

DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO, COMO BASE PARA
UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA, PARA YACIMIENTOS CON BAJOS
GRADIENTES DE FRACTURA.

LARRY ANDRÉS GÓMEZ FLÓREZ
KARENT DANIELA TARQUINO NIETO

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

DISEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO, COMO BASE PARA
UNA CEMENTACIÓN PRIMARIA, PARA YACIMIENTOS CON BAJOS
GRADIENTES DE FRACTURA.

LARRY ANDRÉS GÓMEZ FLÓREZ
KARENT DANIELA TARQUINO NIETO

Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIEROS DE PETRÓLEOS

Director
ANGIE TATIANA ORTEGA RAMÍREZ
Ingeniera Química e Ingeniera de Petróleos

Asesor
JOSÉ DAVID VELA
Ingeniero Mecánico

Asesor
ALEJANDRO DE LA CRUZ SASSO
Ingeniero Industrial

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIRÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ
2018

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

BOGOTÁ D.C., Enero de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DIAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Postgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

Dr. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA-PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería

Dr. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI

Director (E) Facultad de Ingeniería de Petróleos

Dr. JOSE HUMBERTO CANTILLO

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

A Dios por llenarme de energía, dedicación y fortaleza para afrontar los retos de la vida diaria y de esta manera poder cumplir este logro.

A mis padres Jacqueline Flórez y Larry Gómez por aguantar junto a mí los malos días y celebrar mis triunfos los amo.

A mi hermana Paula Gómez, por ser ese pilar que tanto he necesitado en mi vida, por sus consejos y su complicidad.

A mi compañera Karent Daniela Tarquino por siempre apoyarme y ser una amiga incondicional durante toda la carrera.

Larry Andrés Gómez Flórez

A Dios por acompañarme día a día y permitirme alcanzar esta meta, por darme la sabiduría, la fortaleza y salud necesaria durante todo el desarrollo de la carrera.

A mis padres Jacqueline Nieto López y Ricaurte Tarquino Becerra, por todo su amor, trabajo y apoyo durante todo el desarrollo de mis proyectos. A mi hermana, por la confianza, amor, fortaleza y consejos brindados día a día.

A mi compañero Larry Andrés Gómez Flórez, por su apoyo incondicional y por enfrentar este reto juntos.

Karent Daniela Tarquino Nieto

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

A Dios, por brindarnos la sabiduría y la fortaleza necesaria, durante la realización y culminación de este proyecto.

A **Ecopetrol** por respaldar el desarrollo de este proyecto.

A los ingenieros **José David Vela** y **Alejandro de la Cruz Sasso**, por su tiempo, guía, apoyo técnico y enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo.

A los laboratorios de **Halliburton** por su apoyo, guía y conocimientos brindados.

A la ingeniera **Angie Tatiana Ortega Ramírez**, por su apoyo, guía y confianza puesta en este proyecto.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	27
OBJETIVOS	28
1. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DE LAS FORMACIONES DE ESTUDIO	29
1.1 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	29
1.1.1 Roca Generadora	29
1.1.2 Roca reservorio	30
1.1.3 Roca sello	30
1.2 GENERALIDADES DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES	30
1.2.1 Localización	30
1.2.2 Columna estratigráfica Cuenca de los Llanos Orientales	32
1.2.2.1 Formación Une (Unidad K2)	33
1.2.2.2 Formación Gachetá (Unidad K1)	33
1.2.2.3 Formación Guadalupe	33
1.2.2.4 Formación Barco	34
1.2.2.5 Formación Los Cuervos	34
1.2.2.6 Formación Mirador	34
1.2.2.7 Formación Carbonera	34
1.2.2.8 Formación León	36
1.2.2.9 Formación Guayabo	36
1.2.3 Columna estratigráfica del Campo Castilla	37
1.2.3.1 Formación Une (Unidad K2)	37
1.2.3.2 Formación Gachetá (Unidad K1)	38
1.2.3.3 Formación Mirador (Unidad T2)	38
1.2.3.4 Formación Carbonera	38
1.2.3.5 Formación Guayabo	38
1.2.4 Formaciones de estudio	38

2. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE UNA LECHADA DE CEMENTACIÓN CON MICRO ESFERAS Y ESPUMADA	39
2.1 CEMENTACIÓN	39
2.1.1 Cementación primaria	39
2.1.2 Cementación secundaria	40
2.2 CEMENTO	40
2.2.1 Aditivos	40
2.2.1.1 Tiempo de Fraguado	41
2.2.1.2 Densidad	41
2.2.1.3 Fricción durante el bombeo	42
2.2.1.4 Pérdida de fluido	42
2.2.1.5 Resistencia a la compresión	42
2.2.1.6 Expansión	43
2.2.2 Tipos de cemento	43
2.2.3 Cementos especiales	45
2.3 CEMENTOS ESPUMADOS	45
2.3.1 Características de los cementos espumados	46
2.3.2 Aplicaciones	48
2.3.2.1 Cementos espumados en yacimientos con bajos gradientes de fractura	49
2.3.2.2 Cementos espumados en Colombia	50
2.3.3 Formulación de la lechada espumada	52
2.3.3.1 Cálculo de los componentes de la lechada base, con o sin surfactantes	52
2.3.3.2 Determinación del volumen y la masa de la lechada	53
2.3.3.3 Ecuaciones adicionales	54
2.3.4 Pruebas de la lechada de cemento espumado	55
2.3.4.1 Determinación de la densidad	55
2.3.4.2 Test de fuerzas compresivas	56
2.3.4.3 Determinación de la permeabilidad	56
2.3.4.4 Tiempo de fraguado	56
2.3.4.5 Determinación de las pérdidas de fluido	57
2.3.4.6 Propiedades Reológicas	57
2.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE CEMENTOS ESPUMADOS VS. CEMENTOS CON MICROESFERAS	57

2.4.1	Propiedades fisicoquímicas del cemento espumado	58
2.4.1.1	Propiedades y características del cemento espumado	58
2.4.1.2	Diseño del cemento espumado	60
2.4.2	Propiedades fisicoquímicas de los cementos con microesferas	61
2.4.2.1	Propiedades físicas del cemento con microesferas	62
2.4.2.2	Beneficios de las microesferas de vidrio en los cementos	62
2.4.2.3	Diseño del cemento con microesferas	63
3.	FORMULACIÓN DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO Y UNA LECHADA DE CEMENTO CON MICROESFERAS A ESCALA LABORATORIO	65
3.1	COMPONENTES GENERALES DE UNA LECHADA DE CEMENTO	65
3.2	COMPONENTES ESPECIALES DE UNA LECHADA DE CEMENTO	67
3.2.1	Microesferas	67
3.2.2	Espuma	67
3.3	SIMULADORES	68
3.3.1	Landmark	68
3.3.1.1	Caso 1: Simulación de un cemento sin espumar (lechada base) con una densidad de 14.5 lb/gal (Landmark)	72
3.3.1.2	Caso 2: Simulación de un cemento espumado con densidad constante de 12 lb/gal (Landmark)	73
3.3.1.3	Caso 3: Simulación de un cemento espumado con densidad constante y calidad de espuma establecida del 25% (Landmark)	75
3.3.1.4	Caso 4: Simulación de un cemento espumado con densidad escalonada entre 12 lb/gal a 12.5 lb/gal (Landmark)	78
3.3.2	iCem Service	80
3.3.2.1	Caso 1: Simulación de un cemento espumado de 12.5 lb/gal utilizando una densidad de lechada base de 16 lb/gal con un modelo de caudal de nitrógeno constante (iCem Service)	81
3.3.2.2	Caso 2: Simulación de un cemento espumado de 12.5 lb/gal utilizando una densidad de lechada base de 14.5 lb/gal con un modelo de caudal de nitrógeno constante (iCem Service)	83

4. CARACTERIZACIÓN DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO Y UNA LECHADA DE CEMENTO CON MICROESFERAS A TRAVÉS DE PRUEBAS DE LABORATORIO	85
4.1 FORMULACIÓN DE UNA LECHADA SIN ESPUMAR CON MICROESFERAS Y UNA LECHADA ESPUMADA	88
4.2 PRUEBAS DE LABORATORIO REALIZADAS A LAS LECHADAS DE CEMENTO	90
4.2.1 Lechada de cemento sin espumar con densidad de 14.5 lb/gal	90
4.2.1.1 Mezclabilidad	90
4.2.1.2 Reología	92
4.2.1.3 Resistencia a la compresión	94
4.2.2 Lechada de cemento espumada	97
4.2.2.1 Densidad	97
4.2.2.2 Reología	98
4.2.2.3 Tiempo bombeable	100
4.2.2.4 Resistencia a la compresión	102
4.3 RESULTADOS	102
4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	104
5. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO EN COMPARACIÓN DE UNA LECHADA CON MICROESFERAS	105
5.1 ANÁLISIS DE LA MEZCLABILIDAD DE LAS LECHADAS	106
5.2 ANÁLISIS DE LA REOLOGÍA DE LAS LECHADAS	106
5.3 ANÁLISIS DENSIDAD Y CALIDAD	107
5.4 ANÁLISIS DE TIEMPO BOMBEABLE	108
5.5 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	108
6. CONCLUSIONES	109
7. RECOMENDACIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	111
ANEXOS	115

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Aceleradores y retardadores más comunes.	41
Cuadro 2. Extendedores y densificantes más comunes.	42
Cuadro 3. Clasificación de los cementos según el API.	44
Cuadro 4. Clasificación de los cementos especiales.	45
Cuadro 5. Uso de cementos espumados en los campos Nutria y Sardinata en Colombia.	51
Cuadro 6. Aditivos compatibles e incompatibles con los cementos espumados.	60
Cuadro 7. Propiedades físicas del cemento con microesferas.	62
Cuadro 8. Beneficios de los cementos con microesferas.	63
Cuadro 9. Papel de la espuma en cementos convencionales vs. cementos espumados.	67
Cuadro 10. Datos de entrada para el simulador Landmark aplicativo Opticem.	68
Cuadro 11. Datos de entrada para el simulado iCem Service.	80

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Formaciones que componen la columna estratigráfica de La Cuenca llanos Orientales con sus espesores.	36
Tabla 2. Respuesta de registros para cementos convencionales vs. Espumados	49
Tabla 3. Cambios en la calidad de la espuma con respecto a cambios de presión y temperatura.	58
Tabla 4. Componentes generales para la formulación de una lechada de cemento convencional.	66
Tabla 5. Información inicial ingresada en el software Landmark.	69
Tabla 6. Casos de simulación en el software Landmark.	69
Tabla 7. Fluidos bombeados al pozo con un cemento sin espumar.	71
Tabla 8. Fluidos bombeados al pozo con un cemento espumado.	72
Tabla 9. Calidad de espuma en cada intervalo.	79
Tabla 10. Variación de la densidad y calidad de la espuma con respecto a la profundidad para una lechada de cemento espumado con modelo de inyección de nitrógeno a caudal constante.	87
Tabla 11. Diseño de lechada de cemento no espumado con microesferas y densidad de 14.5 lb/gal.	88
Tabla 12. Diseño de la lechada de cemento espumado con densidad de 12.5 lb/gal.	88
Tabla 13. Reología del cemento no espumado a temperatura ambiente.	93
Tabla 14. Reología del cemento no espumado a temperatura de fondo.	94
Tabla 15. Reología del cemento espumado a temperatura ambiente.	99
Tabla 16. Tabla de resultados de las pruebas de laboratorio.	103
Tabla 17. Tabla de desempeño de ambas muestras de laboratorio.	105
Tabla 18. VP y PC de los cementos evaluados.	107

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. ECD cemento sin espumar.	70
Gráfico 2. ECD cemento espumado.	71
Gráfico 3. Densidad vs. la profundidad (Caso 1 Landmark).	73
Gráfico 4. Calidad del cemento espumado con una densidad constante de 12lb/gal (Caso 2 Landmark)	74
Gráfico 5. Densidad final vs. Profundidad (Caso 2 Landmark).	75
Gráfico 6. Calidad del cemento espumado con una densidad constante y calidad del 25% (Caso 3 Landmark).	76
Gráfico 7. Densidad final vs. Profundidad (Caso 3 Landmark).	77
Gráfico 8. Calidad del cemento espumado con una densidad escalonada entre 12lb/gal a 12.5 lb/gal (Caso 4 Landmark)	78
Gráfico 9. Densidad final vs. Profundidad (Caso 4 Landmark).	79
Gráfico 10. Presión hidrostática, ECD vs volumen, cemento espumado de 12.5 lb/gal con lechada base de 16 lb/gal (Caso 1 iCem Service).	81
Gráfico 11. Densidad y gradiente hidrostático final vs profundidad (Caso 1 iCem Service)	82
Gráfico 12. Presión hidrostática, ECD vs volumen, cemento espumado de 12.5 lb/gal con lechada base de 14.5 lb/gal (Caso 2 iCem Service).	83
Gráfico 13. Densidad final vs profundidad (Caso 2 iCem Service).	84
Gráfico 14. Prueba de resistencia a la compresión (Método no destructivo-UCA)	96
Gráfico 15. Tiempo bombeable del cemento espumado.	101

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación Campo Castilla Norte.	31
Figura 2. Columna estratigráfica general de la Cuenca de los Llanos Orientales.	32
Figura 3. Columna estratigráfica del campo Castilla	37
Figura 4. Microfotografía de una muestra de cemento espumado.	46
Figura 5. Diseño del cemento espumado.	60
Figura 6. Microesferas de vidrio.	61
Figura 7. Diseño del cemento con microesferas.	64
Figura 8. Árbol de decisión para el cemento a evaluar.	86
Figura 9. Lechada base y lechada espumada.	89
Figura 10. Escala de vórtices, prueba de mezclabilidad.	91
Figura 11. Viscosímetro Fann 35A.	92
Figura 12. Consistómetro Fann 165 AT.	93
Figura 13. Equipo de resistencia a la compresión (Método no destructivo- UCA).	95
Figura 14. Vaso especial del mixer para cementos espumados.	97
Figura 15. Molde de cilindro para prueba de densidad.	98
Figura 16. Dispositivo FYSA.	99
Figura 17. Equipo para la determinación del tiempo bombeable.	100
Figura 18. Prensa hidráulica (método destructivo).	102
Figura 19. Vórtice generado en la lechada sin espumar.	106

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Fracción en masa de surfactante.	52
Ecuación 2. Densidad de la lechada base sin surfactantes.	52
Ecuación 3. Densidad de la lechada espumada.	53
Ecuación 4. Masa de lechada base no espumada con surfactantes.	53
Ecuación 5. Masa de los surfactantes.	53
Ecuación 6. Masa de lechada de cemento base sin surfactantes.	54
Ecuación 7. Fracción de volumen de gas en la lechada espumada final.	54
Ecuación 8. Volumen de la lechada base no espumada.	54
Ecuación 9. Masa de la lechada de cemento base no espumada.	55

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Wellcat.	116

GLOSARIO

ACELERANTE: químico utilizado como aditivo en la lechada de cemento, que reduce el tiempo de fraguado del mismo, sin afectar sus demás propiedades.

ANTIESPUMANTE: agente de control de espuma, cuya función es prevenir la formación de burbujas (espuma) en la lechada de cemento.

BLEND: mezcla de aditivos sólidos.

CBL: CBL en inglés cement bond log, es un registro de adherencia del cemento, que consiste en transmitir ondas acústicas que se transportan a través del cemento y el revestimiento y son reflejadas en un receptor, que transforma la onda acústica a amplitud y es representada en milivoltios (mv).

CEMENTO ESPUMADO: cemento ultraligero, el cual es una mezcla de cemento, gas y un estabilizador.

CEMENTO: mezcla de cemento seco con agua y aditivos, los cuales harán que el cemento adquiera propiedades específicas para poder ser capaz de satisfacer las necesidades del operador.

CENTRALIZADOR: dispositivo que mantiene ya sea la tubería de revestimiento o el liner en el centro del pozo, con el objetivo de asegurar una distribución de los fluidos uniforme a través del anular.

CONSISTÓMETRO: dispositivo utilizado en laboratorio que mide, el tiempo que demora una lechada de cemento en secarse y endurecerse.

CONTACTO CONCORDANTE: contacto entre dos unidades, en las cuales, el contacto se muestra generalmente de forma paralela sin interrupciones.

CONTACTO DISCORDANTE: contacto, que presenta una interrupción en la depositación de una de las unidades, generando un hiato.

CUENCA SEDIMENTARIA: área de la superficie terrestre en el cual se ha acumulado un gran espesor de sedimentos a lo largo del tiempo.

CURADO: baño de agua realizado a los moldes en donde se realizan las pruebas de laboratorio, para mantener las condiciones de temperatura de prueba de la muestra.

DENSIDAD CIRCULANTE EQUIVALENTE (ECD): densidad efectiva que ejerce el fluido cuando se encuentra en circulación. Es igual a la presión hidrostática más las pérdidas de presión en el anular, dividida por la profundidad vertical.

DENSIFICANTE: aditivo de alta gravedad específica que permite aumentar la densidad de la lechada de cemento.

DESESPUMANTE: agente de control de espuma, cuya función es destruir las burbujas (espuma), que se forman en la lechada de cemento.

DISPERSANTE: químico utilizado como aditivo, permite reducir la viscosidad de la lechada de cemento.

DUCTILIDAD: capacidad de un cuerpo de deformarse, sin quebrarse o romperse.

DYCKERHOFF CLASS G: Cemento petrolero de la compañía alemana Dyckerhoff.

ERODABILIDAD: indicador de la erosión que puede tener el suelo por lluvias en el área.

ESPACIADOR: fluido utilizado antes de realizar las operaciones de cementación de pozo, que se caracteriza por su alta viscosidad y que permite la remoción de los

fluidos de perforación y de la torta de fluido, que se encuentran dentro y en el anular del pozo.

EXCENTRICIDAD: describe el grado de descentralización que tiene una tubería dentro de otra tubería o dentro de un hoyo descubierto. Se expresa en porcentaje.

EXTENDEDOR: aditivo que se mezcla con la lechada de cemento que ayuda a reducir la densidad de la misma.

FILLITE: microesferas, aditivo utilizado en los cementos para disminuir la densidad de los mismos.

FYSA: es un instrumento que se adapta al viscosímetro Fann Modelo 35, permitiendo rápida y acertada medición del esfuerzo cortante en fluidos espumados, emulsiones, etc.

GRADIENTE DE FRACTURA: Es la presión necesaria para que un intervalo de roca se fracture y acepte fluidos del pozo.

GRAVEDAD ESPECÍFICA (SG): valor adimensional. Relación existente entre la densidad de un fluido, con respecto a la densidad de un fluido de referencia, como el agua o aire.

HALAD-344: aditivo utilizado como controlador de filtrado, ideal para cementos ultralivianos. Este aditivo promete buen esfuerzo compresivo.

HERRAMIENTA DE ATENUACIÓN: registro que se utiliza para determinar la adherencia del cemento, este se realiza por medio de una onda sonora, cuya atenuación y velocidad dependerán de la roca, el revestimiento y el cemento. Se representa en decibel/pie (db/pie).

HIATO: tiempo geológico donde no se tiene sedimentos ni estratos.

IMPEDANCIA ACÚSTICA: registro que permite determinar la calidad en la adherencia del cemento. Consiste en el producto de la velocidad de la onda por la densidad, se representa en mks rayls (1 rayl equivale a 10 mks rayls).

LECHADA: nombre que se le da al cemento. Consiste en una mezcla de líquidos y sólidos en suspensión.

LIGNOSULFONATO: polímero aniónico muy utilizado como defloculante, es decir que actúa como diluyente.

MICROBURBUJA: burbuja a escala microscópica, generada por el gas que se inyecta al cemento y se mezcla con él.

MICROESFERA: esfera microscópica de vidrio o cerámica hueca, que se encuentra llena de un gas inerte.

MIXER: equipo utilizado en laboratorio que permite mezclar el cemento, agua y aditivos para la formación de una lechada.

PRE-FLUJO: fluido bombeado al pozo antes del cemento para la remoción de contaminantes que se encuentren en el anular entre la formación y el revestimiento.

REÓMETRO: dispositivo utilizado en laboratorio que permite determinar la reología de la lechada de cemento.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: característica que asegura que el esfuerzo compresivo al que será sometido el cemento sea el suficiente, como para cumplir con los requerimientos necesarios.

RETARDANTE: químico utilizado como aditivo en la lechada de cemento, que aumenta el tiempo de fraguado del mismo, sin afectar sus demás propiedades.

RETROGRESIÓN: retroceso, ir hacia atrás, desarrollo hacia atrás.

ROCA GENERADORA: roca rica en materia orgánica, la cual, a condiciones de presión y temperatura específicas genera petróleo o gas. Generalmente la mayoría de rocas generadores en el mundo son lutitas o calizas.

ROCA RESERVORIO: roca que permite la acumulación y el flujo de petróleo o gas en ella debido a sus propiedades de porosidad y permeabilidad.

ROCA SELLO: roca relativamente impermeable la cual evita que el petróleo o gas siga migrando hacia la superficie.

SCR-100: aditivo para cementos, utilizado como retardador que ayuda a simplificar el diseño de lechadas tixotrópicas.

SILICALITE: aditivo para cementos, se puede usar como extendedor en cementos ultralivianos y como potenciador de esfuerzo compresivo para bajas temperaturas.

SURFACTANTE: sustancia química que reduce la tensión interfacial entre dos fluidos, debido a que esta es absorbida preferentemente por una de las interfaces.

TIXOTRÓPICO: capacidad de un fluido, para desarrollar resistencia de gel con el tiempo cuando se encuentra estático y volver a tener fluidez cuando es agitado.

TUBERÍA CONCÉNTRICA: se considera que la tubería tiene un 0% de excentricidad, es decir que se encuentra perfectamente centrada en la tubería externa o pozo.

TUBERÍA EXCÉNTRICA: se considera que la tubería tiene un 100% de excentricidad, es decir que la tubería esta recostada contra el diámetro interno de otra tubería o a las paredes del pozo.

ZONESEALANT 2000: surfactante o espumante que se utiliza como aditivos en lechadas de base agua fresca o agua salada, para aplicaciones en cementos espumados.

ABREVIATURAS

%	porcentaje
°F	grados Fahrenheit
ANH	Agencia Nacional de Hidrocarburos
API	Instituto Americano del Petróleo
CBL	cement bond log (registro de adherencia del cemento)
cm³	centímetros cúbicos
CMHEC	carboximetil hidroxietilcelulosa
Cp	Centipoise
db/pie	decibel por pie
ECD	densidad circulante equivalente
gr	gramos
IA	impedancia acústica
Kg/m³	kilogramos por metro cubico
Km²	kilómetro cuadrado
lb/gal	libras por galón
ma	masa de aditivos
mc	masa del cemento
MD	profundidad medida
MMBO	millones de barriles de petróleo
ms	masa de surfactante
mufs	masa de lechada de cemento base sin surfactante
mufss	masa de lechada base no espumada con surfactante
mv	milivoltios
mw	masa de agua
Psi	libra por pulgada cuadrada
RPM	revoluciones por minuto

SG	gravedad específica
TOC	contenido total de materia orgánica
Va	volumen absoluto de aditivos
Vc	volumen absoluto de cemento
Vmc	volumen de mezcla
Vp	viscosidad plástica
Vus	volumen de la lechada base no espumada
Vw	volumen de agua
WOC	wait on cement (esperando fraguado del cemento)
ws	fracción en masa de surfactante
YP	yield point o punto cedente (PC)
pbwos	densidad de lechada base sin surfactante
Pfs	densidad de la lechada espumada
puffss	densidad de la base de lechada de cemento no espumada con surfactante
φg	fracción de volumen de gas requerido en la lechada de cemento espumado final

RESUMEN

En el presente proyecto se desarrolla el diseño de una lechada de cemento espumado como base para una cementación primaria, a escala laboratorio para el pozo de estudio, el cual tiene un bajo gradiente de fractura en la zona de producción.

En el proyecto desarrollado se busca comparar las propiedades, ventajas y diferencias de un cemento ultraliviano con microesferas y uno espumado; teniendo en cuenta que la formulación de la lechada se realizó para un yacimiento altamente depletado, fracturado y con bajo gradiente de fractura.

Se comienza con una descripción de las generalidades y características del Campo Castilla Norte donde se encuentra la ubicación actual del pozo de estudio, seguido a esto se encuentra una compilación teórica de términos clave de los trabajos y operaciones de cementación, junto con las propiedades fisicoquímicas de una lechada con microesferas y una espumada. Posteriormente se encuentra la formulación de las dos lechadas evaluadas por medio de dos softwares, Landmark con su aplicativo Opticem y iCem Service. Finalizando, con la caracterización de las muestras de cemento a través de pruebas de laboratorio.

El diseño se realiza, considerando las necesidades del pozo a cementar, las características geológicas del mismo y las condiciones de presión y temperatura a las que el cemento va a ser sometido, esto se lleva a cabo por medio de la simulación de diferentes casos, que permitieron la variación de variables y la evaluación de diferentes escenarios con el fin de determinar el modelo adecuado, teniendo en cuenta que se usó como simulador inicial el aplicativo Opticem de Landmark y como software de verificación de resultados iCem Service.

Palabras clave:

Cementación primaria.

Campo Castilla Norte.

Lechada espumada.

Microesferas.

Yacimientos con bajos gradientes de fractura.

INTRODUCCIÓN

El proceso de cementación consiste en la realización de una lechada, que comprenden al mezclado del cemento, agua y aditivos a esta para bombearla al pozo a través del revestimiento hacia puntos críticos en el anular, entre la formación y el casing. La lechada básica consiste en un cemento con unas características establecidas en la norma API - 10B.

En la actualidad, los trabajos de cementación presentan varios retos al encontrarse con formaciones fracturadas y yacimientos altamente depletados, por esta razón en el diseño y formulación de las lechadas se implementan aditivos especiales que permiten modificar las propiedades del cemento a mayor escala que con el uso de aditivos convencionales. En el caso de la densidad del cemento se tiene como aditivo especial la espuma generada por la inyección de nitrógeno o aire comprimido a una lechada base, que permiten disminuir el valor de esta propiedad.

