 44**), el procedimiento para realizar esta prueba se describe más a fondo en la **Figura 45**, siguiendo el procedimiento recomendado por la empresa Superior Energy Services.

Figura 43. Equipo MPRO
“Mechanical Properties Analyzer”.



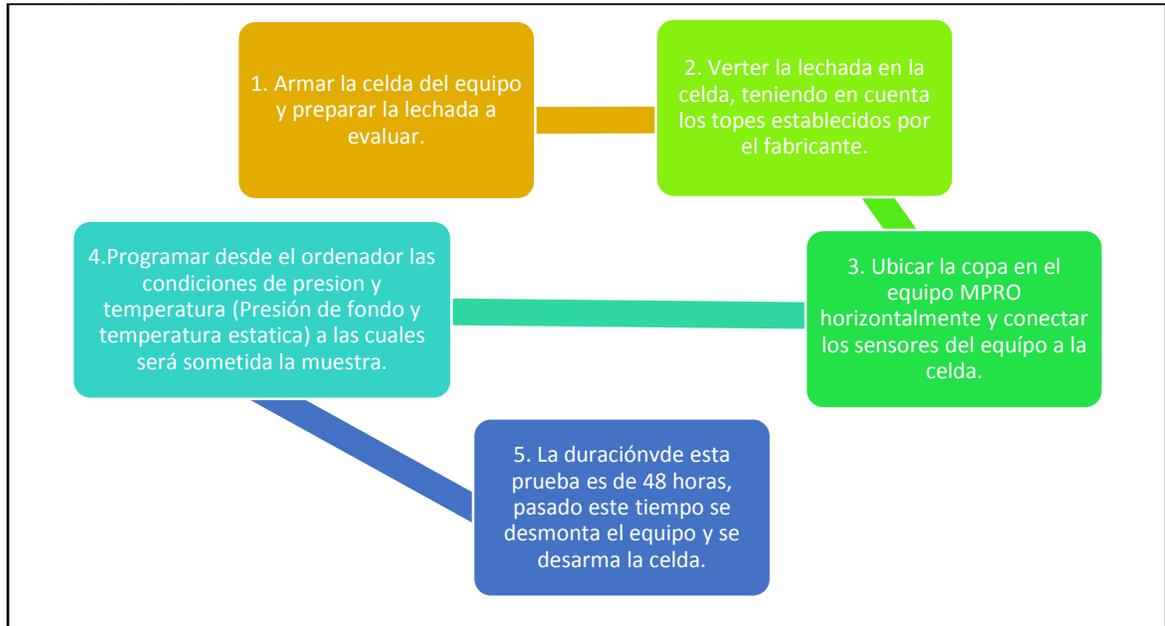
Fuente: CHANDLERENG. Products.
Disponible en: www.chandlereng.com/products/oilwellcementing.

Figura 44. Plano celda de MPRO.



Fuente: CHANDLER “Instruction manual MODEL 6265 Mechanical Properties Analyzer”.

Figura 45. Procedimiento para la determinación de las propiedades mecánicas de una lechada de cemento.



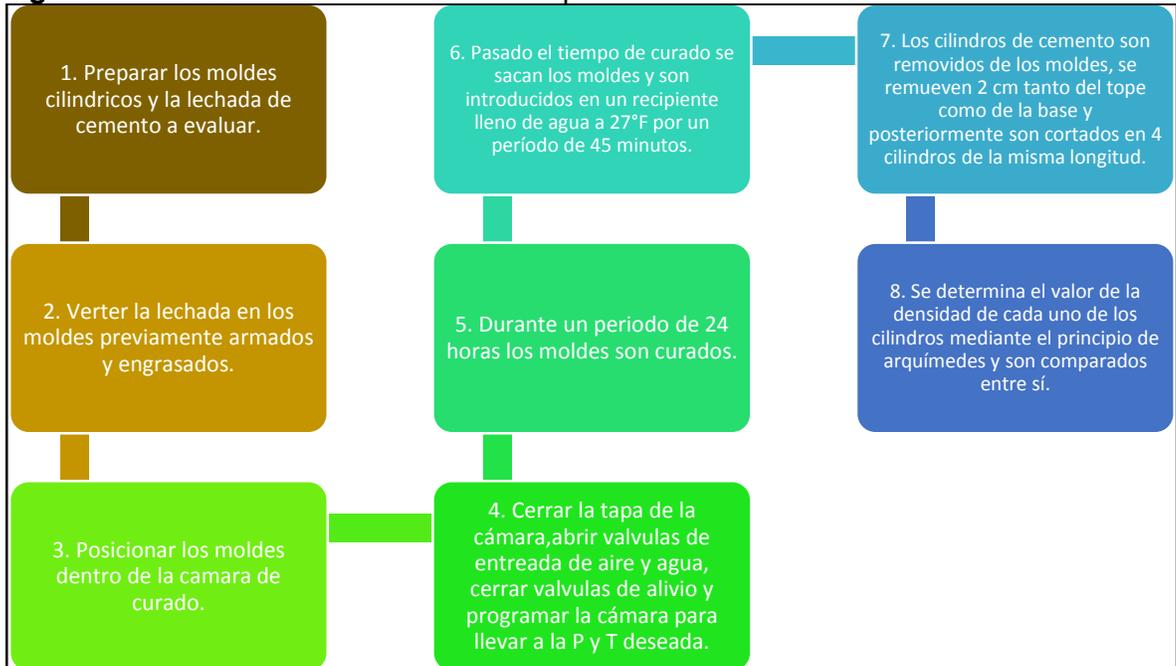
5.1.5 Prueba de sedimentación. Esta prueba en conjunto con la prueba de agua libre permite evaluar la habilidad de la lechada de cemento de mantenerse homogénea, es decir estas pruebas permiten determinar la estabilidad de la lechada. Con aras de disminuir la sedimentación de las partículas de la lechada, se adicionan aditivos extendedores que tienen como propósito mantener suspendidas dichas partículas. La prueba de sedimentación evalúa la eficiencia del comportamiento de un material, si el aditivo es capaz de extender las lechadas, como resultado de esta prueba se obtiene un cilindro el cual es necesario dividir en secciones iguales. Para la realización de esta prueba es necesario el uso de la cámara de curado (**Figura 46**), para someter la muestra a condiciones de presión (3000 psi) y a temperaturas de fondo estáticas y circulantes por un periodo de 48 horas.

Figura 46. Cilindros de sedimentación.



En la **Figura 47** se puede observar el procedimiento basado en la norma API RP 10B para la realización de la prueba de sedimentación.

Figura 47. Procedimiento de la realización prueba de sedimentación.



Para la determinación de la densidad de cada uno de los cilindros, se realiza mediante la **Ecuación 21**.

Ecuación 21. Determinación de densidad a partir de principio de Arquímedes.

$$\rho = \frac{m_{seca}}{m_{húmeda}} * 8,33$$

Fuente: API. Norma API RP 10B. 2013. p. 72.

Dónde:

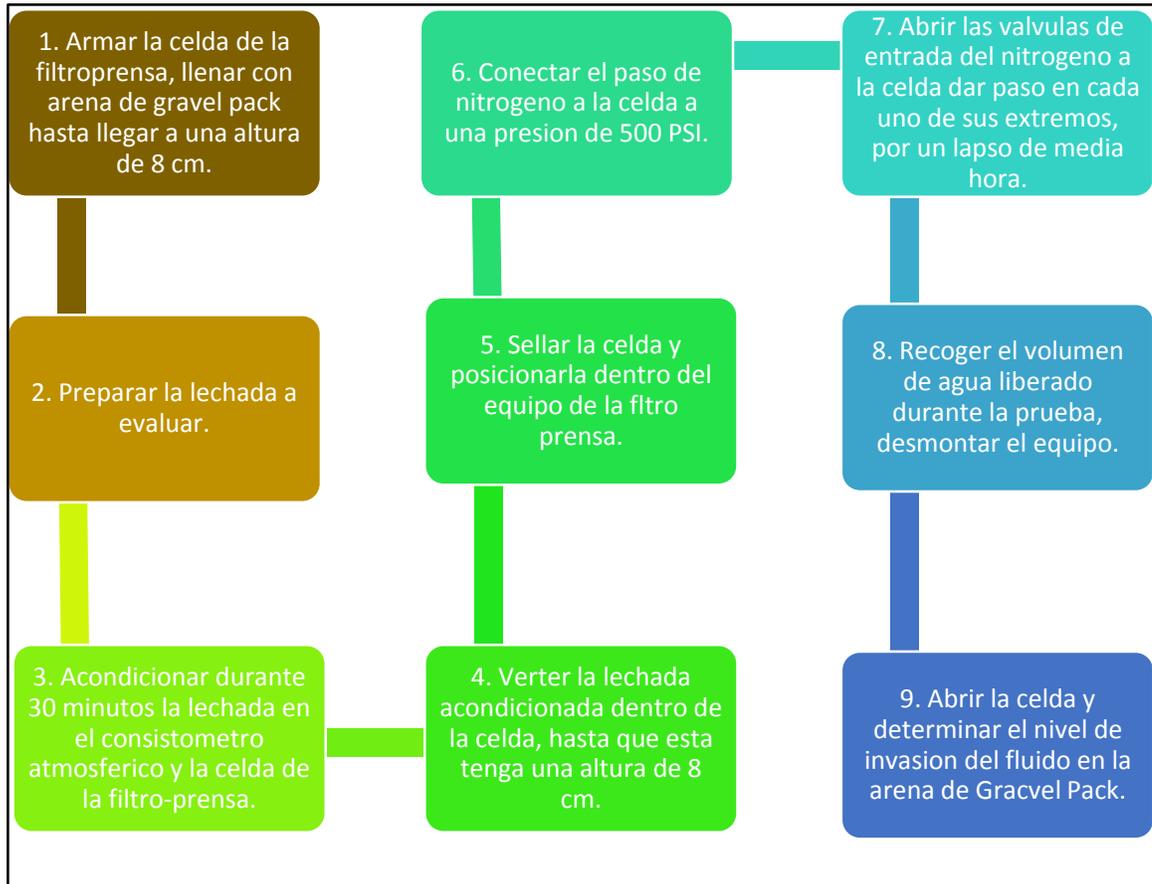
- ρ : Densidad de la muestra, expresada en ppg.
- m_{seca} : Masa seca, expresada en gr.
- $m_{húmeda}$: Masa húmeda, expresada en gr.
- 8,33: Densidad del agua, expresada en ppg.