Según Castañeda y Díaz¹, lo que diferencia al cemento espumado del convencional es que dentro de su mezcla contiene una lechada de cemento, agentes espumantes y un gas. Esto generará burbujas microscópicas las cuales no se unirán ni migrarán, y se obtendrá un cemento con baja densidad en su matriz.

Con el uso de lechadas espumadas, la presión hidrostática generada por el proceso de bombeo de este cemento a través del anular entre la formación y el revestimiento, va a ser menor en comparación con una lechada de cemento convencional, debido a las bajas densidades que el cemento espumado puede lograr a través de las burbujas microscópicas que se forman en su matriz, por lo tanto estos son de gran utilidad para yacimientos cuyos gradientes de fractura sean muy bajos, puesto que el riesgo de fracturar la formación es grande si no se utilizan los fluidos con las características de densidad adecuadas.

En el caso de Campo Castilla, en las lechadas de cementación, se está utilizando microesferas como aditivo alivianante, pero la densidad de la mezcla aún está por encima del gradiente de fractura de las formaciones productoras, por esta razón se propone la aplicación de un cemento espumado teniendo en cuenta las características geológicas de la zona y las necesidades del pozo a cementar.

¹ CASTAÑEDA, Carlos y DÍAZ, Leonardo. Evaluación de la Tecnología de Cementos Espumados en los Campos Nutria Y Sardinata. 2011.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una lechada de cemento espumado, como base para una cementación primaria, para yacimientos con bajos gradientes de fractura.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Describir las características geológicas de las formaciones que atraviesa un pozo de estudio.
- Describir las propiedades fisicoquímicas de una lechada de cementación ultraligera y una lechada espumada.
- Formular una lechada de cemento espumado y una lechada ultraligera a escala laboratorio para la fase X de la perforación del pozo de estudio teniendo en cuenta norma API 10B-4.
- Caracterizar a través de pruebas de laboratorio el comportamiento de las lechadas, para la determinación de los valores de las variables de estudio de ambas lechadas.
- Evaluar el desempeño de una lechada de cemento espumado en comparación con la ultraligera mediante resultados de pruebas de laboratorio.

1. GENERALIDADES GEOLÓGICAS DE LAS FORMACIONES DE ESTUDIO

En el presente capítulo, se describen las formaciones correspondientes a la columna estratigráfica general del Campo Castilla, las cuales serían atravesadas por el pozo de interés para llegar al objetivo o *target*. Se analizan las formaciones Gachetá (Unidad K1), Une (Unidad K2) y Mirador las cuales son de interés para el desarrollo del proyecto.

El Campo castilla pertenece a la Cuenca de los Llanos Orientales, la cual presenta características como formaciones naturalmente fracturadas y bajos gradientes de fractura. Al ser un campo maduro, la zona está altamente depletada, es decir, a comparación de años anteriores, la presión que maneja el yacimiento es considerablemente baja, causando que los fluidos que quedan en el yacimiento no se muevan con tanta facilidad hacia el pozo, lo que hace que las formaciones sean más frágiles y con ello más costosa la operación.

1.1 GEOLOGÍA DEL PETRÓLEO DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

Esta cuenca cuenta con más de 1500 MMBO de petróleo recuperable², contiene dos campos gigantes y tres campos mayores, la composición de su crudo corresponde al 68.9%³ de crudos pesados, el 12.8%⁴ de crudos medianos y 5.6%⁵ de crudos livianos. La cuenca cuenta con una porosidad media lo que le permite tener una capacidad de almacenamiento relativamente buena, con una saturación de agua entre el 37.3% y 76.9%⁶.

1.1.1 Roca Generadora. La roca generadora de esta cuenca consiste en una mezcla de lutitas marinas y continentales de la Formación Gachetá⁷, además de esto, se han realizado estudios que comprueban la existencia de kerógeno tipo II y III⁸ con un rango de (TOC) entre 1-3% y un espesor efectivo de 150-300 pies⁹.

² BARRERO, Darío, et al. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá. ANH and B&M Exploration Ltda., 2007.

³ MALAGON, Jonathan. La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia. Göteborg. 2016. Pg16

⁴ Ibid. Pg 16.

⁵ Ibid. Pg 16.

⁶ Ibid. Pg 16.

⁷ BARRERO, Darío, et al. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá. ANH and B&M Exploration Ltda., 2007. Pg 71

⁸ Ibid. Pg 71

⁹ Ibid. Pg 71

1.1.2 Roca reservorio. Según Barrero et al¹⁰, las formaciones Mirador y las unidades operacionales C3, C5 y C7 de las Formación Carbonera son los mejores reservorios de la cuenca. El espesor de estas formaciones incrementa hacia la parte Oeste, en cambio, su porosidad disminuye en la misma dirección, de 30% a casi 10%¹¹ sin excepción.

1.1.3 Roca sello. A pesar de que se considera la Unidad C8 de la Formación Carbonera el sello regional, el mejor sello es la unidad C2. Por otro lado, las formaciones Gachetá, y Guadalupe, al poseer intercalaciones de lutitas incluyen yacimientos tipo “pares arena-sello”.

1.2 GENERALIDADES DE LA CUENCA DE LOS LLANOS ORIENTALES

El Campo Castilla de Ecopetrol S.A pertenece a uno de los tres campos más importantes dentro de la cuenca de los Llanos Orientales, y cuyas características geológicas son de importancia para el desarrollo de este estudio.

Las unidades K1 y K2 como formaciones de estudio, presentan características idóneas para la evaluación de un cemento espumado, puesto que estas formaciones son naturalmente fracturadas y se encuentran depletadas.

1.2.1 Localización. El Campo Castilla ésta localizado en la cuenca de los Llanos Orientales, la cual según la ANH cubre una extensión de 225.603¹² Km², y se divide principalmente en tres campos, Rubiales, Quifa y Castilla.

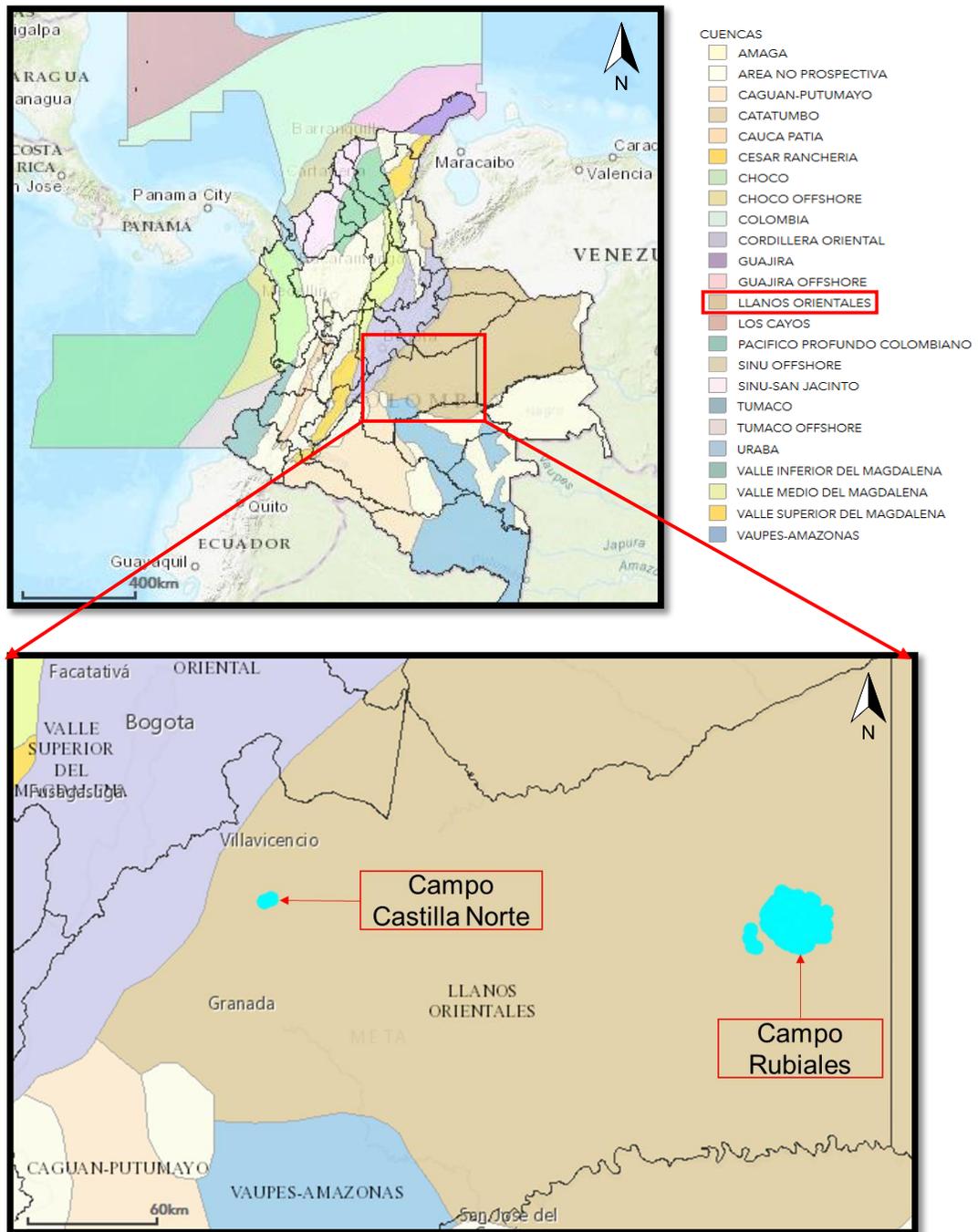
El campo Castilla está ubicado a unos 144 km de Bogotá (como se puede observar en la **Figura 1**) y a 54 km de la capital del Departamento del Meta, Villavicencio; para acceder a este campo, se debe hacer un recorrido desde Bogotá hasta Villavicencio de 95 km, desde ahí, se deben recorrer 60 km por la vía Villavicencio-Acacias-Guamal y Castilla la Nueva. Finalmente, recorrer 200 metros más al sur del campo Chichimene.

¹⁰ BARRERO, Dario, et al. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Bogotá. ANH and B&M Exploration Ltda., 2007. Pg 71

¹¹ Ibid. Pg 71

¹² Ibid. Pg 71.

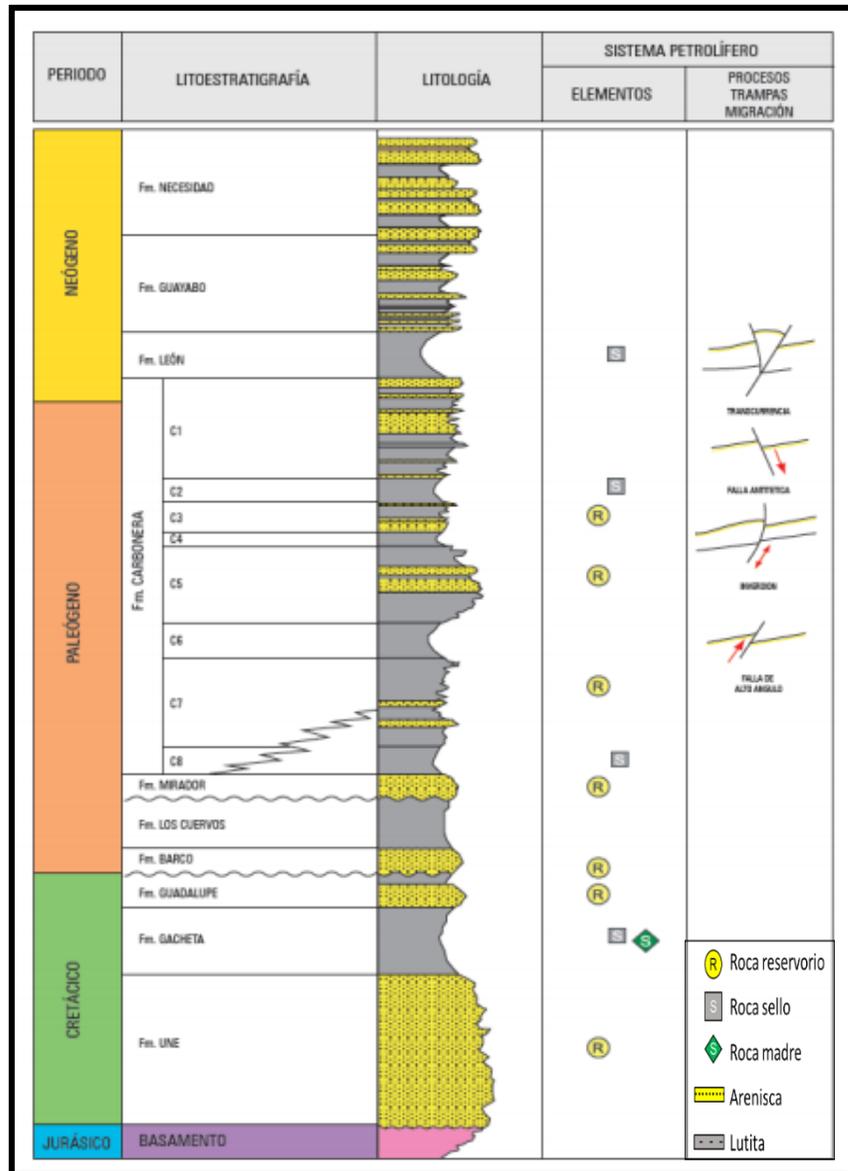
Figura 1. Ubicación Campo Castilla Norte.



Fuente: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Banco de información petrolera. [0]. [Consultado el Nov 1,2017]. Disponible en: http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Geovisor_BIP/.

1.2.2 Columna estratigráfica Cuenca de los Llanos Orientales. La Geología de los Llanos Orientales consiste en una serie de rocas cuyas edades comprenden desde el período Cretácico hasta el día de hoy, en la **Figura 2** se observa la representación de la columna estratigráfica de los Llanos Orientales.

Figura 2. Columna estratigráfica general de la Cuenca de los Llanos Orientales.



FUENTE: ANH. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. 2012. p. 46.

A continuación, se muestra un breve resumen de las formaciones más representativas de la cuenca de los Llanos Orientales.

1.2.2.1 Formación Une (Unidad K2). La edad de la formación se considera en un rango límite que pertenece al cretácico temprano, la cual, según la ANH “litológicamente consiste, principalmente (sic), de areniscas cuarzosas con intercalaciones menores de lutitas y de limolitas carbonosas. La formación K2 varía en espesor desde 0 a 650 pies”¹³, esta formación en el piedemonte llanero alcanza un espesor máximo de 650 pies¹⁴, pero se encuentra ausente en zonas más hacia el oriente de la cuenca.

1.2.2.2 Formación Gachetá (Unidad K1). La edad de la formación Gachetá se estima dentro del cretácico tardío entre el coniaciano y el santoniano. Está conformado en su mayoría por lutita, dentro de las cuales se encuentran bancos de calizas, areniscas y calizas arenosas. El espesor máximo es de 600 pies¹⁵. El ambiente de depositación de la unidad K1 se interpreta como transicional a marino somero y posee un contacto discordante con el basamento inferior, mientras que con la formación Guadalupe presenta un contacto concordante.

1.2.2.3 Formación Guadalupe. Esta formación corresponde a la edad campaniano, la cual, según la ANH en su trabajo de Integración Geológica de la digitalización y análisis de núcleos, “consiste en una secuencia de areniscas masivas, con pequeñas intercalaciones de lutitas, a veces con pequeñas capas de carbón.”¹⁶ Con un espesor máximo hacia el piedemonte de 600 pies¹⁷, posee en su base un contacto concordantemente con la formación Gachetá y en el tope contacta discordantemente con la formación Barco.

¹³ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012.

¹⁴ Ibid. Pg 48.

¹⁵ Ibid. Pg 48.

¹⁶ Ibid. Pg 48.

¹⁷ Ibid. Pg 48.

1.2.2.4 Formación Barco. La edad de la formación Barco corresponde al periodo terciario, entre el paleoceno tardío y el eoceno temprano. Según Sánchez, et al¹⁸, la formación Barco está compuesta por areniscas fluviales, el cuál es un importante reservorio, con un espesor que varía entre los 492 y 912 pies¹⁹. Los contactos tanto superiores e inferiores con otras formaciones son concordantes.

1.2.2.5 Formación Los Cuervos. Esta formación data del paleoceno superior al eoceno inferior, consta de lutitas carbonáceas, arcillolitas intercaladas con limolitas, areniscas y carbones. Esta formación tiene un espesor promedio de 1607 pies²⁰ con un ambiente de depositación continental de llanura fluvial o costera. El contacto inferior con la formación Barco es concordante y contacta en el tope discordantemente la formación Mirador.

1.2.2.6 Formación Mirador. El rango posible para la edad de la formación Mirador abarca el eoceno medio- tardío, según la ANH “Hasta el presente, las areniscas de esta formación constituyen el reservorio más importante de la cuenca, las cuales poseen buenas propiedades petrofísicas. Se trata de un conjunto de areniscas masivas con diferentes granulometrías.”²¹ La formación Mirador es discordante sobre la formación Los Cuervos y en el tope contacta concordantemente a la formación Carbonera. Su espesor máximo alcanza los 950 pies²².

1.2.2.7 Formación Carbonera. Según Sánchez et al²³, la formación Carbonera corresponde a intercalaciones transgresivas de lutitas y arenas. Según la ANH “Elf Aquitaine dividió esta unidad en 8 miembros o unidades operacionales C1 a C8”²⁴, en donde los niveles pares son sellos y los niveles impares arenas.

➤ **Unidad C8.** Esta unidad presenta un espesor variable de 50 pies en el borde oriental de la cuenca hasta 400 pies²⁵.

¹⁸ SANCHEZ,N., et al. Petroleum system modeling in the Eastern Cordillera of Colombia using geochemistry and timing of thrusting and deformation. Agosto 15. p. 1537-1556

¹⁹ Espinosa, Camilo y Gaviria, Gustavo. Diseño de una lechada alivianada para una cementación de liner de 7” en el campo Castilla. 2014. Pg 35

²⁰ Espinosa, Camilo y Gaviria, Gustavo. Diseño de una lechada alivianada para una cementación de liner de 7” en el campo Castilla. 2014. Pg 35

²¹ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012.

²² Ibid, Pg. 49

²³ SANCHEZ,N., et al. Petroleum System Modeling in the Eastern Cordillera of Colombia using Geochemistry and Timing of Thrusting and Deformation. p. 1537-1556

²⁴ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012. Pg 50

²⁵ Ibid. Pg 51

- **Unidad C7.** compuesto por areniscas depositadas en ambientes marino-someros, deltaicos y continentales. Según la ANH “pueden alcanzar 250 a 280 pies de espesor en la parte central de la cuenca.”²⁶
- **Unidad C6.** Unidad arcillosa, la cual hacia la zona central de la cuenca llega a tener un espesor promedio de 100 a 150 pies²⁷.
- **Unidad C5.** Esta unidad, está compuesta por una intercalación de lutitas, y arenas poco consolidadas. Su espesor total varía de 50 a 300 pies²⁸.
- **Unidad C4.** Está compuesta por una alternancia de capas de areniscas, limolitas y lutitas. Su espesor esta entre 150 a 300 pies²⁹ con un máximo espesor de 700 pies³⁰. Según la ANH “No siempre son evidentes las características litológicas de esta unidad, especialmente en el sector suroeste de la cuenca”³¹
- **Unidad C3.** Unidad compuesta principalmente por una alternancia de areniscas finas a gruesas y algunos pues de limolitas y arcillolitas, esta unidad cuenta con un espesor promedio de 150 pies³².
- **Unidad C2.** Esta unidad está compuesta por lutitas grises y algunas limolitas, con un espesor de 100 a 200 pies³³ y según la ANH “después de la formación León, es el sello mejor desarrollado y el de mayor extensión hacia el este”³⁴.
- **Unidad C1.** Esta unidad es la última unidad de las secuencias arenosas de la Formación Carbonera, se encuentra sellada por las lutitas de la formación León y está compuesta principalmente por cuerpos arenosos separados por delgados niveles de limolitas. El espesor de esta unidad puede alcanzar los 2000 pies³⁵ antes de llegar al piedemonte.

²⁶ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012. Pg 51

²⁷ Ibid. Pg 51

²⁸ Ibid. Pg 51

²⁹ Ibid. Pg 51

³⁰ Ibid. Pg 51

³¹ Ibid. Pg 51

³² Ibid. Pg 51

³³ Ibid. Pg 52

³⁴ Ibid. Pg 52

³⁵ Ibid. Pg 52

1.2.2.8 Formación León. Esta formación presenta la invasión más reciente de los mares terciarios a la cuenca. Compuesta por capas gruesas de lutitas. Con unos espesores máximos de 2500 pies³⁶.

1.2.2.9 Formación Guayabo. Esta formación pertenece al mioceno tardío y representa la última sedimentación de la cuenca. Según la ANH “Está constituido por una alternancia de arcillolitas muy solubles y areniscas mal seleccionadas, finas a muy gruesas”³⁷. Esta formación cuenta con un espesor máximo en el piedemonte de la cordillera de más de 13000 pies³⁸.

En la **Tabla 1** se muestran las formaciones que componen la columna estratigráfica de los Llanos Orientales junto con sus espesores.

Tabla 1. Formaciones que componen la columna estratigráfica de La Cuenca llanos Orientales con sus espesores.

Formación		Espesor
Necesidad		-
Guayabo		Más de 13000 pies.
León		2500 pies (espesor máximo).
Carbonera	C1	2000 pies antes de llegar al piedemonte.
	C2	100 – 200 pies (rango).
	C3	150 pies (espesor máximo).
	C4	700 pies (espesor máximo).
	C5	50 – 300 pies (rango).
	C6	100 – 150 pies (rango).
	C7	250 – 280 pies (rango).
	C8	50 – 400 pies (rango).
Mirador		950 pies (rango).
Los cuervos		1607 pies (espesor máximo).
Barco		492 – 912 pies (rango).
Guadalupe		600 pies (espesor máximo).
Gacheta		600 pies (espesor máximo).
Une		0 – 650 pies (rango).

Fuente: Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012.

³⁶ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012. Pg 52

³⁷ Ibid. Pg 52

³⁸ Ibid. Pg 52

1.2.3 Columna estratigráfica del Campo Castilla. Asumir que la estratigrafía de un pozo, en una determinada ubicación de una cuenca sea la misma a la estratigrafía general de la cuenca puede llevar a generar muchos errores. En la **Figura 3** se observa la columna estratigráfica del campo Castilla para el pozo de estudio.

Figura 3. Columna estratigráfica del campo Castilla

Periodo	Litoestratigrafía		Litología	Profundidad (pies)	Espesor MD (pies)
	Formación	Unidad operacional			
Neogeno	Guayabo	Guayabo		28 - 1425	1397
		Carbonera	Areniscas superiores		1425 - 1927
Unidad Lutita E			1927 - 2593	666	
Unidad C1			2593 - 3704	1111	
Unidad arenisca de Carbonera			3704 - 3964	260	
Unidad C2			3964 - 5703	1739	
Unidad E3			5703 - 6144	441	
Unidad T1			6144 - 6383	239	
Unidad E4			6383 - 6755	372	
Paleogeno	Mirador	Unidad T2		6755 - 6940	185
		Gachetá	Unidad K1 Superior		6940 - 7105
Unidad K1 Inferior			7105 - 7249	144	
Une	Unidad K2			TD. 8096	

convenciones

 Arenisca

 Lutita

Fuente: VELEZ, Johana. Programa de Perforación Pozo Castilla Norte & nbsp; [0]: Bogotá: Ecopetrol, 2016. 10-11.

1.2.3.1 Formación Une (Unidad K2). Según Sanchez, et al³⁹ la Formación Une consiste en arenas basales de origen fluvial hasta marino. Se considera que la formación en el piedemonte llanero alcanza un espesor máximo de 650 pies⁴⁰.

³⁹ SANCHEZ,N., et al. Petroleum System Modeling in the Eastern Cordillera of Colombia using Geochemistry and Timing of Thrusting and Deformation. p. 1537-1556

⁴⁰ Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica De La Digitalización Y Análisis De Núcleos. La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012. Pg 48.

1.2.3.2 Formación Gachetá (Unidad K1). Esta unidad en el Campo Castilla y por consiguiente en el pozo se divide en dos unidades, Unidad K1 superior y Unidad K1 inferior, donde la unidad inferior contiene areniscas cuarzosas de grano fino, lutitas carbonosas y limolitas mientras que la Unidad K1 superior, está compuesta principalmente por lutitas carbonosas intercaladas con niveles de areniscas.

1.2.3.3 Formación Mirador (Unidad T2). Esta unidad se considera la misma Formación Mirador. Sin embargo, por facilidad de reconocimiento Ecopetrol la llama Unidad T2. La unidad corresponde a una secuencia de arenisca cuarzosa de grano medio a grueso, con intercalaciones de lutitas y con algunas manifestaciones de hidrocarburos.

1.2.3.4 Formación Carbonera. Debido a la dificultad que existe en la zona del departamento del Meta para diferenciar las unidades operacionales de la Formación Carbonera, Ecopetrol las divide en 8 zonas guiándose por las propuestas anteriormente por Elf Aquitaine de esta forma; C8 como Unidad E4; C7 como Unidad T1; C6 como “Lutita E3”; C5 y C4 como “Conjunto C2”; C3 como “Areniscas de carbonera” y “Conjunto C1”; C2 como “Lutita E” y finalmente la C1 como “Areniscas superiores de Carbonera”.

1.2.3.5 Formación Guayabo. Esta formación, al estar más cerca de la superficie, ha estado expuesta a procesos de erosión y cambios climáticos ocurridos recientemente, es por esto que la selección de la arena depositada es mala, pues tiene intervalos de arenisca cuarzosa de gran tamaño y otros intervalos con areniscas de tamaño medio a fino.

1.2.4 Formaciones de estudio. Dentro de las formaciones de la columna estratigráfica que contacta el pozo de interés en el Campo Castilla, se pueden resaltar la Formación Une (unidad K2), Gacheta (Unidad K1) y Mirador (unidad T2), las características y propiedades geomecánicas de estas formaciones son de interés en la industria, puesto que todas las lechadas de cementación livianas actualmente utilizadas en los trabajos de cementación manejan un rango de densidad entre 13 y 14,5 lb/gl, lo cual evidencia que en estas dos zonas las operaciones y trabajos de cementación se están manejando en el límite o por encima de los gradientes de fractura.

Es importante resaltar que, para las tres formaciones anteriormente mencionadas, la densidad de los fluidos con los cuales se puede llegar a fracturar la formación se encuentran alrededor de 12 lb/gl; esto hace que las formaciones Une, Gachetá y Mirador puedan ser candidatas para el uso de lechadas de cemento ultraliviano de espuma, que hace referencia al objeto del presente proyecto.

2. PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DE UNA LECHADA DE CEMENTACIÓN CON MICRO ESFERAS Y ESPUMADA

En este capítulo se desarrolla una compilación teórica de las características más importantes de los trabajos de cementación que se realizan en pozo, teniendo en cuenta las diferentes clasificaciones de los cementos y las operaciones de cementación de la industria petrolera para garantizar la integridad del mismo.

Es importante identificar las propiedades del cemento a utilizar en el trabajo de cementación, pues de acuerdo a estas, se realizará el correcto diseño de la lechada, con el fin de poder satisfacer las necesidades del pozo, una vez se haya bombeado el cemento. De lo contrario se generará daño de formación y no se obtendrán los resultados esperados durante las operaciones de cementación.

2.1 CEMENTACIÓN

La cementación de los pozos petroleros es una actividad de importancia, que asegura la vida productiva del pozo, dando a este: aislamiento zonal, estabilidad y protección de las formaciones perforadas.

Según Nelson⁴¹, el proceso de cementación puede ser de dos tipos: primaria y remedial; la cementación primaria consiste en el bombeo de una lechada a través del espacio anular entre la formación y la tubería de revestimiento y la remedial es utilizada en procesos de reparación de pozo o para su abandono.

2.1.1 Cementación primaria. La cementación primaria se realiza dependiendo del tipo de revestimiento que se va a instalar en pozo. Las funciones de la cementación primaria son proteger acuíferos someros, brindar soporte al revestimiento, sellar presiones anormales, aislar zonas de pérdidas de circulación y proteger al revestimiento de corrosión debido a fluidos de las diferentes formaciones.

Este proceso consiste en el desplazamiento del fluido a través del pozo, operación en la cual, la mezcla de lechada de cemento es bombeada a través de la tubería, llegando al fondo del pozo y dirigiéndose al espacio anular entre la formación y el revestimiento. Se deben hacer los cálculos correctos para que el desplazamiento del cemento llegue exactamente a la zona que se pretende cementar.

Para terminar las operaciones de cementación, es necesario dejar que el cemento fragüe (tiempo en el que se espera a que el cemento se haya secado

⁴¹ NELSON, Erik. Fundamentos de la cementación de pozos. En: Oilfield Review. 2012. Vol. 24, No. 2.p.63

completamente) y adquiera consistencia, por esta razón, el tiempo de fraguado es una variable importante en el proceso, permitiendo continuar con la perforación.

La operación de cementación primaria tiene que ser realizada de manera exitosa para evitar aumentos en costos, generados por un mal trabajo, lo cual llevará a posibles operaciones de cementación remedial.

2.1.2 Cementación secundaria. Este tipo de cementación se divide en:

- **Squeeze.** Operación en donde según Schlumberger⁴² una columna de cemento es inyectada a altas presiones a la formación por medio de perforaciones, esta operación se puede hacer durante la perforación o el workover.
- **Re cementación.** Este tipo de cementación secundaria consiste en circular cemento el cual atravesará perforaciones que están por encima y por debajo de la zona que se desea remediar.
- **Tapón de cemento.** Cemento que es bombeado a altas presiones, bien sea para abandonar el pozo, aislar zonas con pérdidas de circulación y para neutralizar influjos de agua en el fondo del pozo.

2.2 CEMENTO

El cemento consiste en una mezcla de cemento con agua, añadiendo diferentes aditivos, los cuales dependerán de las necesidades del pozo, las características geológicas de la formación y la sección perforada que se va a cementar.

2.2.1 Aditivos. El cemento, como se ha mencionado anteriormente consiste en una mezcla de cementos, aditivos y agua; el cemento portland (así llamado en honor a la isla donde se encontró una piedra similar para la construcción), necesita de unos aditivos específicos para poder realizar con éxito los trabajos que se requieren y que este pueda operar en los rangos de presión y temperatura del pozo.

Los aditivos son materiales que modifican algunas propiedades del cemento, como: El tiempo de fraguado, la densidad, la fricción durante el bombeo; además de estos, existen otros aditivos que, según Schlumberger⁴³ no pueden ser agrupados adecuadamente, los cuales se encargan de controlar propiedades de la lechada, como la tixotropía, esfuerzo de gel, espuma, expansión, y canalización de gas.

⁴² SCHLUMBERGER, Dowell. Cementing Technology. 1984.

⁴³ SCHLUMBERGER, Dowel. Cementing Technology. 1984. Cap.6 P.13

2.2.1.1 Tiempo de Fraguado. El tiempo de fraguado es el tiempo en el que la lechada de cemento se demora en secar. Los aditivos para el manejo de esta propiedad consisten en materiales que reducen o alargan el tiempo de secado del cemento.

Se conocen como aceleradores, los aditivos que disminuyen el tiempo de fraguado y retardadores los que lo aumentan. En la **Cuadro 1**, se muestran los aditivos que varían el tiempo de fraguado.

Cuadro 1. Aceleradores y retardadores más comunes

Aceleradores	Retardadores
Cloruro de calcio	Lignosulfonato de calcio
Silicato de sodio	Carboximetil Hidroxietilcelulosa (CMHEC)
Cloruro de sodio a bajas concentraciones	Cloruro de sodio a altas concentraciones
Agua marina	Bórax
Yeso	La mayoría de aditivos para el control de perdidas
Cloruro de amonio	

FUENTE: SUMAN, George .Cementing Handbook. 1997. P. 24

Como se evidencia en la **Cuadro 1** el uso de aditivos para modificar el tiempo de fraguado de la lechada de cemento, tiene que realizarse con cuidado, puesto que dependiendo de la concentración que se agregue, el resultado puede variar. Como por ejemplo: Al agregar cloruro de sodio a bajas concentraciones, este disminuye el tiempo de fraguado, pero si se agrega más de lo necesario se obtendrá el efecto contrario.

2.2.1.2 Densidad. La densidad es una unidad escalar, la cual consiste en la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Esta propiedad puede ser controlada, con el uso de extendedores, los cuales reducen la densidad de la lechada o con densificantes, los cuales la aumentan.

En el **Cuadro 2**, se muestra tanto los extendedores como los densificantes más utilizados en la industria.

Cuadro 2. Extendedores y densificantes más comunes.

Extendedores	Densificantes
Bentonita	Barita
Puzolana	Hematita
Tierras Diatomáceas	Ilmenita
Metasilicato de sodio	Dispersantes
Gilsonita	Sal
Carbón triturado	

FUENTE: SUMAN, George. Cementing Handbook. 1997. P. 25, 26.

2.2.1.3 Fricción durante el bombeo. La fricción es la fuerza de rozamiento que se da por el contacto de dos cuerpos o sustancias. Esta propiedad se maneja con el uso de dispersantes, los cuales reducen el Yield Point (YP) y permiten la turbulencia a bajas tasas de bombeo.

2.2.1.4 Pérdida de fluido. La pérdida de fluido es cualquier fuga o filtración de la fase líquida de un fluido, en este caso la filtración de lechada de cemento hacia las formaciones⁴⁴. Cuando la pérdida de fluido es considerable, se generan sobrecostos.

En una buena cementación no debe existir una pérdida de fluido. Los materiales comúnmente usados para este caso según Suman⁴⁵ son: Gilsonita, carbón molido, materiales fibrosos y en general materiales granulares.

2.2.1.5 Resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión, es la capacidad que tiene un material para soportar esfuerzos compresivos sin deformarse o quebrarse. Esta propiedad se identifica cuando el cemento ya ha fraguado, depende de la temperatura, la presión y la composición del cemento. Como dice Suman⁴⁶ la resistencia temprana se da con la adición de cloruro de calcio, cloruro de sodio, cloruro de amonio, poca agua y calor. Mientras que la resistencia temprana se puede ver atrasada si se agregan concentraciones de lignosulfonatos, Carboximetil Hidroxietilcelulosa (CMHEC) y bastante agua.

⁴⁴ Schlumberger. fluid loss. [0]. [Consultado el 10 de octubre] Disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/f/fluid_loss.aspx

⁴⁵ SUMAN, George. Cementing Handbook. 1997. P. 28

⁴⁶ Ibid. Pg 29

2.2.1.6 Expansión. La expansión es la propiedad que tiene el cemento para dilatarse y ensancharse varias pulgadas mientras que se fragua. La expansión del cemento es importante, porque esta garantiza que el espacio anular entre el revestimiento y la formación quede cementado adecuadamente.

2.2.2 Tipos de cemento. Según el Instituto Americano de Petróleo (API) los cementos se han clasificado en nueve clases de acuerdo a sus propiedades teniendo en cuenta que los más utilizados en la industria del petróleo son los tipos G y H, considerados los cementos petroleros, los cuales debido a sus propiedades y características manejan un amplio rango de presión y temperatura. El cemento más utilizado durante las operaciones de cementación es el portland, que al ser mezclado con agua forma la lechada que será bombeada. A continuación, se muestra la **Cuadro 3** en donde se resumen los tipos de cementos según su rango de aplicabilidad.

Cuadro 3. Clasificación de los cementos según el API.

Propiedad Clase	Profundidad	Temperatura	Características
A	Superficie - 6000 ft.	170°F	<ul style="list-style-type: none"> No se requieren propiedades especiales.
B	Superficie - 6000 ft.	170°F	<ul style="list-style-type: none"> Resistencia a los sulfatos. <ul style="list-style-type: none"> Moderadamente resistente. Altamente resistente.
C	Superficie - 6000 ft.	170°F	<ul style="list-style-type: none"> Alta resistencia inicial. Controlar sulfatos al igual que el cemento clase A.
D	6000 ft - 12000 ft.	230°F	<ul style="list-style-type: none"> Condiciones de temperatura y presión relativamente altas.
E	6000 ft - 14000 ft.	290°F	<ul style="list-style-type: none"> Condiciones de presión y temperatura altas.
F	10000 ft - 16000 ft.	320°F	<ul style="list-style-type: none"> Condiciones de presión y temperatura extremadamente altas. Alta resistencia a los sulfatos.
G Cemento petrolero	Superficie - 8000 ft.	200°F	<ul style="list-style-type: none"> Para uso con aditivos (Aceleradores o retardadores).
H Cemento petrolero	Superficie - 8000 ft.	200°F	<ul style="list-style-type: none"> Cementación básica. Control moderado de sulfatos. La profundidad varía según uso de aditivos.
J	12000 ft - 16000 ft.	350°F	<ul style="list-style-type: none"> Presiones y temperaturas altas. La profundidad varía según uso de aditivos.

Fuente. HALLIBURTON. Halliburton cementing tables. 1981.

En el **Cuadro 3**, el cemento comúnmente utilizado es el cemento clase H, pues brinda una mayor flexibilidad y se relaciona de forma más fácil con la mayoría de aditivos necesarios.

2.2.3 Cementos especiales. Este tipo de cementos, que pueden ser de base Portland o utilizar otra base se muestran en la **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Clasificación de los cementos especiales

Tipo de cemento	Característica
Ultralivianos	Su densidad es baja a comparación de una lechada de cemento convencional con baja densidad.
Tixotrópicos	Lechadas de cemento, las cuales mientras se bombean son líquidas, pero cuando se detienen forman un gel.
Expandidos	Según Schlumberger ⁴⁷ Poseen una mayor fuerza de adherencia que los cementos convencionales.
Saturados de sal	Al agregarse diferentes concentraciones de cloruro de sodio (la sal más usada), algunas propiedades de la lechada mejoran.
Térmicos	Lechadas de cemento que resisten la retrogresión a temperaturas altas.

En la **Cuadro 4**, dentro de los cementos ultralivianos se encuentran dos tipos de lechada que corresponden a:

- **Cementos espumados.** Mezcla de lechada, un gas y agente espumante.
- **Cementos con micro esferas.** Son esferas comúnmente de vidrio o cerámica las cuales trabajan como reductores de densidad.

El estudio se enfoca en la realización de una lechada de cemento espumado.

2.3 CEMENTOS ESPUMADOS

A diferencia del cemento convencional, existe una rama de cementos ultralivianos que se caracterizan por su baja densidad, entre ellos se encuentra el cemento espumado, el cual según Castañeda y Díaz⁴⁸, lo que diferencia a este del cemento

⁴⁷ SCHLUMBERGER, Dowell. Cementing Technology. 1984.

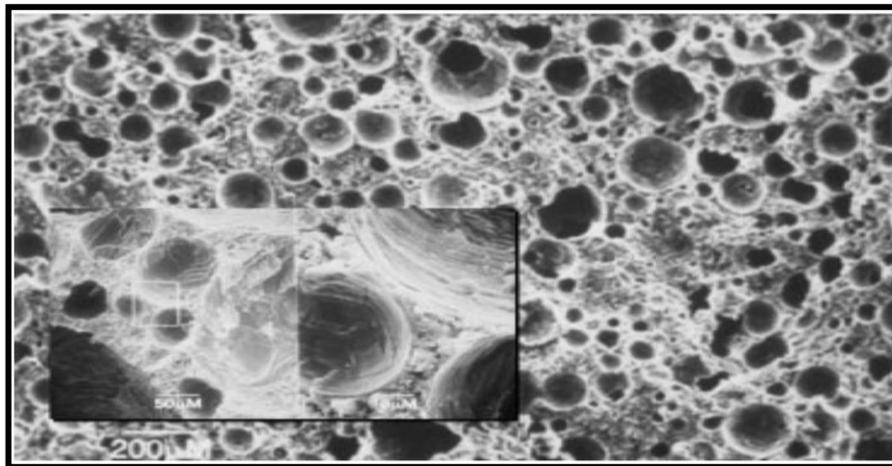
⁴⁸ CASTAÑEDA, Carlos y DÍAZ, Leonardo. Evaluación de la Tecnología de Cementos Espumados en los Campos Nutria Y Sardinata. 2011.

convencional es que el espumado contiene en su lechada de cemento, agentes espumados y un gas. Estos tres ingredientes, al estar completamente mezclados y estables forman una espuma en donde se generan unas microburbujas del gas (ver **Figura 4**), las cuales no estarán interconectadas entre sí, estas serán las encargadas de dar al cemento una baja densidad, entre otras características.

La implementación de un gas como lo es el nitrógeno para la formulación del cemento tiene dos ventajas:

1. El nitrógeno al ser un gas inerte, este no reaccionará con la formación.
2. El factor económico: El nitrógeno, al estar en grandes cantidades en el aire, su precio es reducido, haciendo que no se incrementen los costos de la operación.

Figura 4. Microfotografía de una muestra de cemento espumado.



FUENTE. HALLIBURTON. Foam Cement Operations Manual. 1998.

La implementación de los cementos espumados en los pozos petroleros se dio por la necesidad de bajar la densidad de los cementos convencionales, para formaciones que requerían el uso de cementos con menor peso, es por esta razón que se comienza a mezclar un poco de cemento espumado con cemento convencional, con el fin de presentar una menor presión hidrostática lo cual evitaría la formación de fracturas en la formación.

2.3.1 Características de los cementos espumados. Al inyectar nitrógeno en una lechada de cemento se modifican algunas propiedades de la lechada resultante, como por ejemplo:

- La viscosidad aumenta.
- La permeabilidad disminuye.

Todos estos cambios suceden debido a las burbujas que se generan por la inyección de nitrógeno dentro de la lechada, las cuales no están interconectadas.

La cantidad de nitrógeno inyectado es un factor determinante en la calidad y así mismo en la capacidad que tendrá el cemento espumado de cumplir con los requerimientos. Esta cantidad de nitrógeno dependerá de la temperatura y de la presión, según Schlumberger⁴⁹ el cálculo completo de la cantidad del gas es más complicado debido a la tendencia que tiene el nitrógeno de ser ligeramente soluble en el cemento, por esto se debe agregar una mayor cantidad de nitrógeno que lo calculado.

Además de estas características, según Medina “los cementos espumados brindan excelentes características reológicas, baja o nula pérdida de filtrado y baja permeabilidad”⁵⁰. Se puede decir que los cementos espumados tienen ventajas como:

- **Bajo peso.** Al mezclar la lechada con el gas, este hace que la matriz del cemento disminuya su densidad. El cemento espumado puede prevenir la formación de fracturas, pérdidas de circulación y trabajos de cementación secundaria. Una lechada de cemento espumado estable puede llegar a tener una densidad de cuatro libras por galón.
- **Buena relación resistencia/densidad.** La lechada de cemento espumado, tendrá mayor resistencia a medida que la densidad del mismo sea más baja. Se debe tener en cuenta que el contenido de agua afecta directamente la densidad, de esta forma será más resistente si contiene poca agua.
- **Buena remoción del fluido de perforación.** La densidad aparente de los espaciadores espumados, preflujos y de la lechada generan una mejor energía de arrastre.
- **Ductilidad.** Las microburbujas presentes en el cemento espumado distribuyen los esfuerzos, permitiendo que los sólidos en el cemento se deformen muy poco.
- **Expansión.** Los cementos espumados tienen la capacidad de expandirse para llenar zonas en las cuales se presentan pérdidas de circulación, sin necesidad de generar fracturas, además llenan espacios en el pozo donde se presentan cavernas o derrumbes.
- **Prevenir migración de gas.** Las burbujas del cemento espumado ayudarán a mantener la presión mientras el cemento se deshidrata, de esta manera se puede prevenir la migración de gas.

⁴⁹ SCHLUMBERGER, Dowell. Cementing Technology. 1984.

⁵⁰ MEDINA, Jorge. Evaluación y Análisis Técnico Operativo para la Implementación de Cementos Espumados en Operaciones de Perforación y Reacondicionamiento de Pozo. 2001.

- **Aislamiento zonal.** Debido a su excelente remoción de lodo, el cemento espumado se adhiere mejor a la formación haciendo que el aislamiento mejore.
- **Control de las pérdidas de circulación.** El cemento espumado posee dos fases estables, evita la migración del agua hacia la formación.
- **Baja permeabilidad.** Debido a que las microburbujas del cemento espumado no están interconectadas, este tiene una permeabilidad relativamente baja a comparación de los otros tipos de cemento.
- **Aumento de volumen.** Al emplear un gas como fluido complementario, el cemento espumado es relativamente económico, especialmente cuando se requiere cementar largas secciones.

2.3.2 Aplicaciones. Las características especiales del cemento espumado (baja densidad) hacen de este un excelente candidato para la cementación de formaciones delicadas, es decir formaciones con bajos gradientes de fractura puesto que estas además pueden presentar alta porosidad y permeabilidad, en las cuales las pérdidas de fluido serán un problema a considerar. También estos cementos tienen una gran aplicabilidad en unidades que necesiten ser aisladas para evitar inlfujos de gas porque, estos cementos resisten altos esfuerzos de compresión; por último, los espumados son utilizados para evitar contaminación de aguas someras debido a que estos brindan una excelente adherencia a la formación.

Un ejemplo de aplicación de los cementos espumados, se registró en un yacimiento de California, donde según Harms y Febus⁵¹ algunas áreas de producción de hidrocarburos en California consisten en formaciones altamente permeables, formaciones de arena y grava no consolidadas, las cuales poseen una baja presión de reservorio y bajo gradiente de fractura. Adicional a esto, son reservorios naturalmente fracturados causando bastantes pérdidas.

Adicionalmente, Al-Yami⁵² propone la implementación de cementos espumados en la sección intermedia y la sección de producción, en formaciones difíciles, el autor se refiere a formaciones difíciles como las arenas, carbonatos y dolomitas.

Otra de las aplicaciones de cementos espumados que nombra Cockram⁵³ en su paper sobre la zona del delta del Nilo, corresponde a flujos someros de agua y de gas, los cuales emanan de zonas poco consolidadas. Estas pueden generar problemas de producción o durante la perforación de la siguiente sección.

⁵¹ HARMS, W. M. y FEBUS, J. S. Cementing of Fragile-Formation Wells with Foamed Cement Slurries. United States: 1985. p. 1049-1057

⁵² AL-YAMI, Abdullah, et al. Evaluation and Optimization of Low-Density Cement: Laboratory Studies and Field Application. En: SPE Drilling & Completion. Mar. vol. 25, no. 1, p. 70-89

⁵³ COCKRAM, Mark. Foam Cementing Controls Deepwater Shallow Flow in the East Mediterranean. 2002.

Aunque el uso de cementos espumados es una solución, hasta ahora eficiente para algunos problemas que se presentan en un pozo, la evaluación de estos cementos necesita mayor cuidado, puesto que, en los registros convencionales de integridad y adherencia del cemento, los cementos espumados arrojan resultados diferentes en comparación a los obtenidos con un cemento convencional, pero esto no quiere decir que las operaciones de cementación no se hayan llevado a cabo satisfactoriamente. En la **Tabla 2**, se muestra la respuesta de los registros que se le realizan al cemento convencional y al espumado.

Tabla 2. Respuesta de registros para cementos convencionales vs. Espumados.

Registro	Respuesta en cementos convencionales	Respuesta en cementos espumados
Herramientas de atenuación	8 a 15 db/ft.	3 a 5 db/ft.
Adherencia del cemento (CBL)	10 mv → buena adherencia del cemento.	15 mv a 40 mv → buena adherencia.
impedancia acústica (AI)	Desde 4.0 mks rayls en adelante.	1.5 a 2.2 mks rayls.

FUENTE. CASTAÑEDA, Carlos y DÍAZ, Leonardo. Evaluación de la Tecnología de Cementos Espumados en los Campos Nutria Y Sardinata. 2011. Modificado por los autores.

Como se observa en la **Tabla 2**, los rangos de respuesta de los cementos espumados tienen una gran variación con respecto a los obtenidos en un cemento convencional cuando la integridad y adherencia del cemento es buena, por esta razón, como menciona Koop⁵⁴ la evaluación de un cemento espumado se debe hacer con más de un registro, pues el CBL presenta diferentes resultados al evaluar un cemento espumado, por lo tanto, un registro ultrasónico confirmaría o no los resultados antes obtenidos.

2.3.2.1 Cementos espumados en yacimientos con bajos gradientes de fractura. Los cementos espumados, debido a sus propiedades como su baja densidad y sus burbujas no interconectadas, hacen de este un buen candidato para cementar formaciones con bajos gradientes de fractura. Estas formaciones pueden presentar problemas cuando la presión hidrostática generada por la lechada de fluido supera su gradiente de fractura, ocasionando un daño a la formación es decir fracturándola; este factor hace que el cemento migre hacia las fracturas y no se obtenga unos resultados óptimos.

⁵⁴ KOOP, Kevin, et al. Foamed Cement vs. Conventional Cement for Zonal Isolation—Case Histories. En: Spe 62895.

Es por lo anterior que las burbujas del cemento espumado alivianarán la columna de fluido previniendo sobrepasar el gradiente de fractura de la formación y así evitar problemas durante los procesos de cementación.

Según Taiwo y Ogbonna⁵⁵En situaciones donde se tengan bajos gradientes de fractura, una de las soluciones es el uso de cementos espumados, los cuales presentan una relación densidad/resistencia buena, y pueden trabajar en un rango de 4 a 15 libras por galón. Esta investigación se llevó a cabo en el golfo de Guinea, en un campo offshore donde se presentaba un reservorio con bajo gradiente de fractura.

2.3.2.2 Cementos espumados en Colombia. La cementación en Colombia con el empleo de cementos espumados, se ha realizado en dos campos: Campo Nutria y Campo Sardinata.

⁵⁵ TAIWO,Oyetade y OGBONNA,Joel. Foam Cementing Desing And Application: A Cure for Low Gradient- Associated Problems in Deepwater Operations in the Gulf of Guinea. 2011.

Cuadro 5. Uso de cementos espumados en los campos Nutria y Sardinata en Colombia.

Campo	Nutria	Sardinata
Ubicación	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenca del Valle Medio del Magdalena. • Noroeste de Bucaramanga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cuenca del Catatumbo.
Problemas presentados	<ul style="list-style-type: none"> • Los trabajos de cementación presentan resultados deficientes (utilizando cementos convencionales). • Se observan cementos no compactados y secciones con poca presencia de cemento. • Perdidas de circulación y cavernas severas. 	<ul style="list-style-type: none"> • En este campo los problemas más grandes se tenían en las altas pérdidas de circulación que se presentaban en formaciones cuyos gradientes de fractura eran bajos. • Trabajos de cementación anteriores (cementos convencionales) tenían baja calidad. • Presencia de gas
Solución	<p>Halliburton, propone el uso cementos espumados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Características de elasticidad. • Alta energía, por lo tanto mejor limpieza del pozo. • Propiedades expansivas 	<p>Halliburton, propone el uso cementos espumados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aislar zonas problemas (Formaciones con presencia de gas). • Baja densidad.
Resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Cementación con una lechada espumada de 13,0 lb/gal. • Buena cementación espumada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad inicial 15,6 lb/gal; después de la inyección de nitrógeno a la lechada 12,5 lb/gal. • Cementación exitosa.

Fuente: CASTAÑEDA, Carlos y DÍAZ, Leonardo. Evaluación de la Tecnología de Cementos Espumados en los Campos Nutria Y Sardinata. 2011. Modificado por los autores.

2.3.3 Formulación de la lechada espumada. En la formulación de un cemento espumado se tiene como lechada base una de tipo convencional, teniendo en cuenta las características geológicas de la formación, las necesidades del pozo y las condiciones para asegurar la estabilidad del pozo, además de los límites de presión.

Para la formulación de la lechada, la norma API 10B sección 4, contiene las especificaciones para el diseño de la lechada base y sus componentes, y el contenido de gas necesario para asegurar la calidad de la espuma.

2.3.3.1 Cálculos de los componentes de la lechada base (con o sin surfactantes). La lechada base de los cementos espumados contiene surfactantes, estos pueden o no ser agregados a la mezcla inicial de la lechada base.

➤ **Cálculos de fracción en masa de surfactante.** es necesario tener en cuenta todos los aditivos que serán añadidos al cemento.