En donde la masa seca es el peso de cada cilindro en la balanza, la masa húmeda es medida de la siguiente manera: En un beaker de 250mL se adiciona un volumen determinado de agua, el cual es puesto en la balanza electrónica y se tara, con un hilo se amarra el cilindro y se procede a sumergirlo en el beaker, hasta tener una lectura de peso, este es el valor que se reporta como masa húmeda. La empresa Superior Energy Services plantea como límite para la variación de la densidad dentro los cilindros, un valor de 0,5 ppg de variación.

5.1.6 Evaluación de pérdida de circulación. La intención de esta prueba es evaluar a condiciones de presión y temperatura la capacidad de obturación de la lechada a la cual se le adiciona GCR como controlador de pérdida de circulación, no existe un procedimiento API para evaluar la efectividad de un material frente al control de pérdidas, sin embargo, para evaluar cualitativamente la propiedad de control de pérdidas de las lechadas seleccionadas se hace uso de la filtro prensa presurizada (**Figura 28**) y realiza el procedimiento enunciado en la **Figura 48**.

Para el desarrollo de esta prueba es necesario el uso de arena de gravel pack malla 20 – 40 para simular las condiciones de porosidad de las formaciones en fondo, ya que el fabricante determina su valor de porosidad en un aproximado de 30% similar al presentado en las condiciones de Campo Castilla.

Figura 48. Procedimiento para la determinación de pérdida de circulación de una lechada.



5.2 DATOS OBTENIDOS

En la siguiente sección del capítulo se presentan los datos obtenidos a partir de la evaluación de las lechadas seleccionadas de cada sección (superior e intermedia).

5.2.1 Composición de las lechadas. Con el propósito de obtener resultados óptimos y cumplir con los requerimientos operacionales, fue necesario realizar cambios en la composición de las lechadas iniciales, específicamente al cambiar las concentraciones de los aditivos encargados de afectar el tiempo de fraguado en las lechadas (aceleradores y retardadores), debido a que el GCR reduce el tiempo de fraguado en las lechadas, lo cual se explica más adelante.

5.2.1.1 Composiciones de la lechada evaluada para la sección superior 17 ½” CSG 13 3/8”. La composición con la que se evalúa inicialmente la lechada se muestra a partir de la **Tabla 12**, y durante un proceso de modificaciones a la composición donde se varía la concentración del agente acelerante por un proceso de prueba y error hasta determinar que el uso de este aditivo no es

necesario en presencia del grano de caucho reciclado (GCR), como se muestra en la **Tabla 13**.

Tabla 12. Composición inicial de diseño de lechada de la sección superior.

Diseño inicial CGS 13 3/8"		
Cemento	Agua	
752,01	326,54	
Aditivo	Concentración	Peso (gr)
Acelerante	0,7% BWOC	5,27
Antiespumante	0,01 gal/sx	0,69
GCR	5% BWOC	37,51

Tabla 13. Composición final de diseño de lechada de la sección superior.

Diseño final CGS 13 3/8"		
Cemento	Agua	
756,21	326,96	
Aditivo	Concentración	Peso (gr)
Antiespumante	0,01 gal/sx	0,67
GCR	5% BWOC	37,81

5.2.1.2 Composiciones de la lechada evaluada para la sección intermedia 12 1/4" CSG 9 5/8". La composición con la que se evalúa inicialmente la lechada se muestra a partir de la **Tabla 14**, durante el desarrollo de las pruebas de tiempo de bombeabilidad fue necesario el cambio de las concentraciones del retardador por un proceso de prueba y error hasta determinar su concentración óptima para mezclar con el grano de caucho reciclado (GCR).

Tabla 14. Composición inicial de diseño de lechada de la sección intermedia.

Diseño inicial CGS 9 5/8"		
Cemento	Agua	
774,29	335,19	
Aditivo	Concentración	Peso (gr)
Controlador de filtrado 1	0,5% BWOC	3,87
Controlador de filtrado 2	0,8% BWOC	6,19
Antiespumante	0,01 gal/sx	0,69
Retardante	0,04% BWOC	0,31
GCR	2% BWOC	15,49

En la **Tabla 15** se puede observar la composición final para la lechada la sección de 12 1/4" con CSG 9 5/8".

Tabla 15. Composición final del diseño de lechada para sección intermedia.

Diseño final CSG 9 5/8"		
Cemento	Agua	
	774,83	335,37
Aditivo	Concentración	Peso (gr)
Controlador de filtrado 1	0,5% BWOC	3,87
Controlador de filtrado 2	0,8% BWOC	6,19
Antiespumante	0,01 gal/sx	0,69
Retardante	0,13% BWOC	1,01
GCR	2% BWOC	15,48

5.2.2 Resultado del segundo grupo de pruebas. A continuación, se muestran las tablas de resultados obtenidos durante el segundo plan de pruebas, en la **Tabla 16** se pueden observar los resultados para la sección superior (sección 17 1/2" CSG 13 3/8").

Tabla 16. Resultados segundo plan de pruebas sección 17 1/2" CSG 13 3/8" con GCR al 5% BWOC.

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"					
Lechada de 15.6 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante)					
% GCR	TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA			
		Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]
5	2:47:00	8	448	4:09:00	8:19:00
		12	1005		
		18	1472		
		24	1766		

En la **Cuadro 7** es posible visualizar los resultados del segundo plan de pruebas para la lechada PRO de la sección intermedia de 12 1/4" CSG 9 5/8" con 2% BWOC de GCR previamente seleccionada. De igual forma en la **Cuadro 8** se pueden observar los resultados del segundo plan de pruebas para la lechada convencional para la misma sección, con diferencia que esta lechada tiene Super Sweep como material de control de pérdida.

Cuadro 7. Resultados segundo plan de pruebas para las lechadas de la sección intermedia de 12 1/4" CSG de 9 5/8" con GCR como material de control de pérdida.

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"													
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF1 [0,5%BWOC]+ CF2 [0,8%BWOC] + Ret [0,13%BWOC])													
% GCR	TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA				RC ensayo destructivo. PH			Sedimentación				
		Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]	# Cubo	Fuerza [lbf]	P prom [Psi]	# Cubo	Masa [gr]	Vol [mL]	Densidad	Variación de Densidad [%]
2	4:59:00	8	1283	5:34:30	6:21:00	1	22338	5148	1	39,49	25	15,8314	0,30
		12	2198			2	18889		2	41,21	26	15,8855	
		18	2693			3	20549		3	38,78	24	16,1945	
		24	2933			4			4	38,61	25	15,4786	

Cuadro 8. Resultados segundo plan de pruebas para las lechadas de la sección intermedia de 12 1/4" CSG de 9 5/8" con Super Sweep como material de control de pérdida.

S U P E R S W E E P	SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"												
	Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF1 [0,5%BWOC]+ CF2 [0,8%BWOC] + Ret [0,04%BWOC] + Ext [0,02%BWOC])												
	TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA				RC ensayo destructivo. PH			Sedimentación				
		Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]	# Cubo	Fuerza [lbf]	P prom [Psi]	Variación de Densidad [%]				
N.A (5:27:00)	8	404	7:23:00	8:12:30	1	14521	3768	0,32					
	12	1892			2	14503							
	18	2670			3	16197							
	24	2974			4								

A continuación, se muestra la evidencia fotográfica de los resultados obtenidos para la evaluación de control de pérdidas realizadas a las lechadas de la sección de 12 1/4" CSG 9 5/8", entre ellas se tienen: La lechada convencional sin material de control de pérdida (**Figura 49**), lechada convencional con Super- Sweep al 0.21% BWOC como material de control de pérdida (**Figura 50**) y la lechada con GCR al 2% BWOC previamente seleccionada como lechada PRO (**Figura 51**).

Figura 49. Resultados prueba control de pérdida a lechada convencional sin aditivos de control de pérdida.



Figura 50. Resultados prueba de lechada convencional con Super-Sweep al 0.21% BWOC como agente de control de pérdida.



Figura 51. Resultados prueba de lechada con GCR al 2% BWOC como agente de control de pérdida.



6. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LAS LECHADAS SUPERIOR E INTERMEDIA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO

Durante el transcurso de este capítulo se hace un análisis minucioso de los resultados obtenidos de cada una de las pruebas a las que fueron sometidas las lechadas seleccionadas, con el objetivo de definir el comportamiento de las lechadas de cemento a las cuales se les adiciona grano de caucho reciclado. A partir de un análisis de resultados de tipo comparativo se evalúa la efectividad del material GCR como aditivo en lechadas de cementación petrolera, dicho análisis comparativo se realiza contra una lechada convencional o una lechada convencional a la cual se le ha adicionado Super-Sweep como material de control de pérdida, la cual está diseñada para suplir las necesidades del Campo Castilla en la actualidad.

En el caso de la sección superior de 17 ½" cabe resaltar que el uso de Super-Sweep es reducido o nulo debido a que esta sección de los pozos no presenta pérdidas significativas, es por ello que normalmente esta lechada se evalúa sin presencia de Super-Sweep. En el **Cuadro 9** y **Cuadro 10** se pueden observar los resultados del primer y segundo plan de pruebas respectivamente, realizados a la lechada seleccionada como lechada PRO en la sección superior de 17 ½" CSG 13 3/8" con GCR al 5% BWOC.

Cuadro 9. Resultados primer plan de pruebas a la lechada PRO de la sección superior de 13 3/8" con 5% BWOC de GCR.

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"							
Lechada de 15.6 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante)							
% GCR	Mezclabilidad	Reología					Agua Libre
		Temp. [°F]	Vp [cP]	Yp [Lbf/100ft ²]	Esfuerzos de geles [Lbsf/100ft ²]		Vff [mL]
					Bingham		
5	SI	85	59,25	57,75	19	30	0

Cuadro 10. Resultados segundo plan de pruebas a la lechada PRO de la sección superior de 13 3/8" con 5% BWOC de GCR.

SECCIÓN DE 17 1/2" CSG 13 3/8"					
Lechada de 15.6 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante)					
% GCR	TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA			
		Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]
5	2:47:00	8	448	4:09:00	8:19:00
		12	1005		
		18	1472		
		24	1766		

De igual forma en el **Cuadro 11** y **12** se encuentran los resultados del primer y segundo plan de pruebas, realizados a la lechada seleccionada como lechada PRO en la sección intermedia de 12 1/4" CSG 9 5/8" con GCR al 2%BWOC.

Cuadro 11. Resultados primer plan de pruebas a la lechada PRO de la sección intermedia de 12 1/4" con 2%BWOC de GCR.

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"										
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF1 [0,5%BWOC] + CF2 [0,8%BWOC] + Ret [0,13%BWOC] + Ext [0,02%BWOC])										
% GCR	Mezclabilidad	Reología					Agua Libre	Filtrado		
		Temp. [°F]	Vp [cP]	Yp [Lbf/100ft2]	Esfuerzos de geles [Lbsf/100ft2]		Vff [mL]	V [mL]	t [min]	API
					Bingham	10 s				
2	SI	85	255,75	18,25	6	14	0	12,5	30	25
		124	245,25	16,75	5	14				

Cuadro 12. Resultados segundo plan de pruebas a la lechada PRO de la sección intermedia de 12 1/4" con 2%BWOC de GCR.

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"													
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF1 [0,5%BWOC] + CF2 [0,8%BWOC] + Ret [0,13%BWOC])													
% GCR	TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA				RC ensayo destructivo. PH			Sedimentación				
		Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]	# Cubo	Fuerza [lbf]	P prom [Psi]	# Cubo	Masa [gr]	Vol [mL]	Densidad	Variación de Densidad [%]
2	4:59:00	8	1283	5:34:30	6:21:00	1	22338	5148	1	39,49	25	15,8314	0,30
		12	2198			2	18889		2	41,21	26	15,8855	
		18	2693			3	20549		3	38,78	24	16,1945	
		24	2933			4			4	38,61	25	15,4786	

En el **Cuadro 13** se encuentran los resultados de las pruebas de laboratorio que se le pueden realizar a una lechada principal para la sección de 12 ¼” a la cual se le adicione un aditivo para controlar las pérdidas de circulación cuyo nombre es Super-Sweep, de igual forma a lo largo del capítulo se realizó una comparación con los requerimientos que exigen los ingenieros de operaciones de la empresa Superior Energy Services Colombia a las lechadas utilizadas en las diferentes secciones.

Cuadro 13. Evaluación del primer y segundo plan de pruebas a una lechada principal para la sección de 12 ¼ CSG 13 3/8” con Super-Sweep como material de control de pérdida al 0,21% BWOC.

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"														
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF1 [0,5%BWOC]+ CF2 [0,8%BWOC] + Ret [0,04%BWOC] + Ext [0,02%BWOC])														
Mezclabilidad	Reología	Agua libre		Filtrado		TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA				RC ensayo destructivo. PH			Sedimentación
		Vff [mL]	V[mL]	t[min]	API		Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]	# Cubo	Fuerza [lbf]	P prom [Psi]	
SI	N.A	0	14,5	30	29	N.A (5:27:00)	8	404	7:23:00	8:12:30	1	14521	3768	0,32
							12	1892			2	14503		
							18	2670			3	16197		
							24	2974			4			

Es necesario aclarar que no fue posible realizar todas las pruebas de laboratorio a la lechada con Super-Sweep ya que dicho material es una fibra sintética y al tener equipos que trabajan a partir de la rotación es probable que dichos equipos se puedan descomponer, debido a esto a la lechada con dicho material no se le realizaron las pruebas de reología y tiempo de bombeabilidad. De igual forma hay que recalcar que al momento de mezclar la lechada con Super-Sweep este debe ser agregado una vez se allá mezclado el agua con el cemento y los demás aditivos, verter la lechada en un beaker de 500mL, adicionar la fibra a la lechada y terminar de mezclar la lechada de forma manual hasta tener una mezcla homogénea.

En el **Cuadro 14** se encuentran los resultados de las pruebas de laboratorio para la lechada convencional principal para la sección de 12 ¼” la cual no tiene ningún aditivo para el control de pérdida en su composición.

Cuadro 14. Resultados pruebas de laboratorio de la lechada convencional principal para la sección intermedia de 12 1/4”.

SECCIÓN DE 12 1/4" CSG 9 5/8"								
Lechada de 15.8 ppg (Agua + Cemento + Antiespumante + CF1[0,5%BWOC]+ CF2[0,8%BWOC] + Ret [0,04%BWOC] + Ext [0,02%BWOC])								
TT @70Bc [hh:mm:ss]	RC ensayo no destructivo. UCA				RC ensayo destructivo. PH			Sedimentación
	Tiempo [Hora]	RC [Psi]	P @50Psi [hh:mm:ss]	P @500Psi [hh:mm:ss]	# Cubo	Fuerza [lbf]	P prom [Psi]	Variación de Densidad [%]
N.A (5:34:00)	8	788	7:31:00	8:27:00	1	20351	4721	0,32
	12	1870			2	17090		
	18	2586			3	19212		
	24	2926			4			

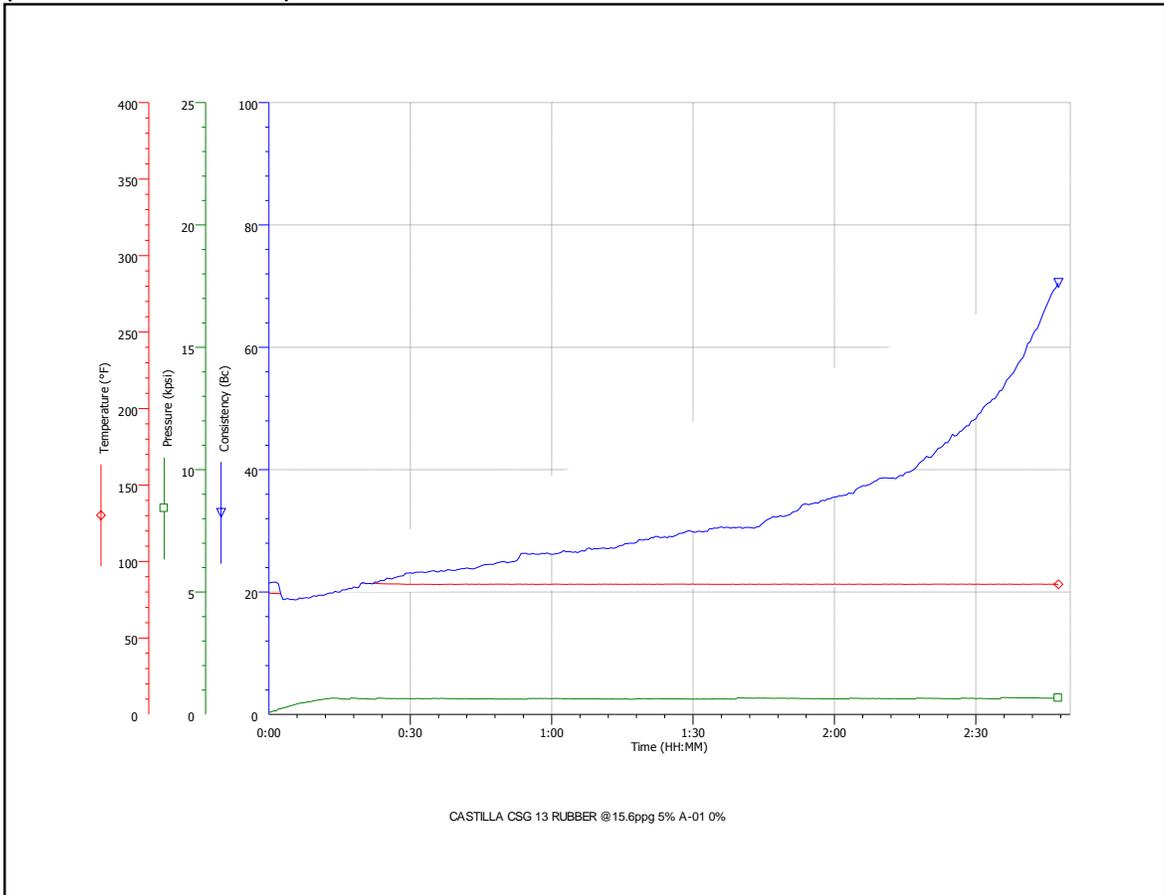
En los siguientes numerales se realiza el análisis minucioso de los datos obtenidos durante la evaluación de los materiales por medio de las pruebas realizadas.

6.1 ANÁLISIS DEL TIEMPO DE BOMBEABILIDAD

En este numeral del capítulo se analizan los valores obtenidos durante la prueba de tiempo de bombeabilidad realizada en el consistómetro presurizado, esta prueba se describió en el capítulo 5.

6.1.1 Análisis de tiempo de bombeabilidad de la sección superior 17 1/2” CSG 13 3/8”. Para el análisis de los resultados obtenidos de esta prueba es necesario compararlos con aquellos datos suministrados por la empresa Superior Energy Services, la lechada con contenido de GCR se evalúa con respecto a los requerimiento de una lechada convencional usada actualmente en Campo Castilla, el tiempo de bombeabilidad se deben encontrar en un lapso de 2.5h – 3.5h, el valor obtenido a partir de la evaluación de la lechada con 5% de GCR fue de 2h 47min, este valor se encuentra enunciado en la **Tabla 26** y es posible observar el comportamiento de la consistencia de la lechada durante la prueba en la **Gráfica 5**, basado en ello se puede decir que el comportamiento de la lechada se ajusta al requerido por la empresa (Ver **Tabla 15**). Para obtener este resultado es necesario la eliminación del agente acelerante de la lechada como se planteó en un inicio, ya que el comportamiento del GCR, se asemeja al de un aditivo acelerante.