Ecuación 1. Fracción en masa de surfactante.

$$ws = \frac{ms}{mc + ma + ms + mw} \times 100$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on reparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

ws: fracción en masa de surfactante, porcentaje.

ms: masa de surfactante, gramos.

mc: masa de cemento, gramos.

ma: masa de aditivos, gramos.

mw: masa de agua, gramos.

➤ **Densidad de la lechada base sin surfactantes.**

Ecuación 2. Densidad de la lechada base sin surfactantes.

$$\rho_{bwos} = \frac{mc + ma + mw}{Vc + Va + Vw}$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

mc: masa de cemento, gramos.

ma: masa de aditivos, gramos.

mw: masa de agua, gramos.

Vc: Volumen absoluto de cemento, centímetros cúbicos.

Va: Volumen absoluto de el/los aditivos, centímetros cúbicos.

Vw: Volumen de agua, centímetros cúbicos.

2.3.3.2 Determinación del volumen y la masa de la lechada.

➤ **Volumen de la lechada.** el volumen total de la lechada no espumada debe ser la lechada base con el volumen de surfactantes ya incluidos. Este volumen puede ser calculado por dos métodos.

1. Contenido de gas conocido: Esta ecuación se utiliza cuando se requiere que la lechada de cemento espumado tenga una fracción de gas específica por volumen de lechada.

Ecuación 3. Densidad de la lechada espumada.

$$\rho fs = \left(100 - \frac{\varphi g}{100}\right) \times \rho ufss$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

ρfs : densidad de la lechada espumada, kilogramos por metro cubico o libra masa por galón.

φg : Fracción de volumen de gas requerido en la lechada de cemento espumado final, porcentaje

$\rho ufss$: densidad de la base de lechada de cemento no espumada con surfactante, kilogramos por metro cubico o libra masa por galón.

2. Densidad de lechada espumada conocida: Se halla la masa de lechada base con surfactantes necesaria para preparar la lechada de cemento espumado.

Ecuación 4. Masa de lechada base no espumada con surfactantes.

$$mufss = Vmc \times \rho fs$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

$mufss$: Masa de lechada base no espumada con surfactantes, gramos.

Vmc : Volumen de mezcla, centímetros cúbicos.

ρfs : Densidad de la lechada espumada conocida, gramo por centímetro cubico.

➤ **Masa de los surfactantes.** Es necesario determinar la cantidad de surfactante que va a ser mezclada con la lechada no espumada.

Ecuación 5. Masa de los surfactantes.

$$ms = mufss \times \frac{ws}{100}$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

ms : Masa de los surfactantes, gramos.

mufss: Masa de la base la lechada no espumada con surfactantes, gramos.
ws: Fracción de masa de surfactantes, porcentaje.

➤ **Masa de la lechada base sin surfactantes.**

Ecuación 6. Masa de lechada de cemento base sin surfactantes.

$$mufs = mufss - ms$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

mufs: Masa de lechada de cemento base sin surfactantes, gramos.
mufss: Masa de lechada de cemento base con surfactantes, gramos
ms: Masa de surfactantes a ser agregado a la lechada de cemento base no espumada, gramos.

2.3.3.3 Ecuaciones adicionales.

➤ **Porcentaje de gas en la lechada espumada final.**

Ecuación 7. Fracción de volumen de gas en la lechada espumada

$$\varphi g: \frac{\rho u f s s - \rho f s}{\rho u f f s s} \times 100$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

φg : Fracción de volumen de gas en la lechada espumada final, porcentaje.
 $\rho u f s s$: Densidad de la lechada base no espumada con surfactantes, kilogramos por metro cúbico.
 $\rho f s$: Densidad de la lechada espumada, kilogramos por metro cúbico.

➤ **Volumen de la lechada base no espumada.** Esta fórmula permite determinar el volumen de la lechada no espumada, la cual sirve para realizar cálculos de cantidad de nitrógeno a inyectar para llegar a una calidad en específico y para correlacionar características.

Ecuación 8. Volumen de la lechada base no espumada.

$$Vus = Vmc - \left(Vmc \times \frac{\varphi g}{100} \right)$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

Vus: Volumen de la lechada base no espumada, centímetros cúbicos.
Vmc: Volumen mezclado en la unidad de cementación, centímetros cúbicos.
 ϕ_g : Fracción de volumen de gas, porcentaje.

➤ **Masa de la lechada de cemento no espumado.**

Ecuación 9. Masa de la lechada de cemento base no espumada.

$$mufss = Vus \times \rho uffss$$

Fuente. NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

mufss: Masa de la lechada de cemento base no espumada con surfactantes, gramos.

Vus: Volumen de la lechada de cemento base no espumado, centímetros cúbicos.
 $\rho uffss$: Densidad de la lechada base no espumada con surfactantes, gramos por centímetro cúbico.

2.3.4 Pruebas de la lechada de cemento espumado. Según el API⁵⁶, debido a los grandes volúmenes de gas que contiene una lechada de cemento espumada, es importante modificar algunos procedimientos de las pruebas tradicionales realizadas a las lechadas de cemento con el fin de evitar resultados erróneos en las pruebas ejecutadas.

2.3.4.1 Determinación de la densidad. Para la prueba de determinación de la densidad se debe contar con un recipiente de volumen conocido, el cual en la parte superior esté abierto, se determina la masa del recipiente vacío, seguido a esto se introduce la lechada en el recipiente, se limpian excesos y se vuelve a pesar. La densidad del fluido será el resultado de dividir el peso del recipiente con el fluido, entre el volumen del recipiente.

Para la estandarización de los métodos de realización de las pruebas para los cementos espumados existe la norma API 10B-4, en ella dice que “una balanza de densidad presurizada nunca debe ser utilizada para determinar la densidad de una lechada de cemento espumado realizado a condiciones de presión atmosférica, pues esto podría hacer que las burbujas se compriman”⁵⁷, por lo anterior no es pertinente emplear una balanza de lodo a presión ambiente, puesto que el orificio de la parte superior genera respuestas erróneas.

⁵⁶ API. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. En: Anonymous API Recommended Practices. First ed. 2004.

⁵⁷ Ibid. Pg. 17.

2.3.4.2 Test de fuerzas compresivas. Esta prueba se realiza colocando la lechada de cemento espumado dentro de un molde, bien sea cúbico o cilíndrico que puede estar sellado, si se utiliza una tapa sellante en el molde, esta previene que durante el calentamiento la lechada no se expanda, puesto que la expansión de esta, ocasionaría una disminución en su densidad, que alteraría su fuerza compresiva. Después de que la muestra está dentro del recipiente, este se somete a un baño de agua a presión atmosférica para ser curado. Finalmente se realiza el mismo procedimiento de los cementos convencionales.

El procedimiento para la determinación del esfuerzo compresivo puede ser realizado por dos métodos, uno de ellos en el cual se destruye la muestra a evaluar y otro mediante la determinación del tiempo de tránsito de una onda sonora a través del cemento.

El método destructivo consiste en que una vez haya fraguado la lechada, se introducirá en una máquina de esfuerzos compresivos, esta máquina comenzará a realizar cierta fuerza a la muestra, hasta que esta se destruya, esa fuerza a la cual se destruye el cemento será el valor de la resistencia a la compresión de la lechada.

El segundo procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión consiste en que una vez fraguado el cemento, se ingresará a una maquina la cual generará una onda sonora y se le medirá el tiempo de tránsito a través de la muestra. Finalmente, mediante el uso de correlaciones se determina la resistencia del cemento a la compresión.

2.3.4.3 Determinación de la permeabilidad. La determinación de la permeabilidad del cemento espumado se realiza, colocando la lechada de cemento dentro de unos módulos de pruebas de permeabilidad y luego se realiza la curación del módulo para prevenir daños a la muestra.

La curación de las muestras se debe realizar de acuerdo con las especificaciones de la norma API 10B – 2.

2.3.4.4 Tiempo de fraguado. Esta prueba indica la cantidad de tiempo que el cemento continúo siendo bombeable, este parámetro se determina para saber a qué velocidad debe ser bombeado el fluido, para que este llegue al objetivo antes de que comience a fraguar. Se realiza teniendo en cuenta las condiciones de presión y temperatura a las cuales este estará sometido.

La prueba para determinar el tiempo de fraguado del cemento se realiza utilizando un consistómetro HPHT convencional (el mismo utilizado para lechadas de cemento no espumadas). Si se utilizan surfactantes dentro de la formulación de la lechada, estos harán que el tiempo de fraguado cambie

2.3.4.5 Determinación de las pérdidas de fluido. Ésta prueba permite determinar la cantidad de fluido que se puede perder por cuestiones propias de la formación como las fracturas naturales, las cuales no son controlables y causas inducidas, es decir generadas por el mismo proceso de perforación del pozo.

La prueba de pérdida de fluido para cemento espumado se debe realizar, antes de que este se mezcle con el gas y se forme la espuma, teniendo en cuenta esto, la prueba se ejecuta de igual forma que en una lechada convencional.

El procedimiento consiste en agregar a una celda de pérdida de fluido la lechada de cemento, simular el cambio de temperatura entre el fondo y la superficie. Mientras se va realizando la prueba, se recogerá un volumen de fluido filtrado, este volumen debe ser registrado y medido constantemente hasta que termine la prueba.

La prueba no arroja un resultado totalmente real debido a que esta se le realiza al cemento sin espumar, pero los resultados serán un indicador de cuanto fluido se puede llegar a filtrar durante las operaciones.

2.3.4.6 Propiedades Reológicas. Por medio de un reómetro se determinan las propiedades reológicas de la lechada de cemento, según la norma API 10B-4 “El uso de un viscosímetro rotacional para un cemento espumado, puede resultar en separación del gas de la lechada”⁵⁸, por consiguiente, existe una correlación que permite relacionar las propiedades de la lechada de cemento no espumado con el espumado.

El procedimiento consiste en tomar el recipiente del reómetro, llenarlo hasta la línea indicada con el fluido a analizar, posterior a esto calentar el recipiente hasta la temperatura de evaluación y esperar a que se estabilice. Al comenzar la prueba se debe partir de la velocidad más baja, dejando esta un tiempo determinado, para que el resultado sea confiable, seguido a esto se debe continuar el muestreo realizando dos corridas, una de menor a mayor velocidad y la segunda en sentido contrario.

Para finalizar la prueba se deben determinar dos datos por cada velocidad, una corrida arriba y otra corrida abajo, estos datos deben ser promediados para sacar un resultado entre los dos. Este dato final será el que se utilizará y se empleará en las ecuaciones necesarias.

2.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE CEMENTOS ESPUMADOS VS. CEMENTOS CON MICROESFERAS

Tanto los cementos espumados como los cementos con microesferas están dentro de la clasificación de cementos especiales, en la categoría de cementos

⁵⁸ API. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. En: Anonymous API Recommended Practices. First ed. 2004. Pg. 20

ultralivianos, siendo su característica principal la baja densidad gracias a componentes como el nitrógeno y las microesferas huecas dentro de sus matrices.

2.4.1 Propiedades fisicoquímicas del cemento espumado. Los cementos espumados se caracterizan por las microburbujas de gas que se forman en su matriz, entre más microburbujas se formen, la densidad del cemento va a ser menor lo cual, se ve reflejado en el aumento de la calidad de la espuma, que es la relación que existe entre el volumen de gas y el volumen de lechada.

Las condiciones de la espuma se mantienen mientras la mezcla se encuentre en estática, cuando estas cambian la calidad de la espuma y el volumen de lechada varía de acuerdo con los cambios de presión y temperatura a los que se vaya sometiendo.

- Al aumentar presión, disminuye el volumen de lechada y la calidad de la espuma.
- Al disminuir presión, se incrementa el volumen y la calidad de la espuma.
- Cambios en la temperatura afectan el volumen de lechada y la calidad de la espuma.
- Con un incremento de temperatura, aumenta el volumen.
- La disminuir la temperatura, se reduce el volumen.

En la **Tabla 3**, se muestra un resumen de como los cambios de presión y temperatura afectan la calidad de la espuma.

Tabla 3. Cambios es la calidad de la espuma con respecto a cambios de presión y temperatura.

Condición	Cambio	Volumen de lechada	Calidad de la espuma
Presión	↑	↓	↓
	↓	↑	↑
Temperatura	↑	-	↑
	↓	-	↓

↓: disminuye ↑: aumenta

Teniendo en cuenta la **Tabla 3**, un reto grande durante los trabajos con cementos espumados son los cambios que se generan en su volumen, en función de la presión y la temperatura.

2.4.1.1 Propiedades y características del cemento espumado. Los cementos espumados poseen propiedades específicas que los diferencian de un cemento no espumado, estas propiedades pueden ser solo ramificaciones de las propiedades normales de los cementos.

➤ **Resistencia a la compresión.** Una de las características de los cementos espumados es su alta resistencia a la compresión, que está relacionada con la baja densidad que pueden llegar a adquirir.

Los cementos espumados permiten obtener densidades muy bajas en la lechada, que no podrían ser obtenidas utilizando lechadas con aditivos ligeros convencionales; además los cementos espumados mantienen una alta resistencia a los esfuerzos compresivos a los que son sometidos, esta resistencia se debe principalmente al uso de nitrógeno.

Antes de que se generará la tecnología de los cementos espumados, el incremento de la cantidad de agua en la lechada o la adición de aditivos de bajo peso eran las formas más usuales para reducir la densidad de la lechada; la adición de agua para bajar la densidad era una buena opción debido a sus bajos costos, pero esta no tenía ningún efecto positivo en el incremento de la resistencia del cemento, a su vez, el uso excesivo de aditivos de bajo peso generaba posteriormente un aumento en la cantidad de agua a utilizar.

Por otra parte, cuando se introducen los cementos espumados y la formación de la espuma a través del uso de nitrógeno, esta se convierte en una forma sencilla de disminuir la densidad de la lechada.

Debido a que el nitrógeno es ultra liviano, la fuerza relativa a desarrollar sólidos es alta, y con ello su resistencia a la compresión es mayor.

➤ **Reología de las lechadas de cemento espumado.** Al utilizar un cemento espumado es importante tener en cuenta la reología de la lechada, puesto que, dependiendo de esta, será el comportamiento del cemento durante los trabajos de cementación.

1. Si la viscosidad del cemento espumado aumenta, la densidad disminuye. (la calidad de la espuma incrementa).

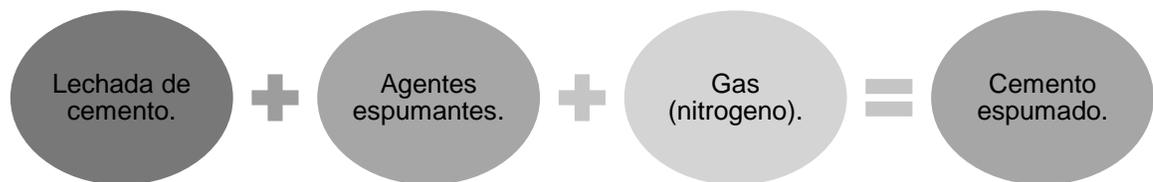
2. Una alta calidad de la espuma, aumenta la viscosidad del cemento espumado. Lo anterior significa que no podrá lograrse un flujo turbulento con un cemento espumado.

➤ **Química del nitrógeno.** El nitrógeno es el gas más utilizado en los trabajos con cementos espumados, pero hay que tener en cuenta que el aire comprimido puede ser utilizado para casos donde se tienen bajas presión o zonas poco profundas. En términos generales el aire comprimido es utilizado en lugar del nitrógeno, en cuyos casos está disponible y se tiene los compresores de aire. De lo contrario, es preferible utilizar el nitrógeno en los trabajos de cementos espumados, además éste se encuentra en grandes cantidades en el aire lo que lo haría relativamente económico.

Cuando se introduce el nitrógeno en el cemento, este se encontrará en pequeñas burbujas no reactivas químicamente, lo cual no modificara las propiedades del cemento ni efectuará cambios con los componentes con los que este haga contacto.

2.4.1.2 Diseño del cemento espumado. Durante la formulación de los cementos espumados, es primordial tener en cuenta los elementos base que este necesita. En la **Figura 5**, se observa como es el diseño de un cemento espumado.

Figura 5. Diseño del cemento espumado.



De la **Figura 5**, se entiende que durante la preparación del cemento espumado no es necesario la adición de aditivos de bajo peso, lo que traerá como consecuencia una disminución considerable de la cantidad de agua utilizada; además de esto por sus propiedades y características innatas, el cemento espumado previene la pérdidas de fluido, por lo tanto no es necesario usar aditivos de control de pérdidas de fluidos.

En el **Cuadro 6**, se muestran los aditivos compatibles e incompatibles con los cementos espumados.

Cuadro 6. Aditivos compatibles e incompatibles con los cementos espumados.

Aditivos incompatibles.	Aditivos compatibles.
Desespumantes	Cementos
Retardadores de lignosulfonato	Aceleradores
Dispersantes	Retardadores

Algunos aditivos utilizados en la preparación de cementos convencionales no son compatibles con el cemento espumado, como se observa en el **Cuadro 6**, todo esto dependerá del proveedor y de los componentes del aditivo que este ofrezca, lo cual cambiará de una empresa a otra.

2.4.2 Propiedades fisicoquímicas de los cementos con microesferas. Los cementos ultralivianos se caracterizan por su baja densidad, un ejemplo de estos son los cementos con microesferas, que están compuestas por pequeñas esferas de vidrio hueco (ver **Figura 6**) las cuales están rellenas de un gas inerte, lo que proporcionará al cemento una baja densidad.

Figura 6. Microesferas de vidrio.



FUENTE. 3M. Materiales Avanzados: Microesferas De Vidrio. [0]. Disponible

en: http://solutions.3m.com.co/wps/portal/3M/es_CO/Mining_Industry_LA/Home/Products/AdvancedMaterials/?PC_Z7_RJH9U5230GG880IHA65CELMMB0000000_nid=TPSM658GR0beCKTQZTV052gl.

Como se observa en la **Figura 6**, las microesferas son de forma esférica, muy ligeras y de baja densidad, lo que mejorara las características de una lechada de cemento ultraliviano. La densidad obtenida con los cementos que utilizan microesferas como aditivo tiene un valor por debajo de 9,2 libras por galón.

En secciones muy largas, los trabajos de cementación se realizan en varias etapas; con el uso de microesferas en la lechada de cemento se disminuye el número de etapas a realizar, además las lechadas alivianadas con microesferas son útiles en formaciones que no soportan una presión hidrostática muy alta⁵⁹.

⁵⁹ 3M. Cementación de baja densidad con esferas de vidrio de serie HGS de 3M™. [0]

2.4.2.1 Propiedades físicas del cemento con microesferas. El cemento con microesferas tiene propiedades particulares que lo diferencian de los demás cementos ultralivianos, algunas de estas son enunciadas en el **Cuadro 7**.

Cuadro 7. Propiedades físicas del cemento con microesferas.

Propiedad	Características
Resistencia	Los cementos con microesferas pueden soportar hasta 18000 psi en fuerzas compresivas, por lo tanto, pueden ser utilizados en pozos muy profundos.
Baja densidad	Las microesferas de vidrio tienen una densidad baja, lo cual permite bajar el peso de la lechada de cemento.
Reactividad	Las microesferas son inertes, por esta razón, no afectan la química de la lechada de cemento, además son insolubles tanto en agua como petróleo.
Temperatura	No se ven afectadas por las temperaturas de fondo en el pozo.

FUENTE. 3m. Glass Bubbles HGS18000 For low density drilling fluids and drilling cements. 2012. ISBN 9780786468249.

Las propiedades enunciadas en el **Cuadro 7**, son las que otorgan al cemento con microesferas características que hacen que estos se puedan utilizar en pozos con condiciones como: Bajos gradientes de fractura, grandes profundidades y altas temperaturas.

2.4.2.2 Beneficios de las microesferas de vidrio en los cementos. Los cementos con microesferas poseen unos beneficios y características diferentes en comparación con los cementos convencionales, tales como su bajo encogimiento, baja densidad y que tienen la capacidad de disminuir el tiempo de suspensión de las operaciones de perforación debido a trabajos de cementación; en el **Cuadro 8** se observa la descripción de los beneficios de los cementos con microesferas.

Cuadro 8. Beneficios de los cementos con microesferas.

Beneficio	Importancia
Bajo encogimiento	Cuando el cemento ligero usa microesferas se reduce la retracción que este sufre en el fraguado, lo que permite una mejor adherencia del cemento con la formación y con el casing.
Disminución del tiempo WOC	Minimiza el tiempo del taladro, debido a que el cemento con microesferas logra una resistencia más rápidamente en comparación con otros cementos, lo que disminuye los tiempos de suspensión de las demás operaciones de perforación. Nota: Tiempo en el que se espera de fragüe del cemento (Tiempo WOC): Es el periodo de tiempo donde, se suspenden las operaciones de perforación, mientras se deja que las lechadas de cemento se solidifiquen, fragüen y desarrollen resistencia a la compresión ⁶⁰ .
Alto rendimiento	Tienen un rendimiento con un exceso de 3 pies cúbicos por saco en comparación con el cemento portland.

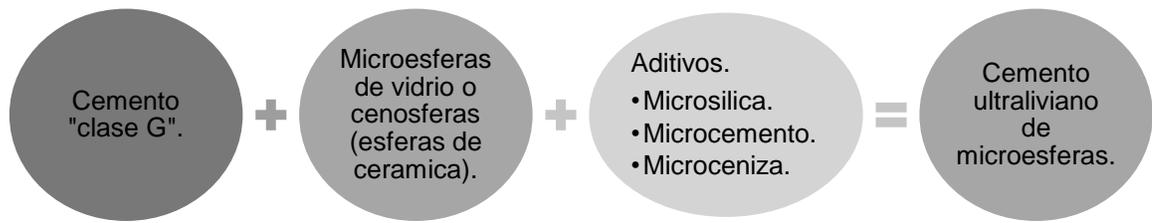
FUENTE. 3m. Glass Bubbles HGS18000 For low density drilling fluids and drilling cements. 2012. ISBN 9780786468249. Modificado por los autores.

2.4.2.3 Diseño del cemento con microesferas. La formulación de un cemento ultraliviano con microesferas consiste en un cemento base y microesferas huecas, las cuales al estar en la matriz del cemento son las que otorgan la baja densidad al cemento, estas esferas pueden ser de vidrio o de cerámica, el material es determinado por la cantidad de presión que pueden soportar.

Además, se adicionan una serie de aditivos según sea necesario, teniendo en cuenta que estos harán que se aumente el requerimiento de agua. En la **Figura 7** se resume de forma general el diseño de un cemento con microesferas.

⁶⁰ SCHLUMBERGER. WOC. [0]. [Consultado el 10 de agosto Disponible en: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/w/woc.aspx>

Figura 7. Diseño del cemento con microesferas.



En el diseño del cemento que se observa en la **Figura 7**, las microesferas son el aditivo encargado de bajar la densidad de la lechada, además de esto, las microesferas otorgan al cemento una resistencia a la temperatura, ya que estas no se deforman ni cambian sus propiedades cuando son sometidas a las condiciones de fondo del pozo.

3. FORMULACIÓN DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO Y UNA LECHADA DE CEMENTO CON MICROESFERAS A ESCALA LABORATORIO

El diseño de la lechada de cemento se realiza teniendo en cuenta las necesidades del pozo a cementar, las características geológicas del mismo y las condiciones de presión y temperatura a las que el cemento va a ser sometido. En el presente capítulo se muestra la formulación de dos lechadas de cemento ultralivianas, una espumada y otra de microesferas. El diseño de estas lechadas se llevó a cabo por medio de dos softwares, Landmark y iCem Service.

La simulación es una herramienta de ayuda durante la formulación y diseño de una lechada, debido a que permite precisar los planes y ejecución de los trabajos de cementación y confirmar la factibilidad en el uso de los cementos espumados⁶¹.

3.1 COMPONENTES GENERALES DE UNA LECHADA DE CEMENTO

Como se menciona en el capítulo anterior, los aditivos son sustancias que se mezclan junto con el agua y el cemento, permitiendo modificar algunas propiedades de la lechada como: el tiempo de fraguado, densidad, la resistencia a la compresión, entre otras; logrando así adecuar las propiedades del cemento a las necesidades del pozo y con ello obtener resultados satisfactorios durante los trabajos de cementación y continuar con las operaciones de perforación.

En la **Tabla 4**, se muestra una clasificación general de los aditivos que se adicionan en las lechadas de cemento, sus gravedades específicas y densidades, teniendo en cuenta la función que cumple dentro de la formulación del cemento.

⁶¹ Ruch, 2000 (New Generation Foam Cement – A Universal System for Cementing).

Tabla 4. Componentes generales para la formulación de una lechada de cemento convencional.

Función	Aditivo	Densidad	Unidades	Gravedad específica (SG)
Bajo Peso	Pozmix	74	lb/ft ³	2.46
	Gilsonite	50	lb/ft ³	1.07
	Diacel D	16.7	lb/ft ³	2.10
Alto peso	Hi-Dense No. 3	187	lb/ft ³	5.02
	Barita	135	lb/ft ³	4.23
Baja pérdida de agua	HALAD-9	37.2	lb/ft ³	1.22
	CFR-2	43	lb/ft ³	1.30
	Latex LA-2 (liquido)	68.5	lb/ft ³	1.10
Para pérdidas de circulación	Tuf-Plug	48	lb/ft ³	1.28
	Flocele	15	lb/ft ³	1.42
	Perlite	8	lb/ft ³	2.20
Retardantes	HR-4	35	lb/ft ³	1.56
	HR-5	38,4	lb/ft ³	1,41
	Diacel LWL	29	lb/ft ³	1.36
	Agua saturada de sal	62.4	lb/ft ³	1
	Cal-Seal	75	lb/ft ³	2.70
Aditivos especiales	Hydromite	68	lb/ft ³	2.15
	Cal-Seal	75	lb/ft ³	2.70
	CFR-1	40.3	lb/ft ³	1.63
	Aditivo Tuf No. 2	15.38	lb/ft ³	0.88
	D-AIR-1	25.2	lb/ft ³	1.35
	D-AIR 3000L	7,75	lb/gal	0,93
Extendedor	Microbond M	65,0	lb/ft ³	3,6
Agua	Agua fresca	62,4	lb/ft ³	1,0
Cemento	Cemento API	94	lb/ft ³	3,14

Fuente: Halliburton, Halliburton Cementing Tables.