Gráfica 5. Tiempo de bombeabilidad para una lechada de 15,6 ppg con 5% de GCR para la sección de superficie de 17 ½”.



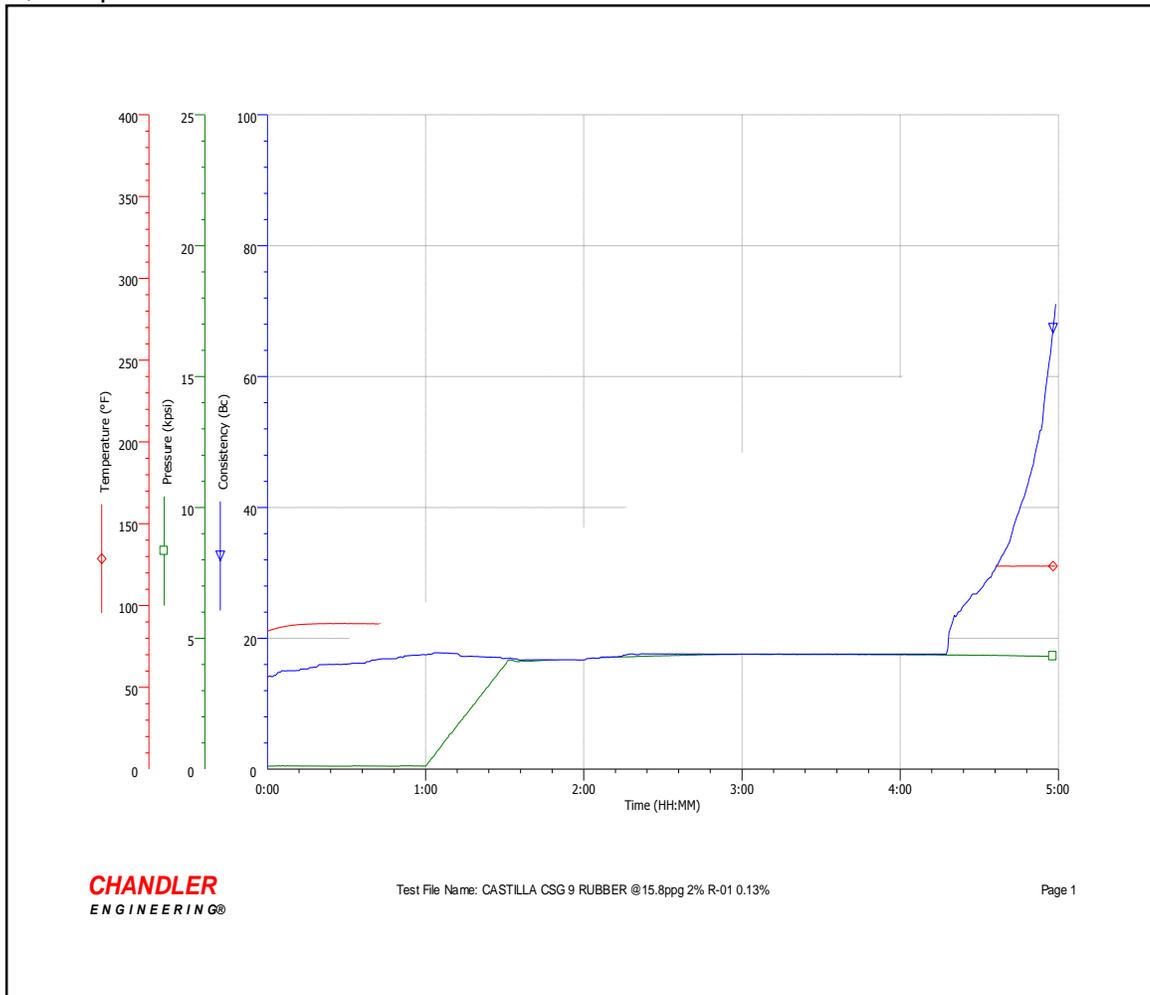
Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. 2017.

6.1.2 Análisis de tiempo de bombeabilidad de la sección intermedia 12 1/2” CSG de 9 5/8”. Para el análisis de la lechada principal de 15,8ppg con 2% de GCR para esta sección no es posible evaluarla con respecto a una lechada a la cual se le haya adicionado Super-Sweep debido a lo mencionado anteriormente, es por ello que se evalúa con respecto a una lechada principal convencional utilizada para dicha sección.

El valor de tiempo de bombeabilidad de una lechada principal promedio para esta sección se debe encontrar en un intervalo de 5h – 6h, los resultados de la prueba de bombeabilidad realizados a la lechada con 2% de GCR dio como resultado el valor de 4h 59min como se puede observar en la **Tabla 28**, en la **Gráfica 6** se puede evidenciar el comportamiento de la lechada principal con 2% de GCR con retardador al 0.13%. Por otro lado los resultados de la lechada principal convencional dieron como resultado un valor de 5h 27min. Confrontando los resultados de las dos lechada de 15,8ppg, la lechada con 2% de GCR tuvo una reducción del tiempo en 28min, cumpliendo de igual forma el requerimiento de

tiempo de bombeabilidad propuesto por la empresa, de los resultados mencionados anteriormente es importante recalcar que a la lechada con 2% de GCR le fue necesario eliminar de su composición la concentración de 0,02%BWOC de extendedor debido al comportamiento del GCR a comportarse como aditivo extendedor, de igual manera hay que recordar que debido a la conducta del GCR como material acelerante también fue necesario un aumento del retardador del 0,04%BWOC hasta un 0,13%BWOC para cumplir con el requerimiento del tiempo de bombeabilidad.

Gráfica 6. Bombeabilidad para una lechada de 15,8 ppg con 2% de GCR y retardador al 0,13% para la sección de intermedia de 12 ¼”.



Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. 2017.

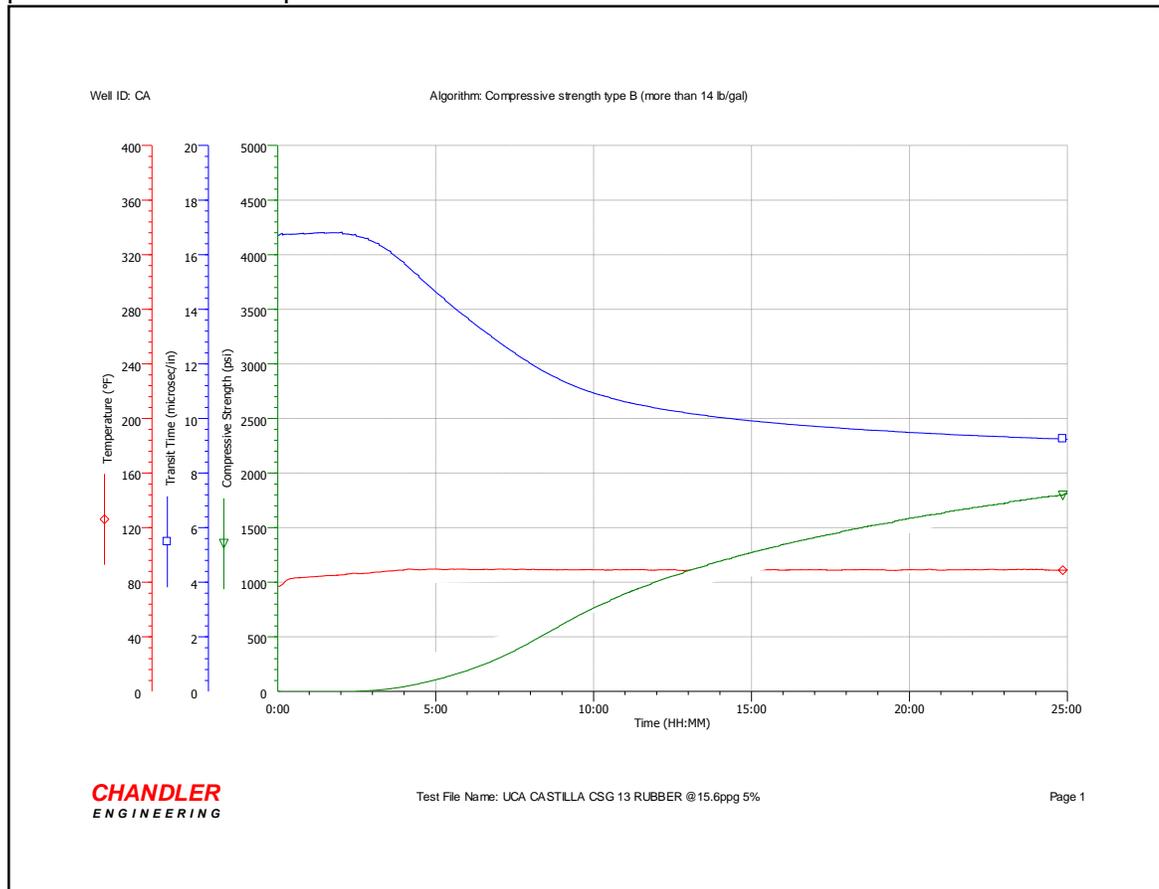
6.2 ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIANTE EL ENSAYO NO DESTRUCTIVO

A continuación, los datos obtenidos de las pruebas realizadas en el equipo SGSA o "*Ultrasonic Cement Analyzer*" donde se evalúa el comportamiento de la lechada frente al desarrollo de la resistencia a la compresión por un periodo de 24 horas.

6.2.1 Análisis de evaluación de la resistencia a la compresión mediante el ensayo no destructivo de la sección superior de 17 ½" CSG 13 3/8". Según los valores obtenidos y registrados en la **Tabla 26** para la lechada de 15.6ppg con 5% de GCR y observando la **Gráfica 7** en la cual se puede apreciar el comportamiento de la resistencia a la compresión de la lechada a través del tiempo, es posible realizar la comparación con respecto a la lechada principal convencional para Campo Castilla, cuyos datos son suministrados por la empresa Superior Energy Services.

Según los resultados del SGSA a una lechada principal convencional de 15.6ppg se puede afirmar que dicha lechada a las 24h después de ser mezclada, bombeada y estar sometida a condiciones de pozo llega a desarrollar un esfuerzo a la compresión de 2398 psi, por otro lado la lechada con 5% de GCR a las mismas 24h y las mismas condiciones de pozo desarrolla una resistencia a la compresión de 1766 psi, es decir, el uso del GCR representa una disminución del 26,35% con respecto a la lechada principal convencional usada en Campo Castilla. Al mismo tiempo el comportamiento de desarrollo de resistencia a la compresión para la lechada convencional se realiza de manera más temprana a comparación de la lechada adicionada con GCR al 5%BWOC, en donde en la lechada convencional se realiza el desarrollo de resistencia de 50 psi a las tres horas y siete minutos (03:07), mientras que para la lechada con 5%BWOC de GCR presenta un tiempo de cuatro horas y nueve minutos (04:09) para el desarrollo de 50psi de resistencia, es decir, el aumento de tiempo de desarrollo a la resistencia de 50 psi es del 33,15% con respecto a la lechada convencional; este comportamiento se mantuvo para el desarrollo a la resistencia a 500psi, para la lechada convencional se obtuvo un tiempo de seis horas, veinticuatro minutos y treinta segundos (06:24:30) mientras que parabel desarrollo de esta resistencia en la lechada con GCR es de ocho horas y diecinueve minutos (08:19), es decir el incremento de tiempo de desarrollo de resistencia fue del 29,78% con respecto a la lechada convencional.

Gráfica 7. Resistencia a la compresión para una lechada de 15,6 ppg con 5% de GCR para la sección de superficie de 17 ½”.

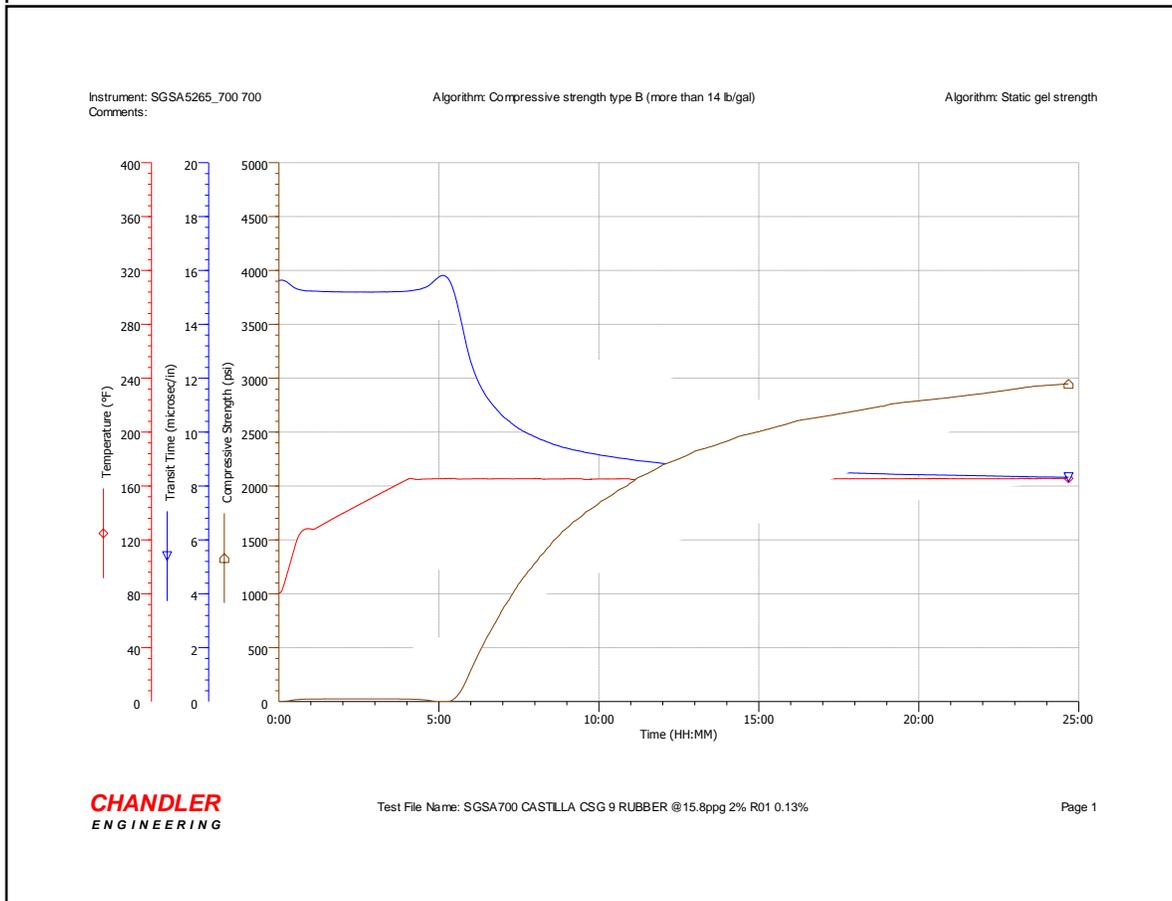


Fuente: SUPERIOR ENERGY SERVICES. 2017.

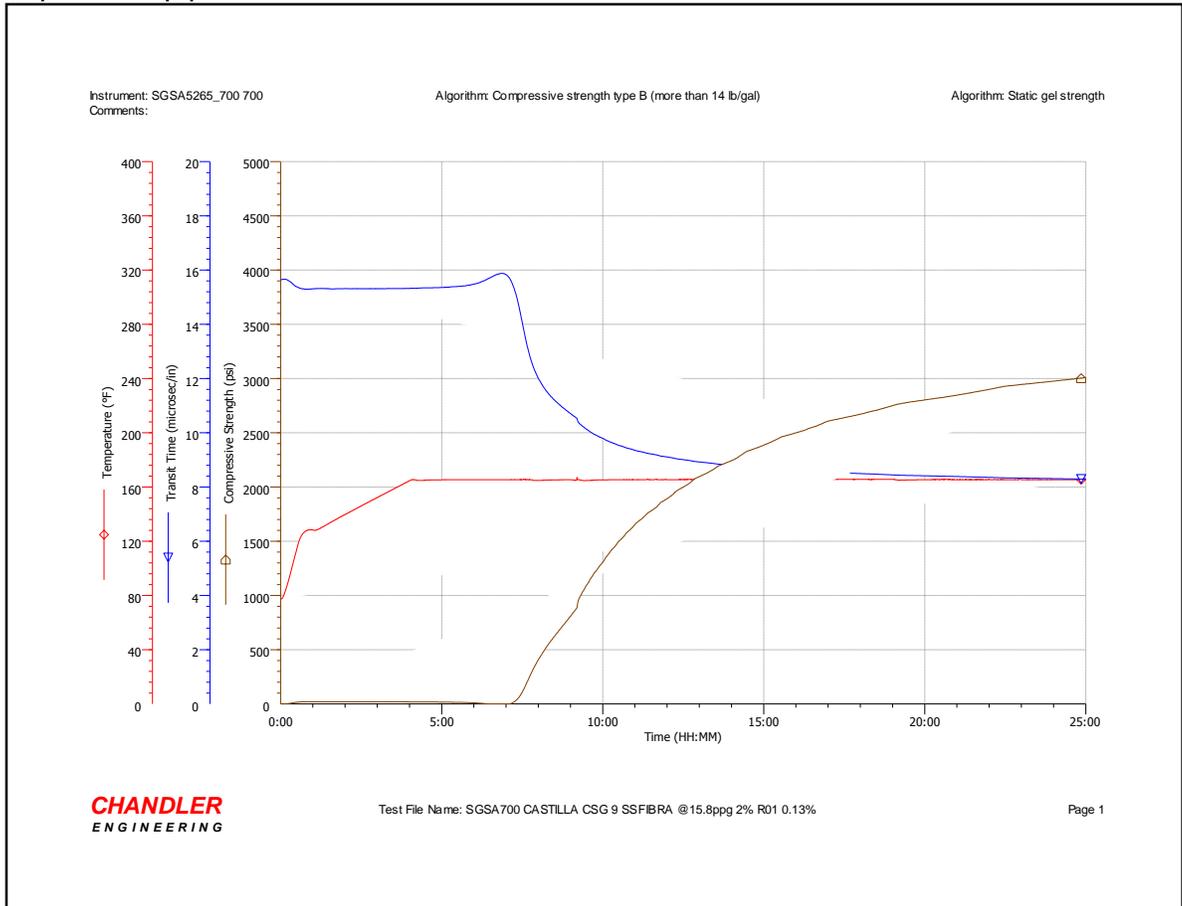
6.2.2 Análisis de evaluación de la resistencia a la compresión mediante el ensayo no destructivo para la sección intermedia de 12 ¼” CGS 9 5/8”. A partir de los datos recopilados de la evaluación del uso de GCR al 2%BWOC como se pueden observar en la **Tabla 28** y de la evaluación de una lechada convencional con Super-Sweep 0.21%BWOC como se pueden observar en la **Tabla 19**, las lechadas fueron evaluadas en los equipos de SGSA, en los resultados se realiza la descripción del comportamiento de la resistencia a la compresión de cada una de las lechadas con respecto al tiempo durante un lapso de 24 horas. En las **Gráficas 8** y **9** se observan el desarrollo de la resistencia a la compresión para la lechada con GCR al 2% y la lechada con Super-Sweep al 0,21% respectivamente, de las gráficas se pueden resaltar tres valores de gran importancia como lo es el tiempo al cual las lechadas alcanzan una resistencia a la compresión de 50psi, a los 500psi y la resistencia a la compresión obtenida a las 24 horas. Los resultados obtenidos para la lechada con GCR al 2% el valor de resistencia a la compresión registrado para las 24 horas es de 2933psi, el tiempo que demora en desarrollar una resistencia a la compresión de 50 psi es de 5h

34min y el tiempo que demora en desarrollar la resistencia a la compresión a 500psi es de 6h 21min, es decir el desarrollo de resistencia a la compresión a 50psi se vio disminuido un 25,83% con respecto a la lechada convencional y para el desarrollo de resistencia a la compresión de 500psi del 24,85% con respecto a la lechada convencional, como se puede observar en la **Gráfica 8**. Los resultados obtenidos para la lechada con Super-Sweep al 0.21% el valor registrado para las 24 horas es de 2974psi, el tiempo que demora en desarrollar una resistencia a la compresión a los 50psi y a los 500psi es de 7h 23min y 8h 12min respectivamente, es decir muestra una disminución del tiempo de resistencia a la compresión de 1,77% para el desarrollo de 50psi y una reducción del 2,68% para el tiempo de desarrollo de resistencia a los 500psi, como se puede observar en la **Gráfica 9**, los valores descritos anteriormente se encuentran enunciados **Tablas 27 y 28**. A partir de estos datos es posible determinar que el desarrollo a la compresión de ambos aditivos es similar, su diferencia varía en 41psi, sin embargo el desarrollo de la resistencia a la compresión se realiza de manera más acelerada en la lechada a la cual se le adiciona GCR al 2% BWOC.