En la **Tabla 4**, se muestra una lista de aditivos que modifican las propiedades de las lechadas de cemento de acuerdo con los requerimientos esperados. No todos los aditivos son utilizados en la formulación de toda lechada, puesto que algunos tendrían un efecto no deseado en las propiedades del cemento, como el antiespumante D-AIR 3000L, este aditivo tiene como función prevenir la formación de espuma en la lechada, lo cual sería contraproducente en una situación donde el fluido formulado sea un cemento espumado.

3.2 COMPONENTES ESPECIALES DE UNA LECHADA DE CEMENTO

Los trabajos de cementación en la actualidad presentan varios retos al encontrarse con formaciones fracturadas y yacimientos altamente depletados, por esta razón durante el diseño y formulación de las lechadas a utilizar se usan aditivos especiales, dado que estos permiten modificar las propiedades del cemento de forma considerable en comparación con el uso de aditivos convencionales. Por ejemplo, en el caso de la densidad del cemento se tienen como aditivos especiales las microesferas y la espuma, que permiten disminuir el valor de esta propiedad.

3.2.1 Microesferas. Las microesferas de vidrio o cerámica al ser huecas en su interior tienen un bajo peso, estas al ser mezcladas con la lechada de cemento van a aumentar el volumen de la mezcla, pero la masa de la misma no va a sufrir un cambio significativo. Por lo anterior, las microesferas son muy útiles en formaciones que requieren una baja densidad (menor a la empleada convencionalmente).

3.2.2 Espuma. Los cementos espumados, son formados a través de la inyección de nitrógeno a la lechada, formando microburbujas en su matriz, lo cual disminuye la densidad de la mezcla. Sin embargo, en los cementos convencionales la generación de espuma es un factor desfavorable, debido a que genera problemas durante las operaciones de cementación. En el **Cuadro 9**, se observa las ventajas y/o desventajas que tiene la formación de espuma en los cementos convencionales y espumados.

Cuadro 9. Papel de la espuma en cementos convencionales vs. cementos espumados.

Cemento Convencional	Cemento Espumado
Indicador de malos procedimientos durante la formulación de la lechada.	La inyección de un gas (ya sea nitrógeno o aire comprimido) se realiza a propósito para la formación de espuma en la lechada de cemento.
La medición de volumen de cemento puede ser errónea cuando hay espuma en el fluido.	El gas dentro de la matriz del cemento forma microburbujas, que disminuyen la densidad de la lechada.
Puede generar problemas de cavitación en las bombas de cementación.	En los cementos espumados la densidad es inversamente proporcional a la resistencia del mismo.

Como se puede observar en el **Cuadro 9**, la inyección intencional de un gas inerte a una lechada es útil cuando se requiere bajar la densidad del cemento.

3.3 SIMULADORES

El uso de software en la formulación de las lechadas de cemento permite realizar un diseño más acertado y confiable antes de llevar a cabo los trabajos de cementación en pozo, debido a que la simulación permite evaluar la lechada en diferentes escenarios, teniendo en cuenta las condiciones de pozo (temperatura y presión) a las que se va a someter.

Para la formulación de las lechadas evaluadas en el proyecto, se utilizaron dos softwares de la empresa Halliburton, Landmark con su aplicativo Opticem y como simulador de verificación y correlación de resultados iCem Service.

3.3.1 Landmark. Este simulador permite evaluar parámetros antes, durante y después de la perforación del pozo. El software cuenta con una serie de aplicativos, que funcionan como herramienta para la planeación del pozo, el diseño del mismo y además concede al usuario la posibilidad de realizar un análisis de: los fluidos utilizados durante las operaciones de perforación, los esfuerzos a los que se somete el revestimiento, los trabajos de cementación, entre otros.

El módulo dentro del software que permite realizar el análisis de las operaciones de cementación se conoce como Opticem. Este aplicativo permite evaluar propiedades de la lechada como: densidad circulante equivalente (ECD), modelos reológicos de forma realista y densidades; por otro lado, puede comparar datos planeados con datos reales.

Adicionalmente, Opticem permite realizar la evaluación del comportamiento de lechadas de cemento espumado, dando al usuario la posibilidad de encontrar la calidad de la espuma adecuada para llegar a la densidad deseada. El **Cuadro 10**, muestra los datos de entrada que requiere el programa para poder realizar la simulación.

Cuadro 10. Datos de entrada para el simulador Landmark aplicativo Opticem.

Datos de entrada		
Formaciones	Características del fluido	Presiones de poro
Gradientes de fractura	Gradiente geotérmico	Sistema de circulación

Fuente: Halliburton. WellPlan Software Release 5000.1. Estados Unidos: Halliburton, 2012. 293-350 p.

Como se observa en el **Cuadro 10**, la información de los gradientes de fractura y geotérmico, junto con la información de presiones de poro de la formación, permitirán la correcta formulación de la lechada de cemento espumado, teniendo en cuenta las condiciones a las que esta será sometida (sin sobrepasar los límites de presión). En la **Tabla 5** se muestra la data inicial ingresada al software.

Tabla 5. Información inicial ingresada en el software Landmark.

Información general del caso.	Pozo de estudio	Castilla Norte
	Tipo de pozo	Onshore
	Profundidad pozo (MD)	8095.8 pies
	Profundidad pozo (TVD)	7308.8 pies
	Mesa rotaria	1280.1 pies
	Nivel del suelo	1252.1 pies
Gradiente geotérmico	Temperatura ambiente	80.0 °F
	Temperatura @ 7308.8 pies	175.01 °F
	Gradiente	1.30 °F/100pies
Programa de fluidos a bombear	Fluido de perforación	8.8 lb/gal
	Preflujo	8.4 lb/gal
	Espaciador	10 lb/gal
	Cemento de producción	Caso de estudio

En la **Tabla 5**, se observan los parámetros iniciales con los que se llevó a cabo la simulación, asumiendo el uso de un centralizador por junta y una erodabilidad con un valor de cero. El uso de los centralizadores permite disminuir la excentricidad de la tubería, garantizando así una distribución uniforme de los fluidos en el anular, teniendo en cuenta que el número de centralizadores es inversamente proporcional a la excentricidad de la tubería, es decir, a mayor número de centralizadores, la tubería estará más concéntrica.

Para el diseño de la lechada de cemento espumado, se evaluaron diferentes casos, teniendo en cuenta una variación en la calidad de la espuma o en la densidad final de la lechada, en la **Tabla 6** se muestra los diferentes casos simulados.

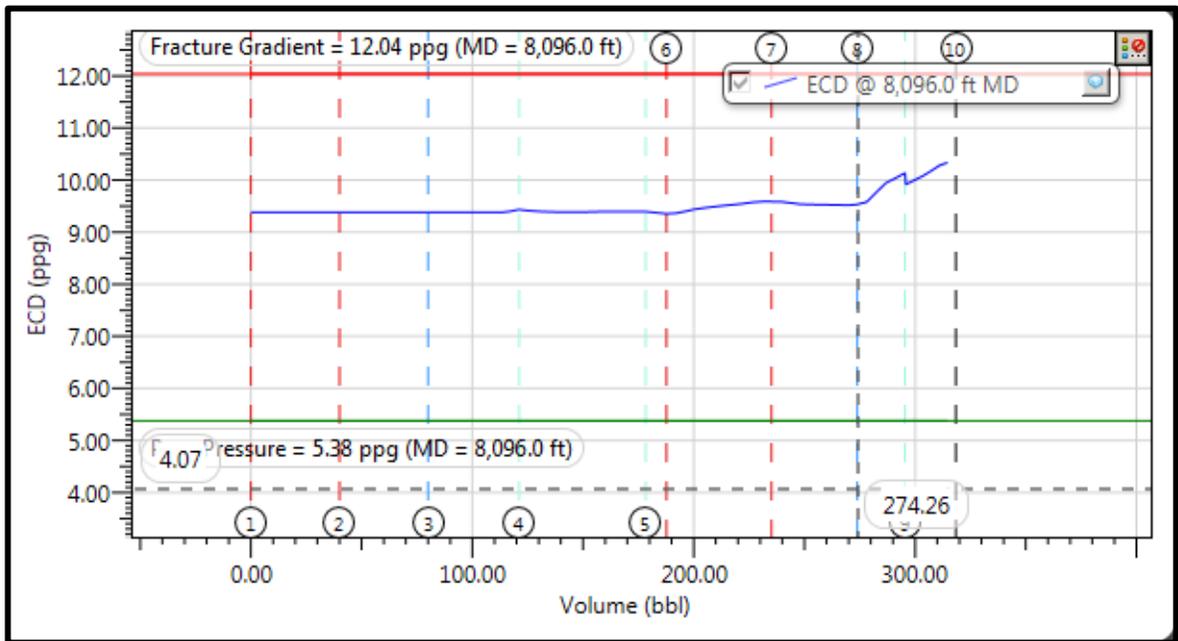
Tabla 6. Casos de simulación en el software Landmark.

	Cemento	Calidad	Densidad
	No espumado	0%	14.5 lb/gal
Espumado	Densidad constante	20% aproximado	12 lb/gal
		25%	11.28 lb/gal
	Densidad escalonada	Variación en un rango 15%-18%	12 lb/gal
			12.2 lb/gal
			12.5 lb/gal

En la **Tabla 6**, se observan las características de cada cemento utilizado en las corridas de simulación, el primer caso, evalúa un cemento sin espumar, con una densidad de 14.5 lb/gal, que corresponde a la data real de cementación del pozo de estudio. En el caso dos y tres, se realiza una simulación con densidad constante a través de la sección a cementar, en el caso dos se establecen un valor de densidad para determinar la calidad de la espuma y en el caso 3 se establece un valor de calidad para observar cómo cambia la densidad. Por último, se plantea una cementación con densidad escalonada, es decir que habrá una variación de la densidad en cada intervalo de profundidad trabajado, para esta operación se bombean caudales de cemento con una calidad de nitrógeno diferente en cada sección.

El análisis de los casos planteados anteriormente se llevó a cabo a través de tres variables, la densidad circulante equivalente (ECD), la calidad del cemento y la densidad final, puesto que el objetivo del proyecto consiste en generar una lechada espumada con una densidad menor a la actualmente utilizada en campo (14.5 lb/gal). En el **Gráfico 1**, se muestra el ECD del cemento sin espumar.

Gráfico 1. ECD cemento sin espumar.



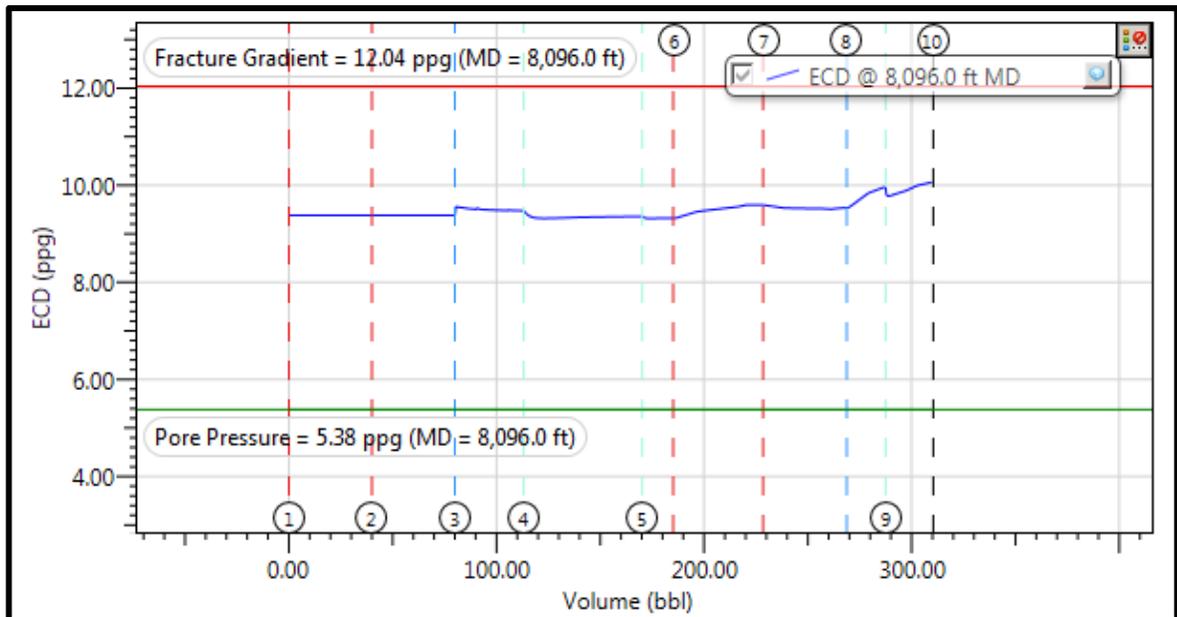
En el **Gráfico 1** se observa la densidad circulante equivalente (ECD) la cual es generada por los fluidos que son ingresados al pozo, de la línea vertical 1 hasta la línea 3 representa el fluido de perforación, de la línea 3 hasta la línea 6 representa el espaciador, de la línea vertical 6 hasta la línea 8 al preflujo y por último de la línea 8 en adelante representa el cemento. En la **Tabla 7** se muestran las densidades de los fluidos bombeados al pozo con el cemento sin espumar.

Tabla 7. Fluidos bombeados al pozo con un cemento sin espumar.

Fluido	Densidad (lb/gal)
Fluido de perforación	8.8
Espaciador	10
Preflujo	8.4
Cemento sin espumar	14.5

Con la **Tabla 7**, se corrobora los resultados obtenidos en el **Gráfico 1** con los cambios de densidades correspondientes. Además, se observa en el **Gráfico 1**, el comportamiento del ECD no varía de gran manera a excepción de la sección de cemento donde se obtiene un valor de 10.5 lb/gal. En el **Gráfico 2**, se muestra el ECD para los cementos espumados de estudio.

Gráfico 2. ECD cemento espumado.



En el **Gráfico 2**, se observa la densidad circulante equivalente (ECD) para un cemento espumado generada por las distintas densidad de los fluidos ingresados al pozo, se observa que se tiene un comportamiento similar al del **Gráfico 1** desde la línea vertical 1 hasta la línea 8 pero después se observa que el valor final de ECD correspondiente a la sección del cemento aumenta hasta 10 lb/gal aproximadamente, esto debido a que el cemento espumado tiene mayor densidad a comparación de los otros fluidos inyectados en el pozo, pero este valor es menor en comparación con el ECD obtenido en el cemento sin espumar, dado que la densidad del cemento espumado es menor. En la **Tabla 8**, se muestran las densidades de cada fluido bombeado.

Tabla 8. Fluidos bombeados al pozo con un cemento espumado.

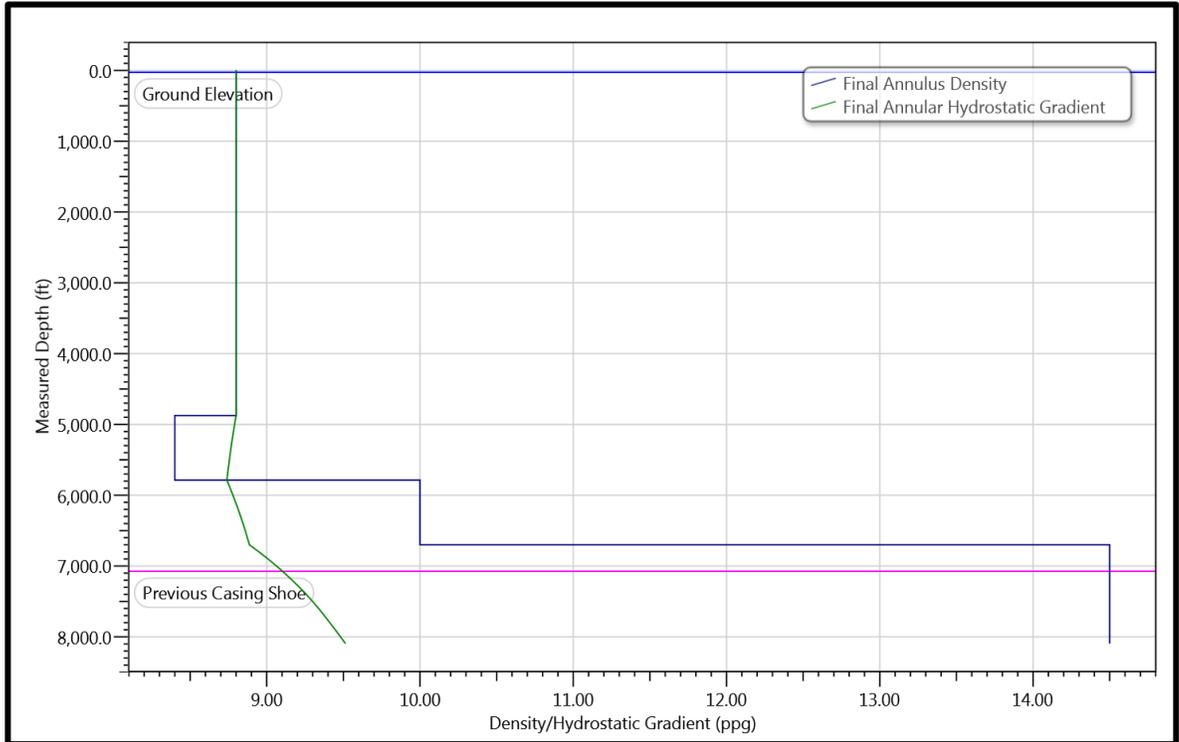
Fluido	Densidad
Fluido de perforación	8.8 lb/gal
Espaciador	10 lb/gal
Preflujo	8.4 lb/gal
Cemento espumado	Rango de 11.28 a 12.5 lb/gal (según caso)

Como se observa en la **Tabla 8**, los fluidos no presentan un cambio de densidad en comparación con la **Tabla 7** a excepción de la densidad del cemento, como se puede observar en el **Gráfico 1** y en el **Gráfico 2** en la parte final con el incremento del ECD.

Finalmente, no se evidenció cambio en el ECD de los casos evaluados con el uso de un cemento espumado, debido a que la densidad de estos no cambia significativamente, manteniendo iguales el resto de los fluidos bombeados al pozo; pero que, en comparación con el uso de un cemento sin espumar, la densidad circulante equivalente es mayor.

3.3.1.1 Caso 1: Simulación de un cemento sin espumar (lechada base) con una densidad de 14.5 lb/gal (Landmark). Para el primer caso de simulación en el aplicativo Opticem, se evaluó el comportamiento de un cemento no espumado con una densidad de 14.5 lb/gal, el cual fue utilizado en la cementación del pozo de estudio. En el **Gráfico 3** se muestra el comportamiento que tiene el cemento no espumado a medida que aumenta la profundidad.

Gráfico 3. Densidad vs. la profundidad (Caso 1 Landmark).



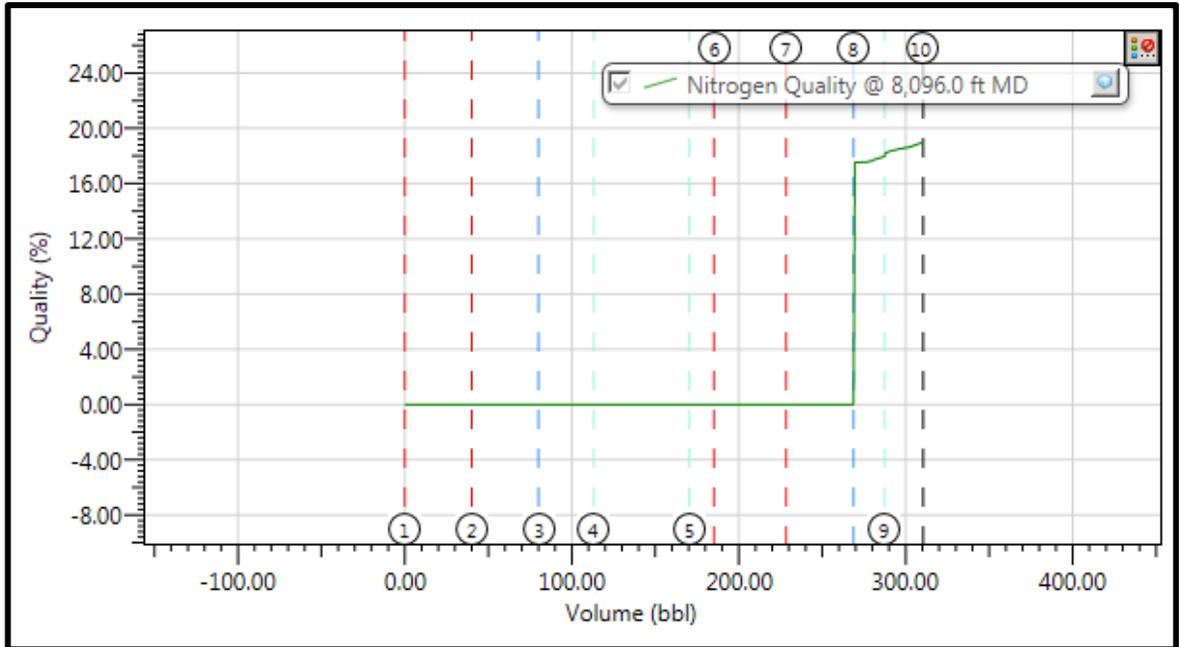
En el **Gráfico 3** se evidencia que, la densidad de cada intervalo corresponde a la densidad de cada fluido ingresado al pozo las cuales se mostraron anteriormente en la **Tabla 7**, además, en la zona a cementar, es decir aproximadamente desde los 6500 pies de profundidad, la densidad se comporta de manera constante en un valor de 14.5 lb/gal.

La interpretación del gráfico de calidad del cemento no se tiene en cuenta en este caso, debido a que la calidad de un cemento no espumado es cero y la espuma que posiblemente pueda generarse representa un problema.

La densidad del cemento usada en el caso de simulación uno, será utilizada como lechada base, es decir, densidad de 14.5 lb/gal.

3.3.1.2 Caso 2: Simulación de un cemento espumado con densidad constante de 12 lb/gal (Landmark). El segundo caso evaluado consistió en un cemento espumado con densidad constante de 12 lb/gal. En el **Gráfico 4** se observa la calidad del cemento espumado para una densidad establecida de 12 lb/gal.

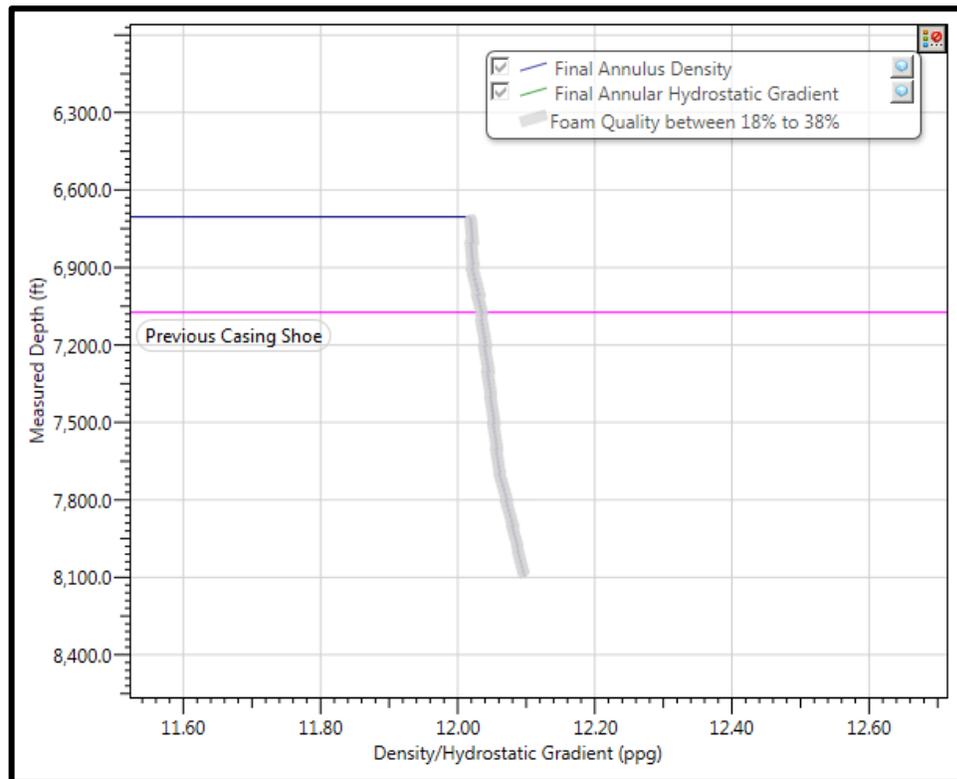
Gráfico 4. Calidad del cemento espumado con una densidad constante de 12lb/gal (Caso 2 Landmark)



Como se observa en el **Gráfico 4**, la calidad del cemento necesaria para disminuir la densidad de la lechada en 2.5 lb/gal, es aproximadamente del 20%. El aumento en la calidad de la espuma se da a partir de los 270 barriles, que corresponde al volumen de cemento. La calidad de 0% corresponde a fluidos no espumados.

En la sección del cemento se observa que la calidad presenta un comportamiento ascendente, debido a que la cantidad de nitrógeno necesaria en el cemento que quedara ubicado en el tope del liner es menor que la requerida en fondo, esto se debe a que el nitrógeno al ser un gas se comprime a medida que aumenta la profundidad, es decir, la cantidad de nitrógeno necesaria para mantener la densidad constante en el intervalo a cementar es directamente proporcional a la profundidad. A continuación, en el **Gráfico 5**, se muestra el comportamiento de la densidad final del cemento espumado en el intervalo a cementar.

Gráfico 5. Densidad final vs. Profundidad (Caso 2 Landmark).