Gráfica 8. Resistencia a la compresión para una lechada de 15,8 ppg con 2% de GCR para la sección intermedia de 12 ¼”.



Gráfica 9. Resistencia a la compresión para una lechada de 15,8 ppg con 0,21% de Super-Sweep para la sección intermedia de 12 ¼”.



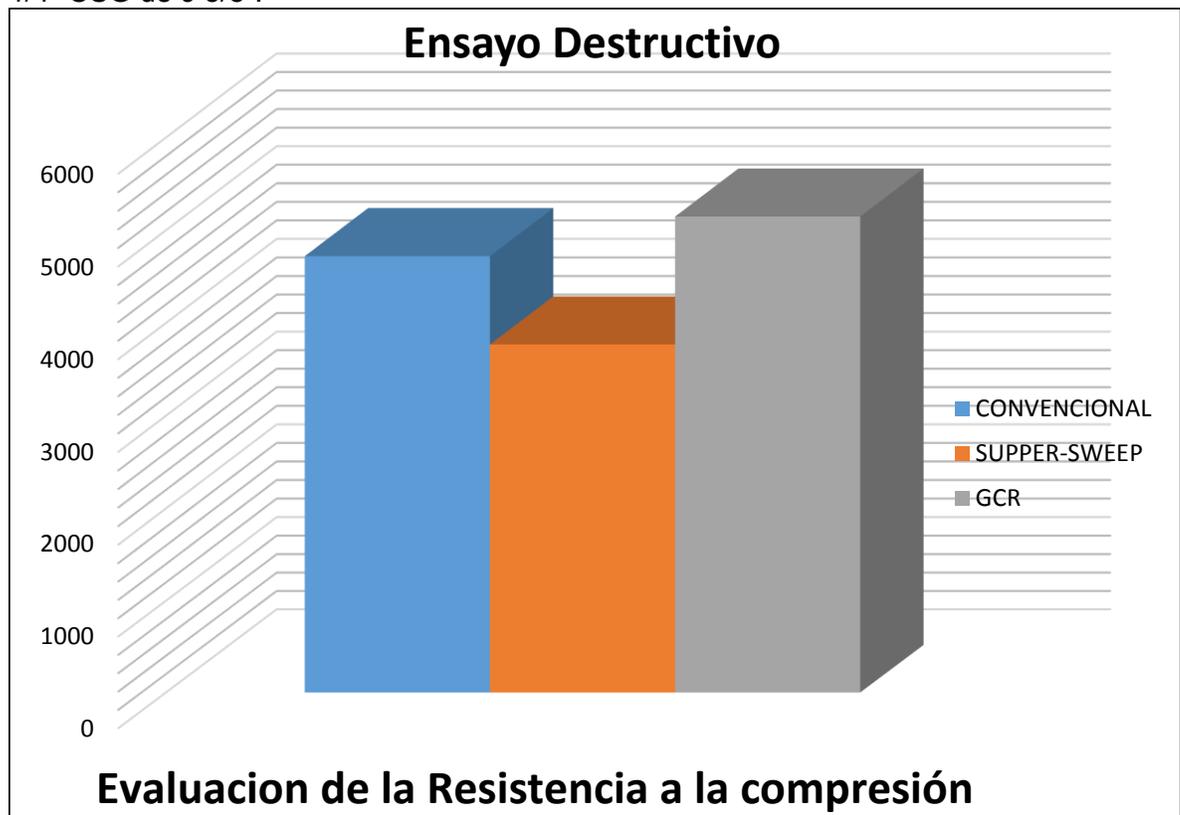
6.3 ANÁLISIS DE EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MEDIANTE EL ENSAYO DESTRUCTIVO

A continuación, se realiza el análisis del ensayo destructivo para las lechadas de la sección de 12 ¼” CSG 9 5/8 debido a que se realiza la evaluación únicamente para condiciones de la sección intermedia, donde se presentan las condiciones más críticas debido a la profundidad.

6.3.1 Análisis de evaluación de la resistencia a la compresión mediante el ensayo destructivo de la sección intermedia de 12 1/2” CSG 9 5/8”. Para la realización de esta prueba se vierte lechada en cuatro moldes con el fin de obtener mayor cantidad de datos con el fin de tener un resultado representativa, sin embargo, en algunas ocasiones el valor de resistencia a la compresión limite alcanzado por ciertos cubos no es confiable, arrojando valores fuera de la media. Los datos obtenidos para la lechada para esta sección con 2% BWOC de GCR ilustrados en la **Tabla 28** dan como resultado que el promedio de resistencia a la

compresión límite soportada fue de 5148 psi, en la **Tabla 29** se observan los resultados para la lechada adicionada con Super-Sweep al 0.21% BWOC arrojaron un valor promedio de 3678 psi. En la **Tabla 30** se observan los resultados para la lechada convencional principal para esta sección, los resultados arrojan una resistencia a la compresión límite de 4721 psi; como se puede apreciar en la **Gráfica 10** se observa la comparación de las presiones promedios para las 3 lechadas.

Gráfica 10. Comparación de presiones promedio para las lechadas de la sección de 12 1/4" CSG de 9 5/8".



Al comparar las presiones promedio de la lechada con 2% BWOC de GCR respecto a la lechada con Super Sweep, se puede observar un incremento de la resistencia a la compresión del 36%; de igual forma se realizó una comparación de la lechada con Super Sweep respecto a la lechada convencional dando como resultado que el Super Sweep reduce la resistencia a la compresión un 20%.

Así mismo se realizó la comparación de la lechada con 2% BWOC de GCR respecto a la lechada convencional usada para esta sección, dando como resultado que la lechada con GCR incremento la resistencia a la compresión en un 9%.

6.4 ANÁLISIS DE PRUEBA DE SEDIMENTACIÓN A LA LECHADA DE 12 1/2” CSG 9 5/8” ADICIONADA CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

Esta prueba únicamente se realiza a la lechada de 12 1/4” CSG 9 5/8” debido a que se necesita evaluar la sedimentación del producto en condiciones críticas de fondo, se realiza a dos cilindros de la misma lechada cortados 4 partes iguales ubicando topes y bases en cada uno de ellos, buscando variación de densidad entre ellos sin embargo los datos obtenidos para ambas lechadas no muestran sedimentación, la lechada adicionada con GCR posee una variación de 0.3% según la **Tabla 28** y la variación de la lechada adicionada con Super-Sweep es de 0.32% según la **Tabla 29**.

6.5 ANÁLISIS DE PRUEBA DE PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

Es necesario resaltar el hecho que esta prueba no se encuentra descrita por la norma API, y por medio de su aplicación no es posible determinar de manera cuantitativa la mejoría o disminución de la capacidad de control de pérdida de circulación de una lechada, sin embargo, es posible realizar un análisis cualitativo de los resultados, En las **Figuras 37, 38 y 39** mostradas en el capítulo anterior es posible determinar mejora de las condiciones de saturación de agua de la arena presente dentro de la celda, la cual simula las condiciones de porosidad y permeabilidad de la cara de la formación, y se obtuvieron los siguientes resultados, para la lechada de cemento que no posee ningún tipo de agente de control de pérdida (ver **Figura 37**), la arena presente en la celda se encuentra saturada de agua proveniente de la lechada, con un revoque de gran espesor y presenta contaminación de la arena por parte del cemento que migra por los canales. Con respecto a la lechada que contiene Super-Sweep (ver **Figura 38**), se presenta un menor grado de humectación de la arena, sin embargo, el revoque de cemento presente es mucho mayor y el grado de contaminación de la arena aumenta como se puede observar en la imagen; y por ultimo para la evaluación de la lechada a la cual se le adiciona grano de caucho reciclado al 2% BWOC se presenta una mejora frente al tamaño del revoque formado por cemento, la cantidad de arena humectada se reduce significativamente, e inclusive gran parte de la misma se encuentra completamente seca y no presenta mayor grado de contaminación (ver **Figura 39**), a partir de estos criterios es posible determinar que el GCR se comporta como agente de control de pérdidas y puede llegar a ser más efectivo que la microfibras Super-Sweep

7. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL USO DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO EN LECHADAS DE CEMENTACIÓN A NIVEL DE LABORATORIO

A través de este capítulo se realiza la evaluación financiera de la implementación de GCR para lechadas de cementación a nivel de laboratorio, por medio de la comparación de costos unitarios de esta lechada frente a una lechada promedio para el Campo Castilla, y de esta manera determinar la viabilidad económica de la utilización de este material.

Cabe resaltar el hecho que la evaluación financiera del material se encuentra sesgada al nivel de laboratorio, ya que no es posible extrapolar los valores hacia los costos reales operacionales, debido a que este aditivo no ha sido evaluado en ningún aspecto de la industria petrolera y se recaería en una inexactitud al asumir los valores de algunos costos, como lo son costos de personal, costos de mantenimiento, transporte de equipos y demás costos asociados a la operación de cementación en campo.

Los costos que han de ser tenidos en cuenta son costos unitarios correspondientes a la materia prima consumida a través del desarrollo del proyecto, como lo son el cemento, retardantes, controladores de filtrado, agente anti-espumante, la microfibra Super-Sweep e inclusive el costo del GCR con el fin de realizar la comparación de costos. A partir de la determinación de los costos unitarios de cada lechada puede ser posible la determinación del costo de la lechada tanto a nivel de laboratorio como a nivel de desarrollo.

En caso de requerir un valor estimado del costo de la implementación del proyecto a nivel de campo, es necesario tener en cuenta los distintos costos asociados al desarrollo de un proyecto de tal envergadura, referentes a la adquisición y gasto de la materia prima, costos asociados a la mano de obra técnica y profesional que toma parte durante las operaciones, costos de transporte del personal, equipos y materia prima hacia la locación, costos asociados al funcionamiento de los equipos y su mantenimiento.

7.1 EVALUACIÓN FINANCIERA

El proyecto tiene por propósito la evaluación del comportamiento de lechadas de cemento a las cuales se les ha adicionado GCR para las secciones superior e intermedia, para cada una de estas secciones el objetivo de la investigación se enfoca en las lechadas principales o “Lechadas tail”, es decir, se evalúa el comportamiento de dos lechadas de diferente composición, cada una diseñada para el objetivo de la sección, haciendo uso del grano de caucho reciclado como aditivo. Para la evaluación del comportamiento de cada una de las lechadas se les aplicaron inicialmente pruebas de mezclabilidad, reología, agua libre, prueba de filtrado, tiempo de bombeabilidad, ensayo destructivo, ensayo no destructivo, análisis de propiedades mecánicas, prueba de sedimentación y evaluación de

pérdidas, es por ello que la evaluación financiera del proyecto es enfocada a nivel de laboratorio, a partir de lo mencionado anteriormente se realiza la comparación de costos de la lechada y de esta forma conocer la viabilidad financiera del uso del material.

Es importante resaltar que una lechada de cemento representa una inversión para la empresa, la cual no aporta directamente beneficios económicos a la compañía, sin embargo, la viabilidad de la implementación depende del mejoramiento de las propiedades de la lechada que el uso de este material conlleve y la posible disminución de costos en caso de reemplazar algunos otros aditivos presentes en las lechadas de ambas secciones.

7.2 EVALUACIÓN DE COSTOS UNITARIOS

Para la evaluación de los costos asociados al desarrollo del proyecto, como se ha mencionado en el numeral anterior, únicamente se tendrán en cuenta los costos de materia prima, porque la empresa Superior Energy Services cuenta con los equipos para la evaluación de las lechadas, para ello es necesario tener en cuenta la **Tabla 17** en donde se presentan los datos de fábrica de los aditivos utilizados durante la realización del proyecto.

Tabla 17. Costos de fábrica asociados al desarrollo del proyecto.

ITEM	MATERIAL	Presentación de fabrica	Peso de presentación de fabrica	Costo unidad (USD)	Costo unidad (COP)
1	Cemento	1 sx	94,00	12,40	38000,00
2	Controlador de filtrado 1	1 sx	51,12	408,92	1253489,46
3	Controlador de filtrado 2	1 sx	51,12	408,92	1253489,46
4	Antiespumante	1 Gal	8,58	35,00	107286,55
5	Retardante	1 sx	51,12	306,69	940117,09
7	Super-sweep	1 box	15,00	255,00	781659,15
8	GCR	1 ton	2204,62	974,40	2986857,55
9	Acelerante	1 sx	51,12	408,92	1253489,46
10	Extendedor	1 sx	51,12	153,35	470058,55

Es necesario tener en cuenta el valor de la tasa de cambio, la cual es de 3065,33 pesos por dólar, del día 13 de abril del año 2018 para la estimación de los costos de cada uno de los materiales utilizados para la preparación de las lechadas.

7.2.1 Costos asociados a la preparación de la lechada de la sección superior 17 ½” CSG 13 3/8”. A continuación, se explican a fondo los costos unitarios correspondientes a la preparación de las diferentes lechadas evaluadas durante la

realización del proyecto, y las lechadas que se utilizan actualmente en Campo Castilla para las secciones de 13 3/8”.

7.2.1.1 Costos de evaluación de lechada promedio de lechada de la sección superior 17 1/2” CSG 13 3/8”. A continuación, en la **Tabla 18** se puede observar el análisis de costos de desarrollo relacionados a la preparación de una lechada promedio a partir de un saco de cemento y demás aditivos, para la evaluación de un proyecto a nivel de laboratorio.

Tabla 18. Costos asociados a la evaluación de lechada promedio de sección superior
LECHADA SECCIÓN SUPERIOR CSG 13 3/8" LECHADA PROMEDIO

MATERIAL	PRESENTACIÓN	COSTO DE FABRICA (USD)	COSTO DE FABRICA (COP)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO(USD)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO (COP)
Cemento	1 SX	12,4	38000	12,4	38000
Antiespumante	1 GAL	35	107286,55	3,83	11754
Acelerante	1 SX	408,92	1253489,46	5,264	16135,9
TOTAL				USD 21,49	COP 65.889,90

7.2.1.2 Costos de evaluación de lechada PRO para la sección superior 17 1/2” CSG 13 3/8”. A continuación, en la **Tabla 19** se puede observar el análisis de costos de desarrollo relacionados a la preparación de una lechada de cemento a la cual se le ha adicionado GCR en una concentración de 5% BWOC, cuyos cálculos se basan en la preparación de una lechada a partir de un saco de cemento, partiendo esta premisa se tienen en cuenta los cálculos de los pesos de cada uno de los aditivos presentes en una lechada diseñada para la sección superior, con el propósito de realizar la evaluación de un proyecto a nivel de laboratorio.

Tabla 19. Costos asociados a la evaluación de lechada PRO de sección superior.

MATERIAL	PRESENTACION	COSTO DE FABRICA (USD)	COSTO DE FABRICA (COP)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO(USD)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO (COP)
Cemento	1 SX	12,4	38.000	12,4	38.000
Antiespumante	1 GAL	35	107.286,55	3,83	11.754
GCR	1 TON	974,4	2986857,55	0,830923208	2.547,053837
TOTAL				USD 17,06	COP 52.301,05

7.2.2 Costos asociados a la preparación de la lechada de la sección intermedia 12 1/2” CSG 9 5/8”. En los siguientes numerales del capítulo se explican a fondo los costos unitarios correspondientes a la preparación de las

diferentes lechadas evaluadas durante la realización del proyecto, y las lechadas que se utilizan actualmente en Campo Castilla para la sección de 9 5/8”.

7.2.2.1 Costos de evaluación de lechada promedio de lechada de la sección intermedia 12 ½” CSG 9 5/8”. Como se evidencia en la **Tabla 20** se encuentra el análisis de costos de desarrollo relacionados a la preparación de una lechada de cemento a la cual se le ha adicionado microfibras sintéticas Super-Sweep como controlador de pérdida de circulación, cuyos cálculos se basan en la preparación de una lechada a partir de un saco de cemento, desde esta premisa se tienen en cuenta los cálculos de los pesos de cada uno de los aditivos presentes en una lechada diseñada para la sección intermedia, con el propósito de realizar la evaluación de un proyecto a nivel de laboratorio.

Tabla 20. Costos asociados a la evaluación de lechada promedio de sección intermedia.

LECHADA SECCIÓN INTERMEDIA CSG 9 5/8" SUPER SWEEP					
MATERIAL	PRESENTACIÓN	COSTO DE FABRICA (USD)	COSTO DE FABRICA (COP)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO(USD)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO (COP)
Cemento	1 sx	12,3967077	38000	12,3967077	38000
Controlador de filtrado 1	1 sx	408,9248	1253489,457	3,76	11525,6408
Controlador de filtrado 2	1 sx	408,9248	1253489,457	6,016	18441,02528
Antiespumante	1 Gal	35	107286,55	3,834498834	11754,00431
Retardante	1 sx	306,6936	940117,0929	0,7332	2247,499956
Supersweep	1 box	255	781659,15	3,3558	10286,63441
Extendedor	1 sx	153,3468	470058,5464	0,0564	172,884612
TOTAL				USD 30,15	COP 92.427,69

7.2.2.2 Costos de evaluación de lechada PRO para la sección intermedia 12 ½” CSG 9 5/8”. A continuación, en la **Tabla 21** se puede observar el análisis de costos de desarrollo relacionados a la preparación de una lechada de cemento a la cual se le ha adicionado GCR en una concentración de 2% BWOC, cuyos cálculos se basan en la preparación de una lechada a partir de un saco de cemento, desde esta premisa se tienen en cuenta los cálculos de los pesos de cada uno de los aditivos presentes en una lechada diseñada para la sección intermedia, con el propósito de realizar la evaluación de un proyecto a nivel de laboratorio.

Tabla 21. Costos asociados a la evaluación de lechada PRO de sección intermedia.