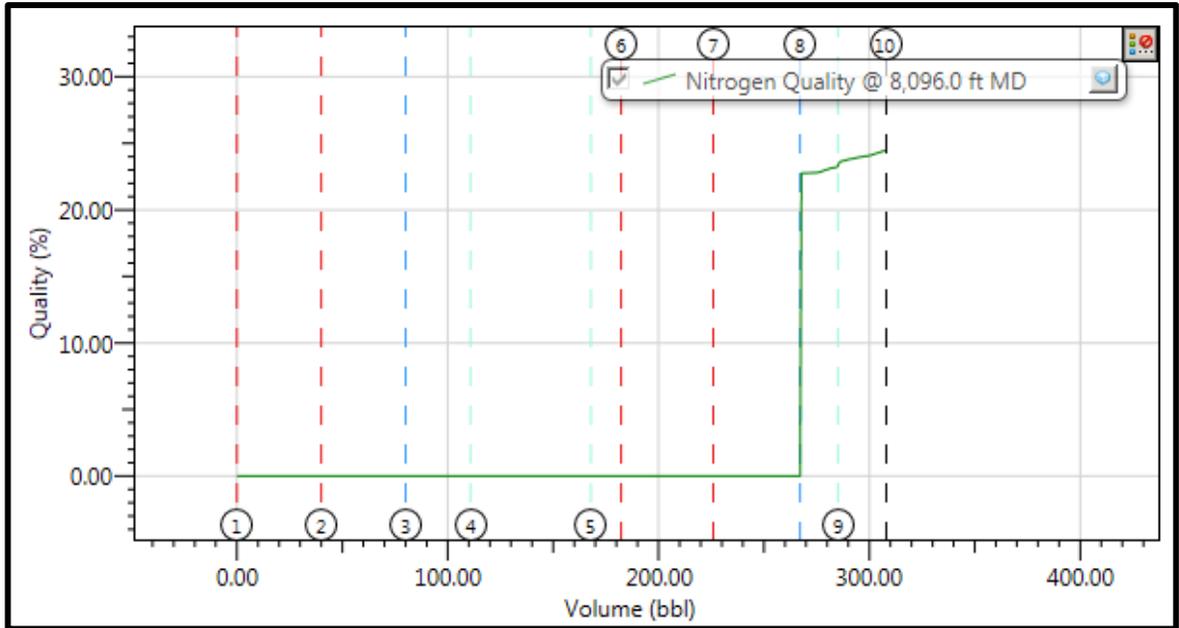


En el **Gráfico 5** se observa el comportamiento de la densidad respecto a la profundidad, manteniendo un modelo de densidad constante y una calidad de espuma del 20%, se identifica que a medida que aumenta la profundidad la densidad se mantiene casi constante, comportándose en un rango entre 12 lb/gal y 12.1 lb/gal.

El resultado del **Gráfico 5** es satisfactorio puesto que se confirma que al inyectar nitrógeno a una lechada de cemento, se disminuye su densidad, lo cual permitirá hacer uso de los cementos espumados en casos en donde se tienen presiones de fractura muy bajas y así evitar posibles daños de formación y pérdidas de fluido.

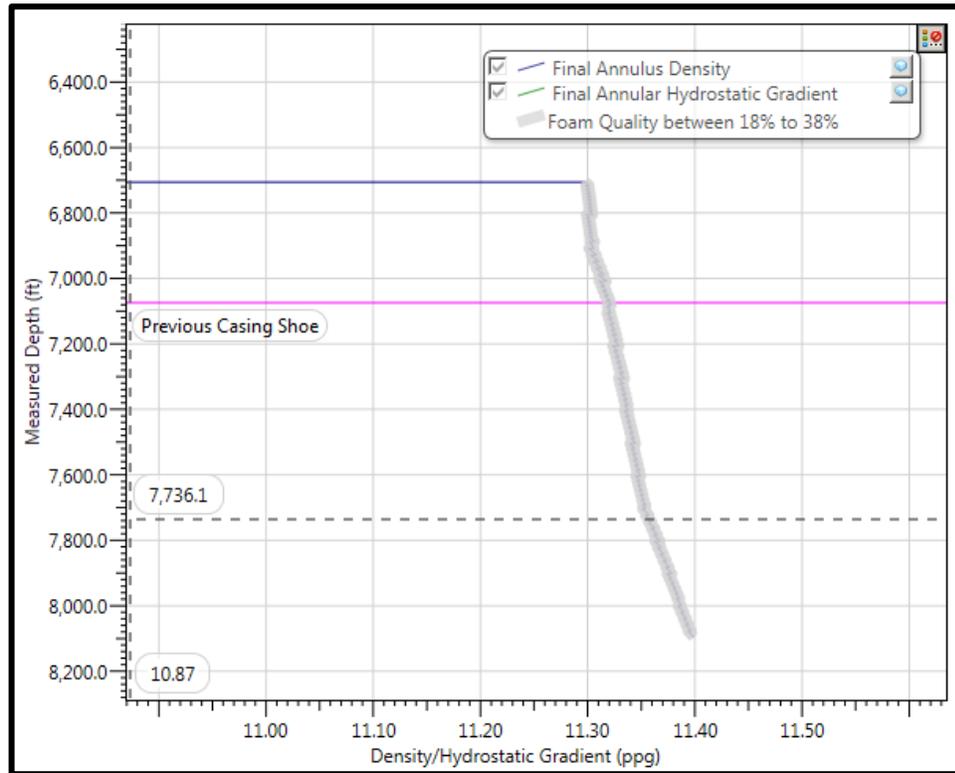
3.3.1.3 Caso 3: Simulación de un cemento espumado con densidad constante y calidad de espuma establecida del 25% (Landmark). El tercer caso, tiene como objetivo, ver la variación de la densidad de acuerdo con el cambio en la calidad de espuma para observar el comportamiento de la densidad con una calidad de espuma del 25%. En el **Gráfico 6**, se muestra el comportamiento de la calidad de nitrógeno con respecto al volumen.

Gráfico 6. Calidad del cemento espumado con una densidad constante y calidad del 25% (Caso 3 Landmark).



Como se observa en el **Gráfico 6**, para una densidad constante el valor de la calidad se encuentra entre 23% y 25%, lo cual indica que la simulación es satisfactoria, pues la calidad esperada era del 25%. En este caso se presenta un comportamiento similar al observado en el **Gráfico 4**, debido a que los primeros fluidos inyectados al pozo no son espumados, por lo tanto, su calidad es de 0%. En el momento en que se bombea el cemento espumado, la calidad aumenta manteniendo un comportamiento ascendente con el fin de conservar una densidad constante en la sección a cementar. En el **Gráfico 7**, se muestra el comportamiento de la densidad del cemento espumado en el intervalo correspondiente, utilizando una calidad de espuma del 25% aproximadamente.

Gráfico 7. Densidad final vs. Profundidad (Caso 3 Landmark).



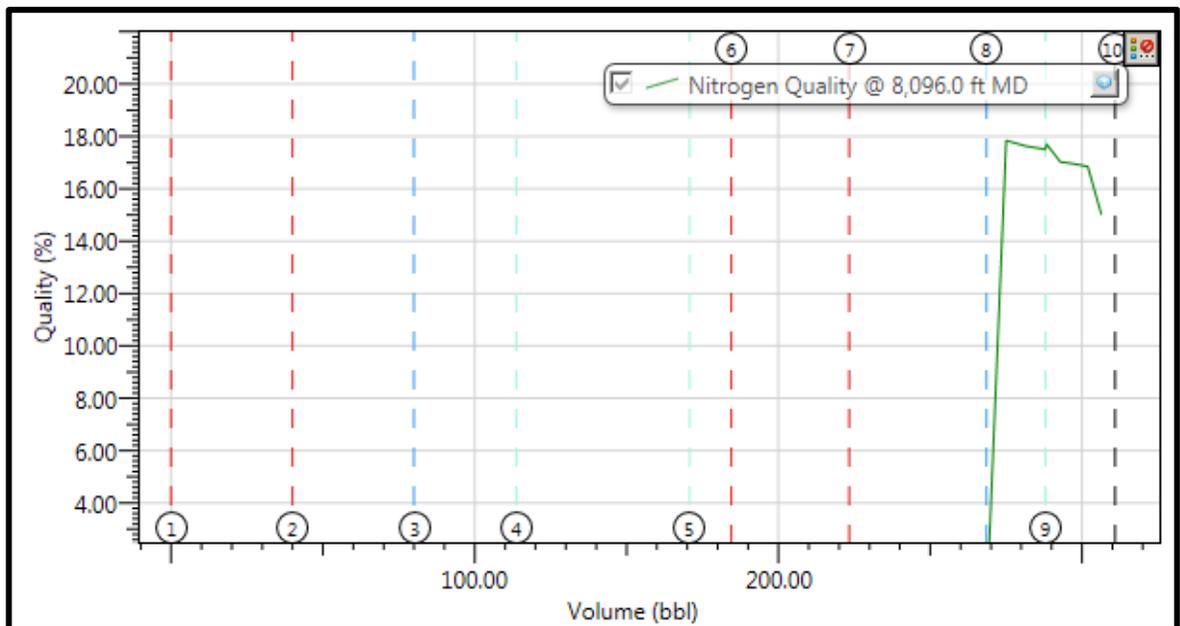
En el **Gráfico 7**, se observa el comportamiento de la densidad del cemento espumado con una calidad del 25%, en donde se dio una disminución de la densidad en 3.22 lb/gal teniendo en cuenta una densidad de lechada base de 14.5 lb/gal.

El resultado de la simulación en este caso mostró el comportamiento esperado, a razón de que en el modelo planteado originalmente se buscaba conservar la densidad constante a través de la sección a cementar, en lo expuesto anteriormente, la densidad no tiene un cambio significativo respecto al aumento de profundidad manteniéndose en un rango entre 11.2 lb/gal y 11.4 lb/gal. Para efectos del proyecto, este resultado es satisfactorio, a causa de que la disminución de la densidad es considerable teniendo en cuenta que la lechada base es de 14.5 lb/gal.

Realizando una comparación entre la densidad obtenida en el caso 2 con una calidad del 20% y la obtenida en el caso 3 con una calidad del 25%, se puede concluir que la densidad es inversamente proporcional a la calidad de espuma que tenga el cemento.

3.3.1.4 Caso 4: Simulación de un cemento espumado con densidad escalonada entre 12 lb/gal a 12.5 lb/gal (Landmark). Para el tercer caso se trabajó un cemento espumado, con un modelo de densidad escalonada, es decir que durante las operaciones de cementación se va a bombear la lechada en diferentes periodos, variando la densidad entre ellos, por lo tanto, cambiará la calidad de la espuma en cada sección. Los intervalos son determinados por profundidades, en el caso 4 varía la densidad del cemento cada 400 pies aproximadamente. El rango de densidades utilizado fue de 12 lb/gal a 12.5 lb/gal. En el **Gráfico 8**, se muestra el comportamiento de la calidad de la espuma con respecto al volumen.

Gráfico 8. Calidad del cemento espumado con una densidad escalonada entre 12lb/gal a 12.5 lb/gal (Caso 4 Landmark)



En el **Gráfico 8** se observa la calidad de la espuma que se requiere para mantener la densidad esperada en cada intervalo, la calidad con respecto al volumen anterior a los 270 barriles es 0% debido a que los fluidos bombeados al pozo en este intervalo no son espumados, a partir de los 270 barriles se encuentra el volumen de lechada para cementar la zona de estudio. En la **Tabla 9** se muestra las densidades establecidas y la calidad de espuma requerida para cada uno.

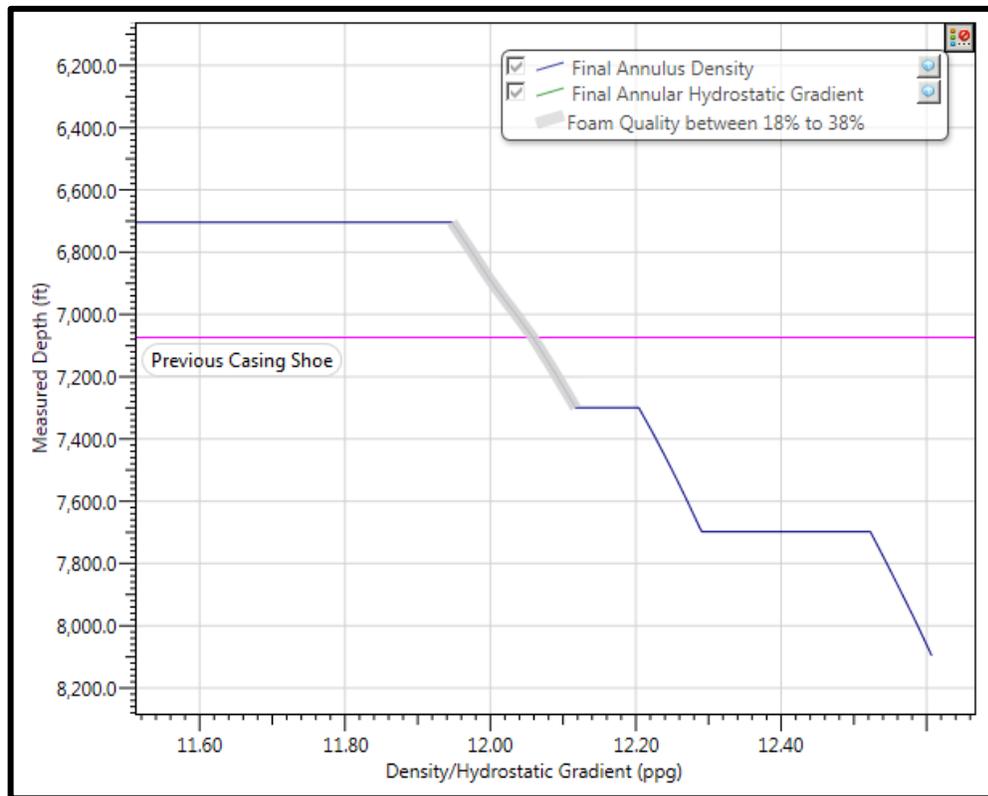
Tabla 9. Calidad de espuma en cada intervalo.

Densidad (lb/gal)	Calidad (%)
12 lb/gal	18.8-18.6 %
12.2 lb/gal	18.6-17 %
12.5 lb/gal	15 %

En la **Tabla 9** se observa el comportamiento de la calidad de la espuma según los cambios de densidad planteados en cada intervalo, a medida que se aumenta la densidad, la calidad de la espuma requerida va disminuyendo, por lo tanto, la relación entre la calidad y la densidad es inversamente proporcional.

A continuación, en el **Gráfico 9**, se muestra el comportamiento de la densidad final del cemento espumado, teniendo en cuenta las densidades de la **Tabla 9** con respecto a la profundidad.

Gráfico 9. Densidad final vs. Profundidad (Caso 4 Landmark).



En el **Gráfico 9**, se observa el comportamiento de la densidad respecto a la profundidad con un modelo de densidad escalonada y una calidad de espuma en un rango de 18.8 a 15%. Como se muestra en dicho gráfico la densidad se comporta entre los rangos preestablecidos (12 lb/gal a 12.5 lb/gal).

A diferencia de los modelos con densidad constante, en el caso 4 se observan tres intervalos con diferentes densidades, este modelo también cumple con el objetivo del proyecto, dado que la disminución de la densidad obtenida con respecto a la que se utiliza actualmente en el pozo de estudio es notable. Por lo tanto, la inyección de nitrógeno al cemento, en diferentes intervalos variando la calidad de la espuma también es viable teóricamente si se desea disminuir la densidad de una lechada.

3.3.2 iCem Service. Es un simulador especializado para el análisis del comportamiento de fluidos, simulando el desplazamiento de estos en dos y tres dimensiones, antes y durante las operaciones de cementación, además permite monitorear variables específicas en tiempo real, considerando diferentes escenarios de trabajo, lo que permite generar un mejor análisis teniendo en cuenta las condiciones del pozo y como estas afectan al cemento.

Al ser un programa especializado, requiere mayor cantidad de datos de entrada, los cuales se observan en el **Cuadro 11**.

Cuadro 11. Datos de entrada para el simulado iCem Service.

Datos de entrada	
Elevación de la mesa rotaria y profundidad de la cementación.	Profundidad y diámetro del hueco abierto.
Survey del pozo	Información del revestimiento
Presiones de poro y de fractura	Temperatura de la superficie y del fondo del pozo
Perfil de temperatura circulante	Información de la torta de lodo y número de erodabilidad.
Líneas superficiales	Centralización del revestimiento
Profundidad y diámetro del revestimiento anterior de la zona a cementar.	

Fuente: Halliburton. Manual iCem Service, software.

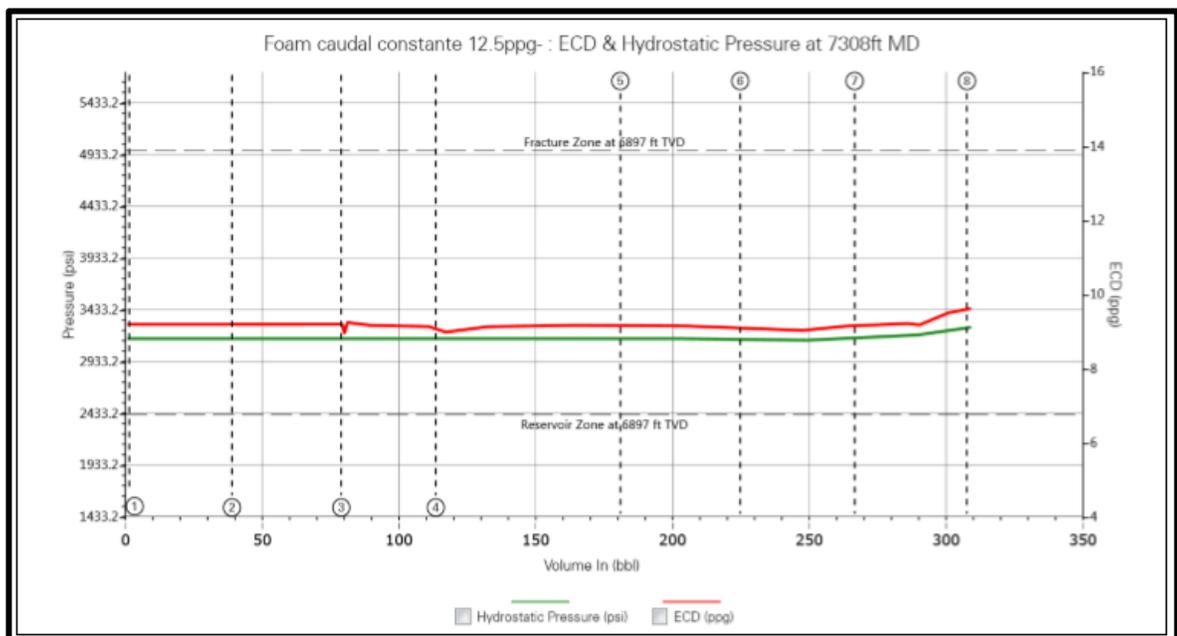
Como se observa en el **Cuadro 11**, en el software iCem Service se requiere más información de la utilizada en el software anterior, por esta razón los resultados de la simulación realizada ayudan a corroborar los resultados obtenidos con Opticem y evaluar nuevos escenarios.

Durante el desarrollo de la simulación, se evaluaron dos casos en los cuales se varió la densidad de la lechada base a espumar. El primer caso consistió en una lechada base de densidad de 16 lb/gal y en el segundo caso se disminuyó la densidad base a 14.5 lb/gal. Adicionalmente, en ambos casos se determinó que la

inyección de nitrógeno se realizaría de manera constante para poder llegar a la densidad objetivo de 12.5 lb/gal.

3.3.2.1 Caso 1: Simulación de un cemento espumado de 12.5 lb/gal utilizando una densidad de lechada base de 16 lb/gal con un modelo de caudal de nitrógeno constante (iCem Service). En el caso 1 realizado en el software iCem Service, se evaluó un cemento espumado con una densidad de 12.5 lb/gal con un modelo de caudal de inyección de nitrógeno contante, a diferencia de los casos que se realizaron con el software Landmark en el aplicativo Opticem donde se utilizó un modelo de densidad constante. Además, se aumentó la densidad de la lechada base a 16 lb/gal con el fin de observar si era posible alcanzar la densidad objetivo. Para el análisis se evaluaron las variables de ECD y el comportamiento final de la densidad. El **Gráfico 10** muestra el comportamiento que tiene el ECD con respecto al volumen.

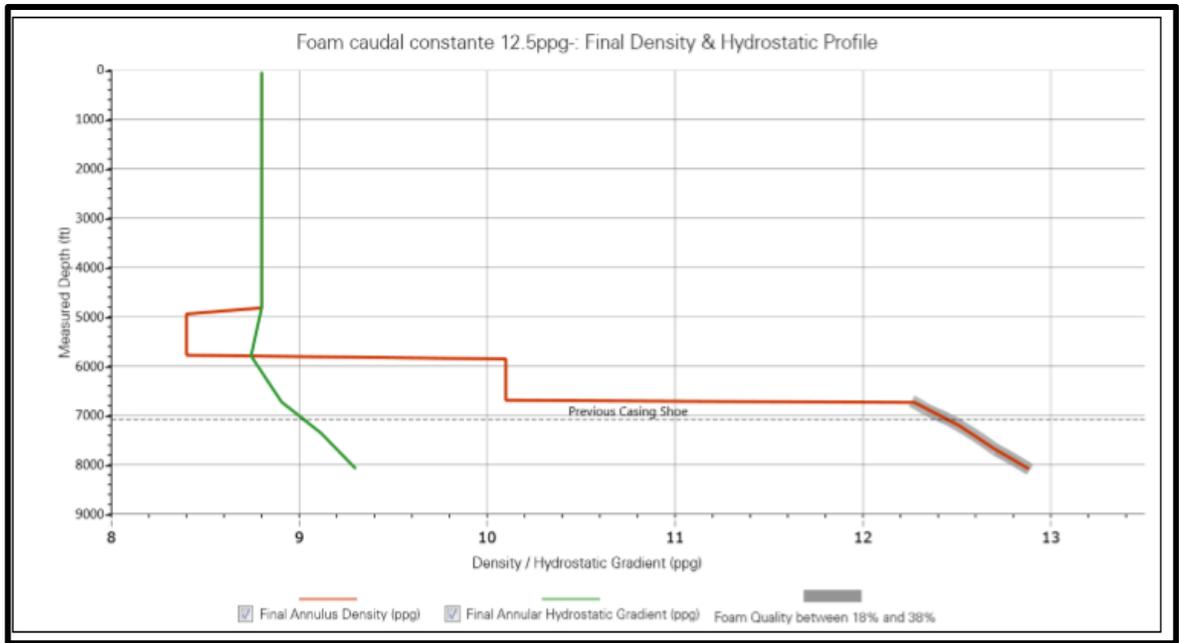
Gráfico 10. Presión hidrostática, ECD vs volumen, cemento espumado de 12.5 lb/gal con lechada base de 16 lb/gal (Caso 1 iCem Service).



En el **Gráfico 10** se puede observar que en la sección final, entre la línea vertical 7 y la línea 8, la mayor presión generada por la columna hidrostática es cerca de 3433.2 psi y que el mayor ECD es aproximadamente 10 lb/gal. Comparando con los casos simulados de cemento espumado en el anterior software, se observa que el comportamiento del ECD es similar, con lo cual se puede inferir que la densidad de la lechada base utilizada no afecta el ECD.

En el **Gráfico 11** se observa el comportamiento de la densidad final del cemento espumado con respecto a la profundidad para una lechada de 12.5 lb/gal con modelo de caudal de inyección de nitrógeno constante.

Gráfico 11. Densidad y gradiente hidrostático final vs profundidad (Caso 1 iCem Service)

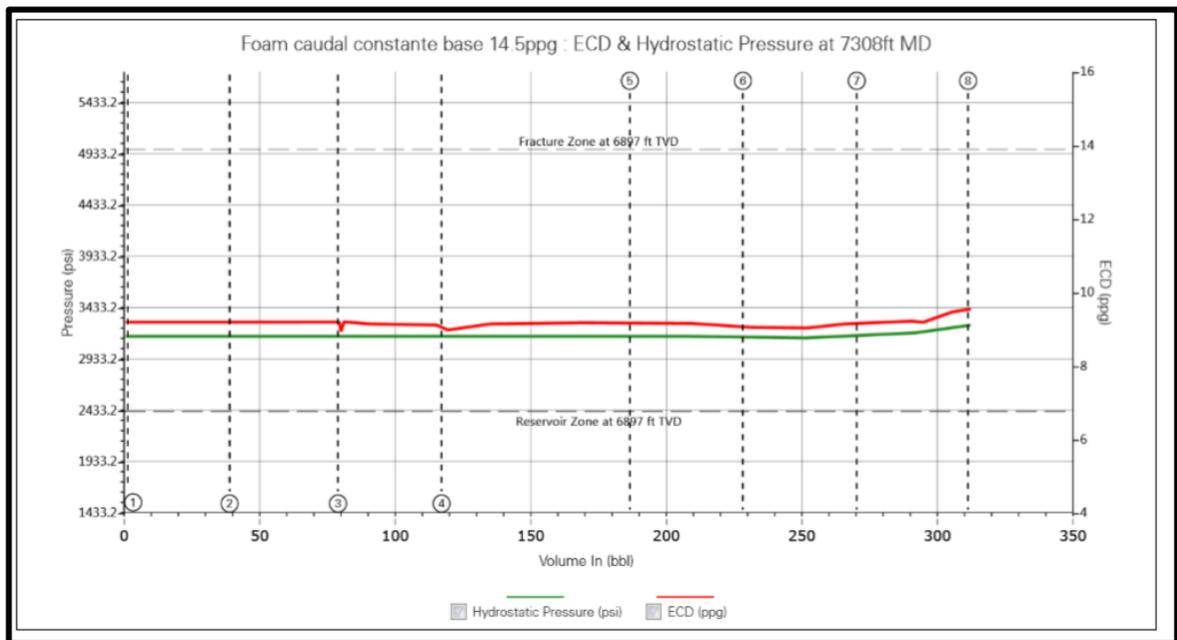


Como se observa en el **Gráfico 11** la densidad final obtenida para el cemento espumado se encuentra en un rango de 12.39 a 12.89 lb/gal, esto debido a que el modelo planteado de inyección de nitrógeno a caudal constante, va a generar cambios en la densidad final, estas variaciones se deben a los esfuerzos compresivos a los que se somete el gas dentro de la matriz del cemento, los cuales serán mayores en el fondo del pozo aumentando así la densidad, por lo tanto al mantener un modelo de inyección de nitrógeno constante la densidad de la lechada espumada será directamente proporcional a la profundidad.

3.3.2.2 Caso 2: Simulación de un cemento espumado de 12.5 lb/gal utilizando una densidad de lechada base de 14.5 lb/gal con un modelo de caudal de nitrógeno constante (iCem Service). Para el segundo caso de simulación en el programa iCem Service se planteó un cemento espumado con una densidad de 12.5 lb/gal, teniendo como densidad de lechada base 14.5 lb/gal (actualmente utilizada en Campo Castilla), con el propósito de disminuir la densidad de la lechada y así evitar fracturas inducidas las cuales pueden generar problemas operacionales, además se propone un modelo de inyección de nitrógeno constante.

Al igual que en el caso anterior, se analiza el comportamiento de la densidad final y el ECD. En el **Gráfico 12** se expone el comportamiento que tiene el ECD y la presión hidrostática con respecto al volumen de fluidos ingresado al pozo.

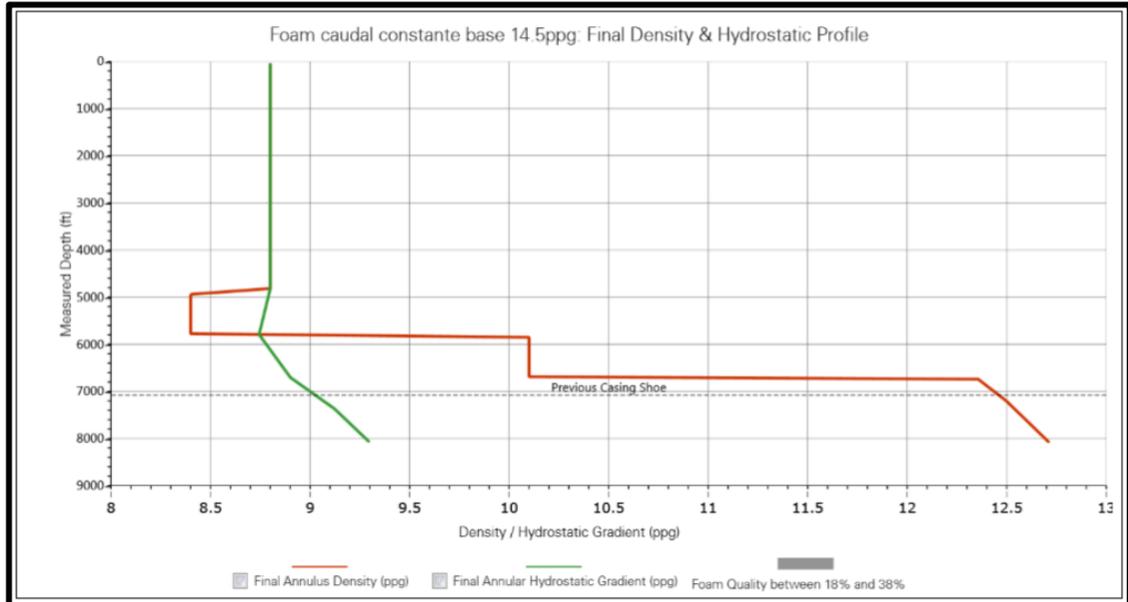
Gráfico 12. Presión hidrostática, ECD vs volumen, cemento espumado de 12.5 lb/gal con lechada base de 14.5 lb/gal (Caso 2 iCem Service).



El ECD mostrado en el **Gráfico 12** se comporta de la misma manera que el observado en el caso anterior, esto debido a que la densidad objetivo es la misma. Con esto, se corroboran los resultados obtenidos en el software Landmark en el aplicativo Opticem respecto al ECD de los cementos espumados los cuales tienen comportamientos parecidos debido a la similitud de sus densidades finales. A su vez se conserva un comportamiento casi lineal en toda el gráfico debido a que la densidad de los primeros fluidos bombeados al pozo no cambia considerablemente como se muestra en la **Tabla 8**, a excepción de la densidad del cemento la cual se ve representa al final del gráfico con un leve incremento.

En el **Gráfico 13** muestra la densidad final de una lechada de cemento espumado de 12.5 lb/gal con respecto a la profundidad del pozo.

Gráfico 13. Densidad final vs profundidad (Caso 2 iCem Service).



En el **Gráfico 13** se observa una rampla descendente que muestra un aumento de densidad respecto a la profundidad como ocurrió en el caso anterior, esto debido a que, en la parte más profunda del cemento, existirá mayor presión haciendo que el volumen de gas disminuya y aumente el valor de la densidad.

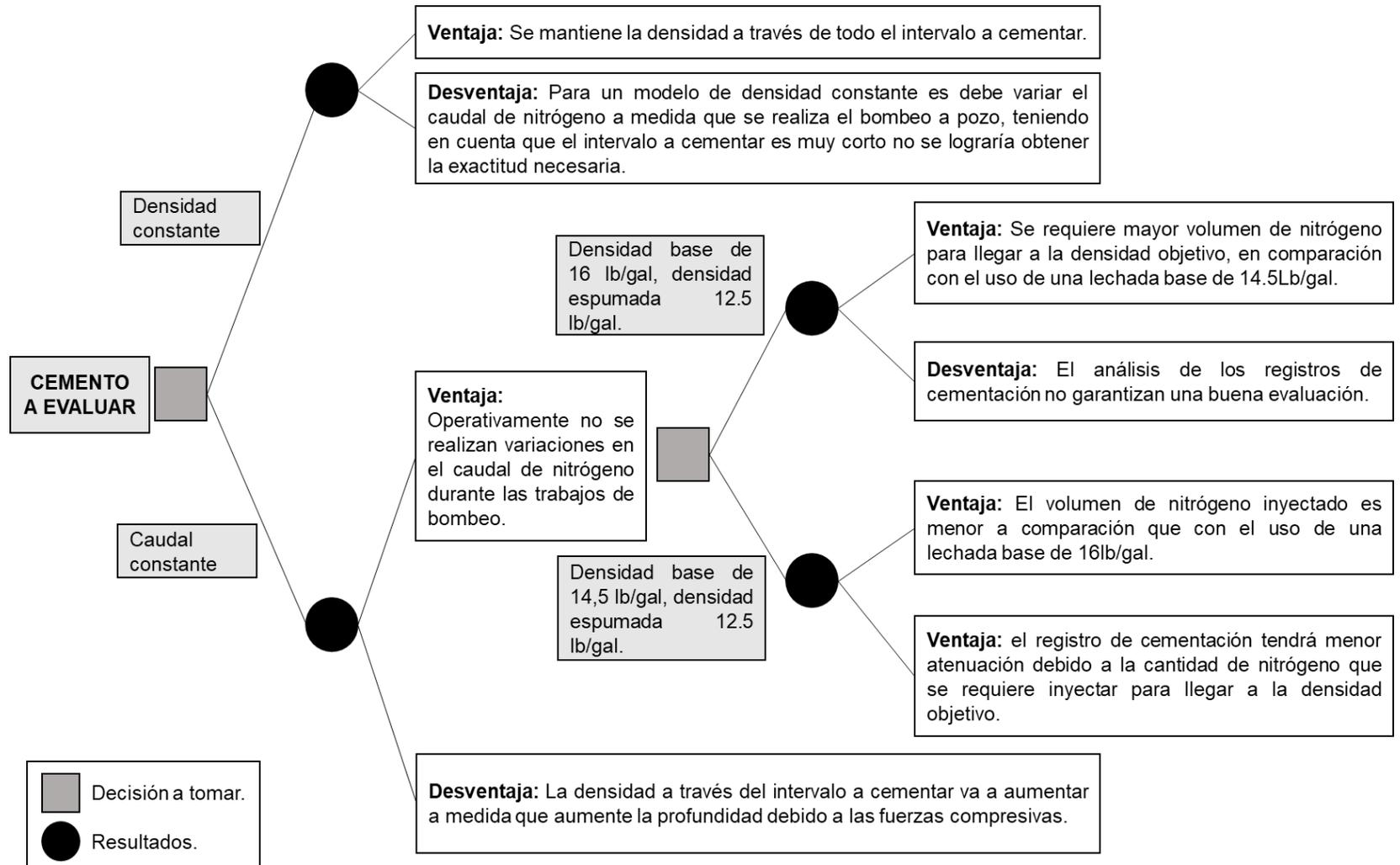
El programa iCem Service permitió validar los resultados de las simulaciones, al comparar las variables analizadas. Estas se comportan de manera similar a los gráficos obtenidos con el software Landmark, además, iCem Service ofrece una mayor exactitud al ser un programa especializado en el análisis de fluidos en el pozo, es por esto que ofrece mayor confiabilidad, por lo tanto, se comprueba que espumar el cemento utilizado actualmente es una medida eficiente para disminuir la densidad de la lechada.

Por otro lado, es importante tener en cuenta la calidad de la espuma necesaria para disminuir la densidad de la lechada según los requerimientos necesarios, dado que a mayor calidad de espuma, mayor cantidad de nitrógeno y menor densidad. Sin embargo es importante corroborar que las propiedades adicionales del cemento, como su estabilidad y su resistencia a la compresión no se afecten negativamente por la disminución de la densidad, por lo tanto una buena práctica es evaluar el comportamiento del cemento y sus propiedades por medio de pruebas de laboratorio.

4. CARACTERIZACIÓN DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO Y UNA LECHADA DE CEMENTO CON MICROESFERAS A TRAVÉS DE PRUEBAS DE LABORATORIO

A partir del análisis y los resultados entregados por los simuladores en el capítulo anterior, se realizó una evaluación de posibles problemas operativos, para poder determinar la lechada a diseñar y evaluar a través de pruebas de laboratorio. De los casos simulados con el software Landmark, el caso uno (Simulación de un cemento sin espumar (lechada base) con una densidad de 14.5 lb/gal.) se llevó a laboratorio debido a que este es el utilizado actualmente en el Campo Castilla y el segundo caso (Simulación de un cemento espumado de 12.5 lb/gal utilizando una densidad de lechada base de 14.5 lb/gal con un modelo de caudal de nitrógeno constante) llevado a laboratorio se determinó por medio de un árbol de decisión. En la **Figura 8** se muestra el árbol de decisión para la determinación del segundo caso evaluado a través de pruebas de laboratorio, teniendo en cuenta problemas operativos y los diferentes casos evaluados por medio de los dos simuladores utilizados en el capítulo anterior (Landmark y iCem Service).

Figura 8. Árbol de decisión para el cemento a evaluar.



Teniendo en cuenta las diferentes posibilidades que se muestran en la **Figura 8** y las ventajas y desventajas que cada una de ellas tiene, se determinó que la mejor opción para llevar a laboratorio como caso de comparación con el cemento actualmente utilizado en el Campo Castilla, es una lechada con densidad de 12.5 lb/gal tomando como densidad base 14.5 lb/gal y un modelo de inyección de nitrógeno a caudal constante, debido a que operacionalmente tiene menor riesgo teniendo en cuenta que el intervalo a cementar es corto, lo cual dificultaría realizar cambios en el caudal de nitrógeno a los tiempos determinados en caso de realizarse un modelo con densidad constante.

Además, al utilizar una lechada base de 14.5 lb/gal se requiere menor cantidad de nitrógeno, lo cual tendrá menor impacto en los registros de cementación, permitiendo realizar una mejor interpretación.

La calidad del cemento va a variar a través del intervalo a cementar debido a los esfuerzos compresivos a los que se somete la lechada, dado que a medida que aumenta la profundidad va a ser mayor el esfuerzo sobre ella, por esta razón a mayor profundidad menor volumen de gas (a causa de la compresión generada) y por consiguiente la densidad de la lechada va a ir aumentando con la profundidad. En la **Tabla 10** se muestra las variaciones que tendrá la calidad y a su vez la densidad según la simulación realizada en el caso 2 en el software iCem Service.

Tabla 10. Variación de la densidad y calidad de la espuma con respecto a la profundidad para una lechada de cemento espumado con modelo de inyección de nitrógeno a caudal constante.

Profundidad MD (pies)	Densidad (lb/gal)	Calidad de espuma (%)
7079.3	12.46	16
7551.1	12.58	15
8095.8	12.72	14

De acuerdo con la **Tabla 10**, se escoge un promedio según las variaciones obtenidas en la densidad, de esta forma se lleva a escala laboratorio un cemento espumado con una densidad de 12.5 lb/gal y calidad de espuma del 15% teniendo como lechada base el cemento con densidad de 14.5 lb/gal. Adicionalmente, la primera muestra llevada a laboratorio corresponde a la lechada base de cemento con una densidad de 14.5 lb/gal, esto con el fin de poder comparar el comportamiento de cada una, verificar que las propiedades del cemento sean adecuadas para el desarrollo de los trabajos de cementación, satisfaciendo las condiciones de presión y temperatura a las que será sometidas según las características del pozo de estudio.

4.1 FORMULACIÓN DE UNA LECHADA SIN ESPUMAR CON MICROESFERAS Y UNA LECHADA ESPUMADA

Para la formulación de una lechada de cemento se debe tener en cuenta que todos los aditivos y las cantidades a utilizar cumplan con las características necesarias para satisfacer las necesidades del pozo en la sección de estudio. Para efectos del proyecto se tiene como primera muestra, una lechada con microesferas y densidad de 14.5 lb/gal, en la **Tabla 11** se observa el diseño establecido para la lechada de cemento no espumada.

Tabla 11. Diseño de lechada de cemento no espumado con microesferas y densidad de 14.5 lb/gal.

Material	Función	Gravedad específica	Cantidad (gr)
Dyckerhoff Class G	Cemento	3.15	648.19
SCR-100 (PB)	Retardador	1.25	0.91
Silicalite-Compacted	Extendedor/potenciador de esfuerzo compresivo	2.52	5.19
Filite-atmospheric	Microesferas	0.95	64.82
HALAD-344 (PB)	Controlador de filtrado	1.22	4.54
Agua Fresca	-	1	318.85

El diseño de lechada mostrado en la **Tabla 11**, se realizó con el fin de simular el cemento actualmente utilizado en el Campo Castilla durante los trabajos de cementación del pozo de estudio. En la **Tabla 12** se observa el diseño establecido para el cemento espumado con una densidad de 12.5 lb/gal.

Tabla 12. Diseño de la lechada de cemento espumado con densidad de 12.5 lb/gal.

Material	Función	Gravedad específica	Cantidad (gr)
Dyckerhoff Class G	Cemento	3.15	1188.10
SCR-100 (PB)	Retardador	1.25	1.66
Silicalite-Compacted	Extendedor/potenciador de esfuerzo compresivo	2.52	9.50
Filite-atmospheric	Microesferas	0.95	118.81
HALAD-344 (PB)	Controlador de filtrado	1.22	8.32
Agua Fresca	-	1	584.45
ZoneSealant 2000	Surfactante/espumante	1.066	15.33

En la **Tabla 12** se puede evidenciar los aditivos necesarios para el diseño del cemento espumado, a diferencia del cemento con microesferas, una lechada espumada requiere de un aditivo adicional, el cual permitirá la generación de espuma en la mezcla. El ZoneSealant 2000, fue el surfactante utilizado en el diseño, este aditivo actuó como un agente espumante, permitiendo la generación de microburbujas en la matriz de la lechada, logrando de tal forma la disminución de la densidad de la misma. En la **Figura 9**, a la izquierda se observa la lechada base y a la derecha la lechada espumada.

Figura 9. Lechada base y lechada espumada.



Como se observa en la **Figura 9**, el volumen de la lechada aumenta con la formación de la espuma, obteniendo así una lechada con una densidad de 12.49 lb/gal y una calidad de espuma aproximada del 13.3%, alcanzando un resultado muy cercano al esperado con la simulación de la lechada donde se había determinado una densidad de 12.5 lb/gal con una calidad de espuma del 15%.

Durante el pesaje de los aditivos en sus cantidades correspondientes, antes de realizar el mezclado se utilizó una balanza conectada a un programa especializado de la empresa Halliburton, el cual registra el lote y la cantidad del aditivo pesado a utilizar, permitiendo así obtener una medición más exacta de las cantidades sin alcanzar una desviación mayor a 0.003 gr.

Durante el proceso de mezclado, en el vaso del *mixer* se agrega primero agua, el retardador y el controlador, esto se mezcla a 1000 RPM. Posteriormente se agrega un *blend* compuesto por el cemento, las microesferas y el silicalite, mezclando a 4000 RPM. Usualmente se acostumbra a mezclar durante 30 segundos más, a una velocidad de 12000 RPM toda la lechada, pero debido a que dentro de la formulación de la lechada se tienen microesferas (fillite), este último paso se omite, dado que el material se puede romper debido a las altas velocidades de mezclado.

4.2 PRUEBAS DE LABORATORIO REALIZADAS A LAS LECHADAS DE CEMENTO

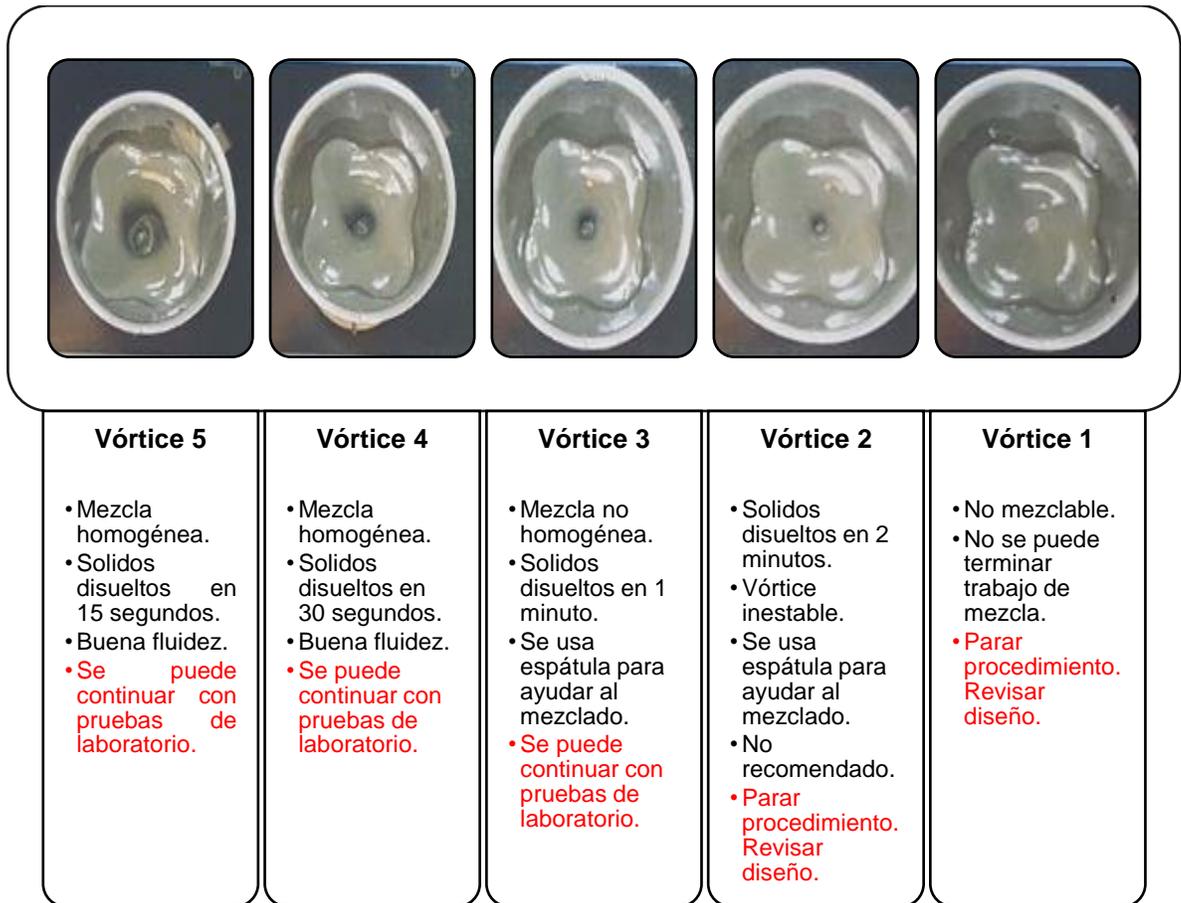
Después de tener el diseño de las dos lechadas y realizar el pesaje de cada uno de los aditivos se procede a ejecutar las pruebas de laboratorio correspondientes a cada una de las lechadas con el fin de comparar algunas de las propiedades entre las lechadas y verificar que el comportamiento sea el adecuado para los procesos y trabajos de cementación.

4.2.1 Lechada de cemento sin espumar con densidad de 14.5 lb/gal. Una vez realizada la formulación de la lechada de cemento no espumado, se procede a realizar la caracterización de este fluido mediante una serie de pruebas de laboratorio, las cuales consisten en la mezclabilidad, la reología a temperatura ambiente y de fondo y la resistencia a la compresión.

4.2.1.1 Mezclabilidad. Esta prueba se realiza, durante el proceso de mezclado de los aditivos. Consiste en observar el vórtice formado en el vaso del *mixer* (equipo donde se incorporan y unen los aditivos de la lechada). El resultado de esta prueba puede cambiar dependiendo del observador, puesto que se realiza de forma visual, y se compara con una escala ya establecida.

El rango de evaluación se encuentra en una escala de cero a cinco siendo cinco el mejor resultado, en la **Figura 10** muestra la escala con las características de los diferentes vórtices que se pueden formar.

Figura 10. Escala de vórtices, prueba de mezclabilidad.



En la **Figura 10** se observa, los diferentes vórtices que se pueden formar durante el mezclado de una lechada, teniendo en cuenta que solo las lechadas que se tengan un vórtice entre cinco y tres, pueden continuar siendo evaluadas en laboratorio. Las lechadas con vórtices de uno y dos, tendrán que ser reevaluadas, verificando su diseño y formulación.

La prueba de mezclabilidad, solo se realiza a la lechada sin espumar, puesto que esta va a ser la misma lechada base para espumar. Por esta razón el resultado de la prueba se asume igual para las dos lechadas.

4.2.1.2 Reología. Esta prueba se realizó a temperatura ambiente y a temperatura de fondo utilizando un viscosímetro Fann 35A en donde se ingresó un volumen de lechada al vaso del equipo y con esto se determinó el esfuerzo de corte a diferentes velocidades, 3, 6, 100, 200 y 300 RPM, esta prueba sirvió para determinar algunas características del fluido como el modelo del fluido y la viscosidad plástica, En la **Figura 11** se muestra el equipo utilizado para este procedimiento.

Figura 11. Viscosímetro Fann 35A.



Como se puede observar en la **Figura 11**, el equipo posee un tambor giratorio en la parte superior y en la parte inferior tiene un recipiente en donde es agregado el fluido a evaluar. A lo largo de la prueba, se realizaron mediciones de forma ascendente y descendente para luego poder sacar un promedio de esfuerzos lo cual hace que el resultado sea más confiable.

➤ **Reología a temperatura ambiente.** El primer procedimiento que se realiza a la lechada sin espumar es la medición de la reología a las velocidades ya establecidas a condición de temperatura ambiente. En la **Tabla 13** se muestra los resultados de la prueba con el promedio calculado.

Tabla 13. Reología del cemento no espumado a temperatura ambiente.

Cemento no espumado a condición ambiente			
RPM	Ascendente	Descendente	Promedio
3	11	11	11
6	20	22	21
100	187	183	185
200	327	323	325
300	440		440

Se puede observar en la **Tabla 13** que el esfuerzo cortante aumenta a medida que la velocidad del equipo aumenta, adicionalmente, los valores ascendentes y descendentes en cada velocidad son similares.

➤ **Reología a temperatura de fondo.** Para poder realizar esta prueba se sometió un volumen de lechada a un previo calentamiento.

El calentamiento se realizó hasta llevar la muestra a una temperatura establecida de 101°F, esta temperatura se determinó a través de una simulación (ver **Anexo A - grafica temperatura vs tiempo**), para así poder determinar la reología de la lechada a condiciones similares a las del pozo de estudio.

El equipo utilizado para llevar la muestra de cemento a la temperatura de 101 °F fue un consistometro atmosférico Fann modelo 165 AT, en la **Figura 12** se muestra el equipo utilizado para incrementar la temperatura de la muestra.

Figura 12. Consistometro Fann 165 AT.



La **Figura 12** muestra el equipo que aumenta la temperatura del cemento, posee un indicador digital, el cual muestra la temperatura actual y la temperatura objetivo (101 °F), además de esto, en la parte inferior del equipo se observa un recipiente en donde es ingresada la muestra a calentar, este recipiente mantiene el fluido caliente y en movimiento. El procedimiento consiste en esperar a que la temperatura actual llegue a la temperatura objetivo y dejar la muestra en el recipiente 30 minutos más para que toda la muestra tenga la misma temperatura.

Una vez terminado este procedimiento se procede a determinar la reología a la temperatura establecida, el proceso se realiza de forma igual a como se realizó con la muestra de lechada a temperatura ambiente y con el mismo equipo de la **Figura 11**. Los resultados de esta prueba se muestran en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Reología del cemento no espumado a temperatura de fondo.

Cemento no espumado a condiciones de fondo			
RPM	Ascendente	Descendente	Promedio
3	17	15	16
6	26	24	25
100	201	203	202
200	333	337	335
300	444		444

En la **Tabla 14** se puede observar el comportamiento que tiene este fluido a temperatura de fondo, el valor a cada velocidad se determinó de manera ascendente y descendente como en el caso anterior. Al comparar la **Tabla 14** con respecto a la **Tabla 13** se puede observar que, a mayor temperatura, mayor es la reología.

4.2.1.3 Resistencia a la compresión. Esta prueba tiene como objetivo determinar la resistencia que tiene el cemento a la presión. El procedimiento realizado no destruye la muestra, este consiste en introducir un volumen de lechada en un recipiente, el cual está conectado una sonda que genera ondas, el equipo se programa a la temperatura donde termina el WOC (136°F) (ver **Anexo A**-grafica waiting on cement) y la prueba se realiza a 3000 psi.