LECHADA SECCIÓN INTERMEDIA CSG 9 5/8" GCR 2%					
MATERIAL	PRESENTACIÓN	COSTO DE FABRICA (USD)	COSTO DE FABRICA (COP)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO(USD)	COSTO POR UN SACO DE CEMENTO (COP)
CEMENTO	1 SX	12,3967	38000	12,40	38000,00
CONTROLADOR DE FILTRADO 1	1 SX	408,92	1253489,457	3,76	11525,64
CONTROLADOR DE FILTRADO 2	1 SX	408,92	1253489,457	6,02	18441,03
ANTIESPUMANTE	1 GAL	35	107286,55	3,83	11754,00
RETARDANTE	1 SX	306,69	940117,0929	0,73	2247,50
GCR	1 TON	974,4	2986857,552	2,08	6367,63
TOTAL				USD 28,82	COP 88.335,80

7.3 COMPARACIÓN DE COSTOS DE LECHADAS PROMEDIO FRENTE A LECHADAS CON PRESENCIA DE GCR

Es posible observar a través del análisis presentado anteriormente que a partir de la adición del material GCR se obtiene un breve margen de disminución de la inversión como se evidencia en la **Tabla 22** sin embargo, se debe analizar desde el punto de vista técnico, donde este material presenta beneficios más allá del control de pérdidas, ya que es un aditivo multipropósito que puede evitar o disminuir el uso de otros aditivos que aumentan el costo de la lechada.

Tabla 22. Margen de diferencia para la evaluación de un saco de cemento entre las lechadas.

DIFERENCIAL DE COSTOS SECCIÓN SUPERIOR	
USD	COP
USD 4,43	COP 13.588,85
DIFERENCIAL DE COSTOS SECCIÓN INTERMEDIA	
USD	COP
USD 2,58	COP 7.912,47

Es posible concluir de la **Tabla 22** que la variación de costos desde la evaluación de la lechada promedio de Campo Castilla con respecto a la lechada la cual se le adiciona GCR no muestra una diferencia significativa, es decir los valores presentados en las **Tablas 32** y **33** para la sección superior de CSG 13 3/8" es de una reducción del 20.62% de los costos teniendo como base la lechada promedio, y la diferencia de valores enunciados en las **Tablas 34** y **35** para la sección intermedia de CSG 9 5/8" presenta una reducción de los costos del 4.41% con respecto a la lechada a la que se le adiciona Super-Sweep como material de control de pérdida.

Teniendo en cuenta que no es posible realizar la predicción del comportamiento de los costos a través del tiempo debido a que solamente se tiene en cuenta durante la evaluación del desarrollo los costos del proyecto y no los de la implementación, solo se puede determinar los beneficios económicos de la evaluación del GCR con respecto a la lechada promedio. Sin embargo, es posible realizar la comparación de costos de inversión de un barril de lechada convencional con respecto a la lechada adicionada con 5% BWOC de GCR para la sección superficial y para la sección intermedia realizar la comparación de costos de la lechada adicionada con el 0,21% BWOC de Super-Sweep con respecto a la lechada adicionada con el 2% BWOC de GCR.

A continuación, en la **Tabla 23** se pueden observar la comparación de los costos de preparar un barril de lechada para la sección superior entre la lechada convencional y la lechada con 5% BWOC de GCR, donde se puede observar una disminución de costos de 14,83%.

Tabla 23. Comparación de costos para preparar un barril de lechada para la sección superior 17 ½" CSG 13 3/8".

Costos necesarios para la preparación de 1Bbl de lechada			
Lechada sección superior CSG 13 3/8"	USD	COP	Variación
Lechada Convencional	USD 103,46	COP 317.148	14,83%
Lechada con GCR 5% BWOC	USD 88,12	COP 270.130	
Diferencia de costos	USD 15,34	COP 47.018	

De la misma manera en la **Tabla 24** se observa la comparación de costos de preparar un barril de lechada para la sección intermedia donde se comparan la lechada adicionada con 0,21% BWOC de Super-Sweep con la lechada con 2% BWOC de GCR, en la que se observa la disminución de costos al adicionar grano de caucho reciclado para el control de pérdidas.

Tabla 24. Comparación de costos para preparar un barril de lechada para la sección intermedia 12 1/4" CSG 9 5/8".

Costos necesarios para la preparación de 1Bbl de lechada			
Lechada sección intermedia CSG 9 5/8"	USD	COP	Variación
Lechada Convencional con Super Sweep	USD 161,83	COP 496.059	17,99%
Lechada con GCR 2% BWOC	USD 132,71	COP 406.796	
Diferencia de costos	USD 29,12	COP 89.263	

A partir de las **Tablas 37 y 38** es posible determinar que para la preparación de un barril de cemento con adición de grano de caucho reciclado GCR para la sección superior de 17 ½ CSG 13 3/8" se evidencia una disminución de los costos del 14,83% con respecto a la lechada convencional utilizada para esta sección del

pozo, contando con la disminución de 15,35 USD (47.018 COP) de costos al hacer uso del grano de caucho reciclado GCR en lechadas para la sección superior. Para la sección intermedia es posible determinar que para la preparación de un barril de cemento de lechada con adición de grano de caucho reciclado muestra la disminución del 17,99% con respecto al costo de preparar un barril de lechada convencional con adición de material de control de pérdida Super-Sweep, contando con una disminución de costos de 29,12 USD (89.263 COP) entre ambas lechadas de la sección intermedia

Sin embargo, a pesar de obtener valores similares durante la evaluación de costos, se determina que el beneficio visualizado a través de la evaluación del proyecto y análisis de los resultados, se da a nivel técnico debido a que se presentan diferentes mejoras en cuanto a las propiedades de las lechadas, trayendo beneficios a la empresa en caso de su posible implementación, inclusive otro gran beneficio que aporta el desarrollo del proyecto y su futura implementación es el impacto ambiental positivo, ya que se realiza la disposición final de residuos contaminantes que presentan un fuerte problema medioambiental en la actualidad.

8. CONCLUSIONES

A partir de la evaluación del comportamiento del grano de caucho reciclado en las lechadas principales de las secciones superficiales diseñadas para pozos del Campo Castilla, después de realizar posteriormente un análisis de los datos obtenidos de la evaluación, se pudo concluir lo siguiente.

- Las lechadas diseñadas para la sección superior de los pozos de Campo Castilla con una composición superior al 10% BWOC de GCR presentan dificultad en su mezcla, debido a que el tiempo para la mezcla del material sólido de la lechada es mayor al tiempo establecido por la norma.
- Al adicionar GCR a las lechadas de cemento generó el incremento en la viscosidad plástica a medida que aumenta el porcentaje de GCR adicionado a la lechada, de manera contraria el comportamiento del punto cedente disminuyó a medida que aumentó el porcentaje de GCR adicionado, para concentraciones mayores al 3% BWOC de GCR.
- El GCR aumenta el control de filtrado de las lechadas en presencia de otros controladores de filtrado, en donde se redujo 1mL/30min al aumentar en 1% BWOC de GCR sucesivamente.
- La presencia de GCR en las lechadas reduce el tiempo de bombeabilidad en las lechadas diseñadas.
- Durante la prueba de control de pérdida de circulación se determinó que al evaluar la eficiencia de control de la lechada adicionada con Super-Sweep y la lechada con GCR con respecto a la lechada convencional, se concluyó que el GCR presenta mayor control de pérdida.
- Al realizar la evaluación para determinar el punto límite de resistencia a la compresión se evaluaron tres lechadas diseñadas para la sección intermedia, una lechada convencional sin controlador de pérdida, una lechada adicionada con Super-Sweep y otra con GCR. A partir de los datos obtenidos se determinó que lechada adicionada con GCR presentó un aumento del 9% con respecto a la lechada convencional y un aumento del 36% con respecto a la lechada con Super-Sweep.
- La lechada con 5% BWOC de GCR para la sección de superficie mostró una reducción de la resistencia a la compresión de 26,35 %, y un aumento del tiempo de desarrollo de resistencia a la compresión a 50 psi de 33,15% y a 500psi de 29,78%, con respecto a la lechada convencional.

- La lechada con 2% BWOC de GCR para la sección intermedia no presentó un incremento en el desarrollo de resistencia a la compresión a las 24hrs, sin embargo presentó un desarrollo de resistencia a la compresión temprana para 50psi de 25,83% y para 500psi de 24,85% con respecto a la lechada convencional
- A partir de la evaluación de costos se concluyó que la implementación del GCR respecto al Super-Sweep generaba una reducción de costos del 17,99% (Equivalente a 29,12 USD) por barril para la sección de intermedia.
- Por cuestiones de disponibilidad de equipos y costos de las pruebas para el análisis de las propiedades mecánicas, no fue posible correr dicha prueba a las lechadas seleccionadas para las secciones de superficie e intermedia.

9. RECOMENDACIONES

- Es necesario continuar con la investigación del material para obtener repetitividad de datos y así obtener datos concluyentes que permitan llevar a cabo el siguiente paso del desarrollo del proyecto como lo es la implementación en campo.
- Determinar por medio de un análisis exhaustivo o un diseño de experimentos la existencia de valores óptimos de la concentración del aditivo grano de caucho reciclado (GCR).
- Hacer un piloto de pruebas para la implementación de este material en fluidos de perforación.
- Buscar un proveedor del material a nivel nacional buscando una reducción de costos significativa.
- Realizar la evaluación del comportamiento del material en conjunto con otros aditivos de control de pérdida, e inclusive del mismo grano de caucho reciclado (GCR) a distintos tamaños de malla.
- Se recomienda realizar la corrida de pruebas de análisis de propiedades mecánicas (Modulo de Young, Relación de Poisson y Modulo de compresibilidad) a las lechadas de cementación seleccionadas.

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Informe Cuenca Llanos Orientales integración geológica de la digitalización y análisis de núcleos. 2012. 50 p.

----- . Ronda Llanos Orientales 2010. 1 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended practices for testing well Cements. 2011.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y DE CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: El instituto, 2008. 110 p.

----- . Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 4490. Bogotá: El Instituto, 1998, 12 p.

----- . Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 5613. Bogotá: El Instituto, 1998. 8 p.

VENEGAS. L.C. Evaluación del comportamiento del grano de caucho de llanta reciclado en la producción de concreto para la empresa Argos. 2016.

MESA DUARTE, Carlos Alfonso y PINZÓN ARTEAGA, Juan Felipe. Evaluación técnico financiera del uso de nano materiales en lechadas de cemento para revestimiento de producción en Campo Castilla. 2016. 227 p.

SCHLUMBERGER. Well Cementing. 2012. 773 p.

SUPERIOR ENERGY SERVICES. Cementación. 2017.