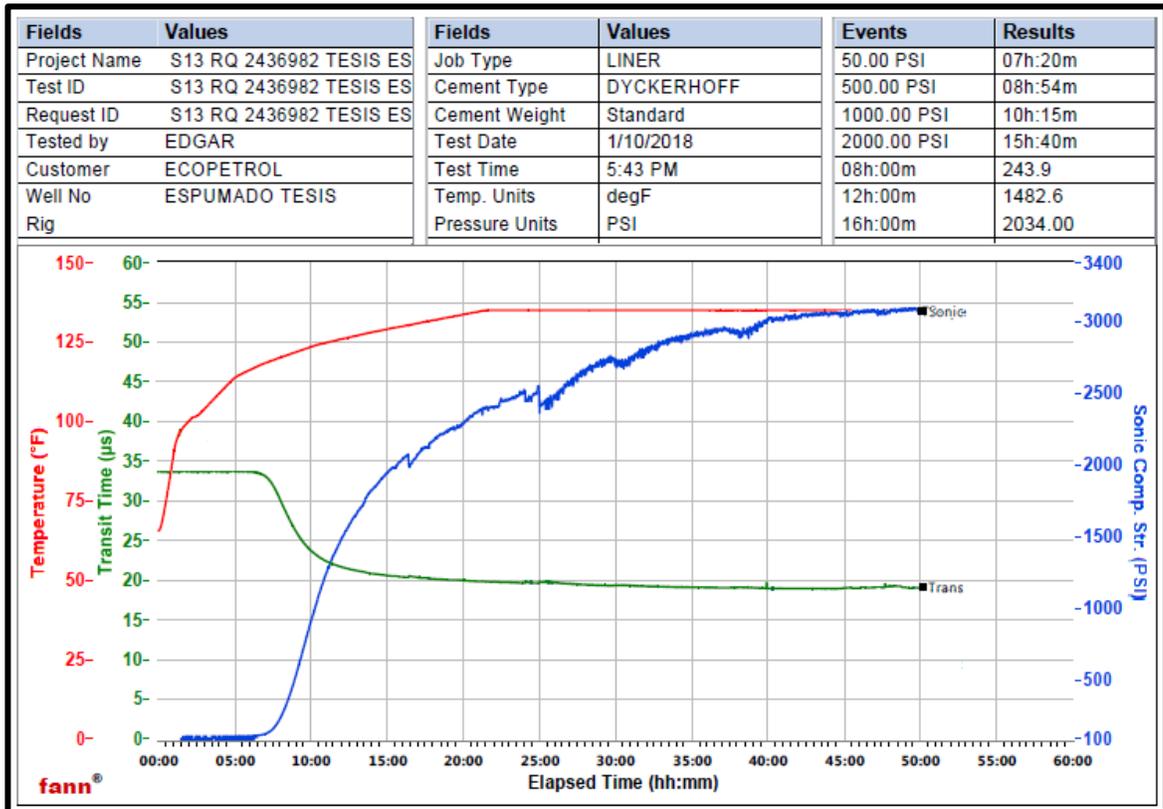
La onda generada por la sonda atravesará el cemento en un tiempo determinado, este tiempo de tránsito a través de la matriz determinará la presión máxima que el cemento resiste, En la **Figura 13** se muestra el equipo utilizado para realizar esta prueba.

Figura 13. Equipo de resistencia a la compresión (Método no destructivo- UCA).



Como se puede observar en la **Figura 13**, en la parte superior se encuentra el recipiente en donde está el cemento, se observan los indicadores de presión y temperatura. La duración de la prueba fue de 48 horas en donde se recopiló la información de tiempo de tránsito y temperatura. En el **Gráfico 14** se observan los resultados de la prueba.

Gráfico 14. Prueba de resistencia a la compresión (Método no destructivo-UCA).



En el **Gráfico 14** se observa que a medida que el tiempo pasa, el valor de presión aumenta hasta llegar a 3000 psi a las 48 horas que terminó la prueba, así mismo se observa que la temperatura comienza a aumentar hasta alcanzar una temperatura estable (136°F) y el tiempo de tránsito de la onda disminuye hasta tener un comportamiento estable. Además, se evidencia que el tiempo de la onda disminuye a medida que aumenta la presión que soporta el cemento, por ende, la resistencia a la compresión del cemento es inversamente proporcional al tiempo de tránsito de la onda que viaja a través de él.

Por medio de la prueba de resistencia a la compresión no destructiva se puede determinar la presión que puede soportar el cemento y cómo esta aumenta a medida que se da el fraguado, teniendo en cuenta la temperatura de la sección a cementar. Adicionalmente, en esta prueba se puede determinar el tiempo en el que se puede continuar con las operaciones de perforación o completamiento en condiciones óptimas o estables en el pozo.

4.2.2 Lechada de cemento espumada. Para realizar una lechada de cemento espumada, primero se realiza la mezcla de la lechada base en el mismo *mixer* donde se realizó previamente la lechada no espumada. Posteriormente, se vierte un volumen de lechada base establecido (1170 ml) en un vaso especial para espumar, junto con el surfactante ZoneSealant 2000, este recipiente cuenta con una serie de aspas que lo diferencian del convencional (Ver **Figura 14**), se tapa el vaso y se coloca en el *mixer* a 12000 RPM, donde se mezcla durante 2 segundos.

Figura 14. Vaso especial del *mixer* para cementos espumados.



Las pruebas realizadas a la lechada de cemento espumada fueron densidad, reología a temperatura ambiente, tiempo bombeable, estabilidad y resistencia a la compresión.

4.2.2.1 Densidad. Para determinar la densidad de un cemento espumado se toma una muestra de lechada y se vierte dentro de un cilindro (Ver **Figura 15**), donde se deja que el cemento seque y adquiera consistencia. Luego se corta el cilindro de cemento en 6 bloques iguales.

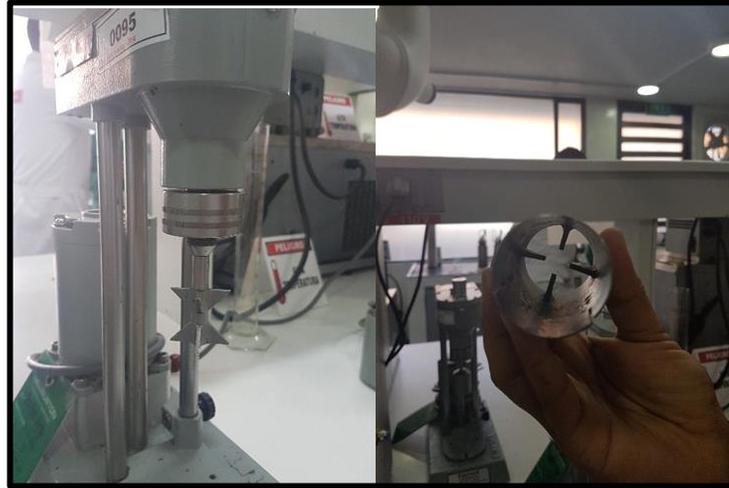
Figura 15. Molde de cilindro para prueba de densidad.



A cada bloque previamente cortado y lijado se le amarra un hilo; en un *beaker* lleno de agua se sumerge el bloque hasta que el agua lo tape, en este punto se mide el peso que tiene el recipiente junto con el bloque sumergido. Después se deja caer el bloque hasta el fondo del *beaker* y nuevamente se vuelve a medir el peso. Dividiendo los dos pesos tomados y multiplicándolos por 8.33 lb/gal (densidad agua), se obtiene la densidad del cemento. El procedimiento se realiza para los 6 bloques, para después realizar un promedio.

4.2.2.2 Reología. Esta prueba se realiza a temperatura ambiente pero se cambia el accesorio giratorio, pues el diseño convencional del equipo Fann 35A no permite una acertada caracterización de un fluido espumado, es por esto que la empresa Halliburton diseñó un accesorio especial para calcular esta propiedad. El instrumento se llama FYSA, en la **Figura 16** se observa el instrumento diseñado por Halliburton.

Figura 16. Dispositivo FYSA.



En la **Figura 16** a la izquierda se puede evidenciar que el accesorio FYSA, este a comparación del convencional posee unas aletas que generan mayor área de contacto con el fluido, lo que permite obtener un mejor resultado, adicionalmente, la imagen de la derecha se observa el complemento del equipo correspondiente, el cual cuenta con otras aletas. Que deben acoplarse al primer accesorio para que este funcione debidamente. Una vez unidos estos dos elementos se procedió a realizar la prueba de reología de la misma manera en la que se realizó en el cemento sin espumar. En la **Tabla 15** se observan los resultados obtenidos de la prueba.

Tabla 15. Reología del cemento espumado a temperatura ambiente.

Cemento espumado a temperatura ambiente.			
RPM	Ascendente	Descendente	Promedio
3	1	2	1.5
3D	1		1
6	4	2	3
6D	1		1
100	20	18	19
200	29	33	31
300		45	45

Como se puede ver en la **Tabla 15**, se determinaron dos valores adicionales 3D y 6D, los cuales son cruciales al momento de caracterizar un cemento espumado, estas mediciones corresponden a las velocidades de 3 y 6 RPM después de 10 segundos de movimiento continuo.

Para los cementos espumados, entre más bajo sea el valor de las lecturas en 3D y 6D, se considera mejor, dado que valores entre 5 y 6 indican una tixotropía muy alta en la lechada.

4.2.2.3 Tiempo bombeable. Esta prueba tiene como objetivo determinar el tiempo y la resistencia que ofrece el fluido a fluir, con el fin de saber el instante de tiempo en el que la muestra se hace difícil de bombear. En la prueba se utiliza un equipo el cuál se programa con tiempos ya establecidos y las condiciones de temperatura y presión que se esperan tener en el pozo, en la **Figura 17** se observa el equipo utilizado para esta prueba.

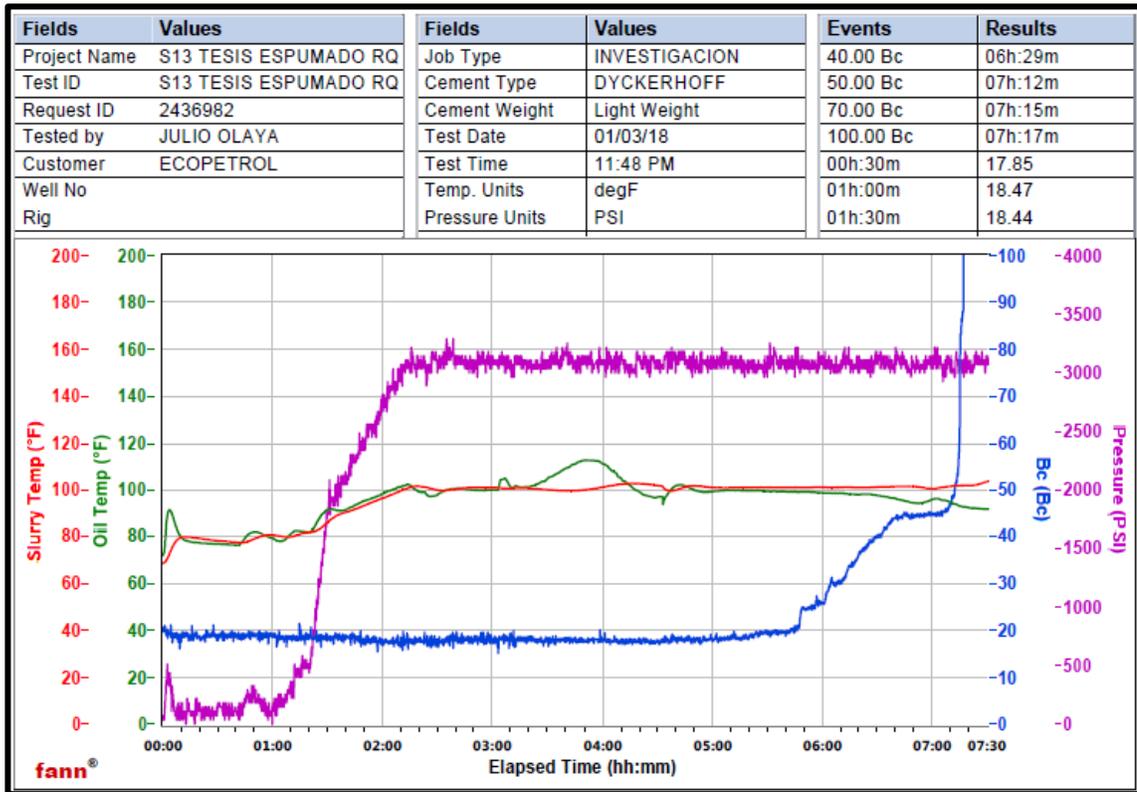
Figura 17. Equipo para la determinación del tiempo bombeable.



Como se puede observar en la **Figura 17** el equipo se programa a unas condiciones específicas y en el monitor se va observando el comportamiento del cemento a medida que va transcurriendo el tiempo de prueba. Además, el equipo en su interior cuenta con un aceite que se calienta con el fin de calentar la muestra del cemento.

La programación de la prueba fue tiempo de mezclado de 60 minutos, un tiempo dinámico (viaje a través del pozo) de 120 minutos, el tiempo estático de 60 minutos y un tiempo adicional de 60 minutos como factor de seguridad. En el **Gráfico 15** se observan los resultados de la prueba.

Gráfico 15. Tiempo bombeable del cemento espumado.



Como se puede observar en el **Gráfico 15**, la muestra de cemento espumado dejó de ser bombeable a un tiempo de 7 horas y 15 minutos, dado que, el valor de Bc predeterminado es 70 donde se considera que el cemento pierde su fluidez, adicionalmente, se observa que la temperatura y la presión del cemento espumado tienen un comportamiento acorde con las condiciones de fondo del pozo de estudio. Los cambios de la temperatura del aceite dentro del equipo se dan con el fin de mantener la temperatura de la muestra a temperatura de fondo (101°F).

La prueba de tiempo de bombeo corrobora los tiempos estimados que se requieren para que el cemento conserve su fluidez y llegue a la sección objetivo, pues un tiempo superior al estimado haría que las operaciones de cementación se retrasaran y un tiempo inferior impediría el adecuado posicionamiento de la lechada dentro del pozo.

4.2.2.4 Resistencia a la compresión. Esta prueba tiene como objetivo determinar la presión necesaria para destruir la muestra de cemento espumado. Para la realización de la prueba se construyen dos cubos de cemento de 2x2 pulgadas, los cuales se someten a un proceso de curado a 136°, uno por un periodo de 24 horas y el otro por 48 horas. Posteriormente se coloca cada cubo de cemento en una prensa hidráulica (ver **Figura 18**) hasta que este se rompa.

Figura 18. Prensa hidráulica (método destructivo).



Como se observa en la **Figura 18**, la prensa hidráulica incrementará paulatinamente la presión hasta que la muestra de cemento seco se rompa, registrando la presión a la que el cemento se fractura.

4.3 RESULTADOS

De las pruebas mencionadas anteriormente, se observa que unas se realizaron para las dos lechadas como, reología a temperatura ambiente, y resistencia a la compresión con el propósito de comparar los resultados. Sin embargo, hay pruebas que se realizan para el cemento espumado con equipos especiales, dado que con los equipos convencionales podrían tener resultados erróneos en el momento de la medición, tal es el caso de las pruebas de densidad, la reología y la resistencia a la compresión. Por consiguiente, los resultados que arrojaron cada una de las pruebas deben ser analizados para así poder caracterizar ambos fluidos y finalmente poder llegar a la conclusión de cual fluido presenta mayor viabilidad para el pozo de

estudio, en la **Tabla 16** se muestra los resultados de cada prueba realizadas a las dos muestras de cemento.

Tabla 16. Tabla de resultados de las pruebas de laboratorio.

Tabla de resultados de laboratorio			
Prueba	Cemento sin espumar		Cemento espumado
Mezclabilidad	5	5	5
Reología (RPM)	T ambiente	T: 101°F	T ambiente
3	11	16	1.5
3D	N.A	N.A	1
6	21	25	3
6D	N.A	N.A	1
100	185	202	19
200	325	335	31
300	440	444	45
Densidad (lb/gal)	14.5	14.5	12.49
Tiempo bombeable	N.A	N.A	7 horas 15 minutos
Resistencia a la compresión (psi)	48 horas:3102	24 horas: 2179	48 horas: 2831

Como se observa en la **Tabla 16**, la prueba de tiempo de bombeo no se realizó al cemento sin espumar, dado que este parámetro no es relevante al objetivo del proyecto, así mismo, en la prueba de reología los valores de 3D y 6D tampoco fueron determinados para el cemento no espumado, debido a que este no representa un parámetro a tener en cuenta.

La resistencia a la compresión para ambas muestras fue determinada por diferentes métodos, pero, de igual manera pueden ser comparados.

En la tabla anterior se puede evidenciar que las condiciones a las que se sometieron los cementos fueron las adecuadas para poder realizar adecuadamente las pruebas, adicionalmente, los parámetros de pozo como la presión y temperatura de fondo no afectaron el comportamiento de los fluidos, mostrando que a estas condiciones ambas lechadas trabajan adecuadamente.

El objetivo del proyecto se cumple, pues se disminuyó la densidad del cemento de un valor de 14.5 lb/gal a un valor de 12.49 lb/gal.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los resultados obtenidos en los laboratorios y gracias a las buenas prácticas realizadas, se pueden caracterizar ambas lechadas de cemento para posteriormente compararlas y determinar cuál es la lechada que presenta mayores ventajas.

Respecto al comportamiento de la reología del cemento no espumado a temperatura ambiente y a temperatura de fondo se puede deducir que la temperatura afecta de manera directa a este valor, pues, en la prueba que se realiza a temperatura de fondo (101°F) los valores en el reómetro aumentan a comparación de los valores a temperatura ambiente, sin embargo, cabe aclarar que ambas pruebas se realizaron a presión atmosférica, por lo tanto las propiedades de la lechada se pueden ver afectadas por las condiciones de fondo.

El cemento no espumado, muestra una resistencia a la compresión mayor que el cemento espumado, lo que indica que el cemento no espumado es más resistente, sin embargo, se debe tener en cuenta que los equipos utilizados para determinar este valor no fueron los mismos y la desviación del resultado entre lechadas no es muy alta. El equipo de resistencia a la compresión utilizado para el cemento sin espumar no rompe la muestra, por lo tanto, el resultado no es totalmente exacto. El método utilizado para el cemento espumado es el método más acertado dado que, al ser destructivo determina realmente el valor de la resistencia de la muestra.

El objetivo principal de la realización de las pruebas de laboratorio era evaluar una lechada espumada de menor densidad a la actualmente utilizada, manteniendo un buen comportamiento en el resto de las propiedades evaluadas, con el fin de disminuir la posibilidad de la formación de fracturas en el yacimiento debido a su bajo gradiente de fractura.

5. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UNA LECHADA DE CEMENTO ESPUMADO EN COMPARACIÓN DE UNA LECHADA CON MICROESFERAS

El proceso de realización de pruebas no siempre permite la comparación inmediata de dos muestras, debido a que algunas pruebas no suministran el valor directo de la propiedad a medir, este es el caso de la prueba de reología, la cual, como se menciona en el capítulo anterior, muestra valores de corte a diferentes velocidades, por esta razón el uso de ecuaciones, permiten obtener el valor de la viscosidad plástica del cemento y su punto, lo cual permite una mejor evaluación.

La evaluación del desempeño de las lechadas permitirá concluir cuál de las dos lechadas de cemento presenta mayores ventajas para yacimientos con bajos gradientes de fractura, así como determinar cuál lechada de cemento posee mejores características. En la **Tabla 17** se observa el desempeño de cada lechada de cemento durante las pruebas de laboratorio.

Tabla 17. Tabla de desempeño de ambas muestras de laboratorio.

Tabla de desempeño					
Prueba	Cemento no espumado		Cemento espumado		Comparación
Mezclabilidad	5	5	5		Igual
VP (cp)	T ambiente 677.38	T: 101°F 681.25	T ambiente 286.99		Bueno
PC (lb/100 pies ²)	T ambiente 0.01	T:101°F 7.384	T ambiente 0.742		Bueno
Densidad (lb/gal)	14.5	14.5	12.49		Bueno
Calidad (%)	0	0	13.3		-
Tiempo bombeable	N.A	N.A	7 horas15 minutos		Aceptable
Resistencia a la compresión (psi)	24 horas 2500	48 horas 3000	24 horas 2179	48 horas 2831	Aceptable

A partir de la **Tabla 17**, se pueden comparar las dos lechadas planteadas, y así determinar, las propiedades más favorables para cementar las unidades K1, K2 y T2 en el pozo de estudio, dado que estas presentan bajo gradiente de fractura.

5.1 ANÁLISIS DE LA MEZCLABILIDAD DE LAS LECHADAS

La prueba de mezclabilidad se realizó solo para la lechada sin espumar, ya que esta es la misma lechada base para el cemento espumado, por lo tanto, su valor es igual. En la **Figura 19** se puede observar el vórtice generado en la lechada.

Figura 19. Vórtice generado en la lechada sin espumar.



En la **Figura 19** se observa que el vórtice generado es de 5, según la escala mencionada en el capítulo anterior, este valor indica que la lechada de cemento a evaluar tiene la fluidez correcta y sus aditivos se diluyeron de forma correcta, dando como resultado una lechada homogénea.

5.2 ANÁLISIS DE LA REOLOGÍA DE LAS LECHADAS

Mediante la prueba de reología, se pueden determinar algunas propiedades del cemento como lo es la viscosidad plástica (VP) y el punto cedente (PC), estas características se determinaron a partir de los valores observados a las diferentes velocidades establecidas.

La viscosidad plástica (VP) se define como la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica a la que el fluido es sometido y el punto cedente (PC) corresponde a la capacidad que tiene el cemento para mantener partículas en suspensión.

Para establecer las propiedades nombradas, se utiliza el software iCem Service, el cual permite, mediante el ingreso de los valores obtenidos de la prueba de reología determinar la viscosidad plástica y el punto cedente de las lechadas de cemento, utilizando el modelo de reología generalizado de Herschel-Bulkley, considerando el mejor modelo reológico para este caso de estudio. En la **Tabla 18** se muestra los resultados de viscosidad plástica y punto cedente para cada lechada de cemento.

Tabla 18. VP y PC de los cementos evaluados.

VP y PC de los cementos		
Cemento	VP (cp)	PC (lb/100 ft² seg-1)
No espumado a temperatura ambiente	677.38	0.01
No espumado a temperatura de fondo (101°F)	681.25	7.384
Espumado a temperatura ambiente	286.99	0.742

De la **Tabla 18** se puede inferir que la reología del cemento no espumado aumenta a medida que aumenta la temperatura, pues, a una temperatura ambiente los valores de viscosidad plástica y punto cedente son 677.38 y 0.01 respectivamente, en cambio, para una temperatura de fondo (101°F) los valores de VP y PC son 681.25 y 7.384 respectivamente.

En la tabla anterior se puede observar que el cemento espumado cumple con las características esperadas, pues a temperatura ambiente muestra valores más bajos de viscosidad plástica (VP), esto quiere decir que el cemento posee menor resistencia al flujo, además, el valor del punto cedente (PC) de la lechada espumada tiene mayor valor que el cemento no espumado, asegurando que el cemento espumado es capaz de mantener partículas en suspensión de una manera más eficiente. Los valores correspondientes a la viscosidad plástica y punto cedente del cemento espumado son 286.99 y 0.742 respectivamente, por otro lado, los valores de VP y PC del cemento no espumado son 677.38 y 0.01 respectivamente.

5.3 ANÁLISIS DENSIDAD Y CALIDAD

Como se observa en la tabla de desempeño, la densidad del cemento espumado es menor en 2 lb/gal que la del cemento sin espumar, además su calidad es del 13.3% lo que quiere decir que tiene un volumen de gas específico en su matriz, con esto se corrobora que la inyección de gas a una lechada de cemento disminuye su densidad, además entre más alto sea el valor de la calidad de la espuma la densidad va a ser menor.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede deducir que los cementos espumados son de gran utilidad para yacimientos con bajos gradientes de fractura, ya que las lechadas convencionales debido a su densidad sobrepasarían este límite.

En las formaciones de estudio del pozo a cementar se puede alcanzar el punto de fractura si la densidad del fluido supera las 12.5 lb/gal, por lo tanto el cemento espumado diseñado sería un buen candidato para implementar, dado que su densidad es menor que la del cemento actualmente utilizado, disminuyendo así el riesgo de problemas operativos por la generación de fracturas y la pérdida de fluido en la sección de estudio.

5.4 ANÁLISIS DE TIEMPO BOMBEABLE

Con respecto a la prueba de tiempo bombeable, esta solo se le realizó al cemento espumado, pues el objetivo consistía en comprobar que la lechada se iba mantener con fluidez y bombeable hasta que el cemento llegue a la sección deseada, el tiempo estimado para la prueba era de 6 horas, pero con el diseño establecido del cemento espumado se alcanzó un tiempo de 7 horas y 15 minutos. La diferencia de tiempo entre lo esperado a lo real no es tan grande por lo que se puede concluir que el cemento espumado tiene un tiempo bombeable adecuado.

5.5 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Comparando los resultados en las pruebas de resistencia a la compresión realizadas a las dos lechadas de cemento, se puede evidenciar que los valores a 24 y 48 horas de los dos cementos son similares, los valores varían en 400 y 200 psi respectivamente, lo que sugiere que, a pesar de las diferencias en la composición y en la densidad de las lechadas, ambas ofrecen una alta resistencia a la compresión, con esto se comprueba que al espumar una lechada de cemento con el objetivo de disminuir la densidad de la misma, se mantienen las propiedades de resistencia del cemento, lo cual hace al cemento espumado un buen candidato para formaciones con bajo gradiente de fractura.

6. CONCLUSIONES

- Las formaciones Une (unidad K2), Gachetá (unidad K1) y Mirador (unidad T2) que están en contacto con el pozo de estudio, poseen bajos gradientes de fractura (debido al depletamiento generado por la producción de yacimientos en la zona) y secciones fracturadas, generando nuevos retos en los trabajos de cementación.
- La implementación de aditivos especiales en el diseño de las lechadas se hace crucial para poder satisfacer las necesidades del pozo.
- La calidad y la densidad son parámetros inversamente proporcionales, es decir a medida que disminuye la calidad, la densidad aumenta.
- El cemento espumado, a comparación de un cemento ultraligero con microesferas presenta ventajas como la posibilidad de disminuir su densidad, mediante el aumento del volumen de la lechada, lo cual reduce costos en uso de aditivos y una mejor reología, ofreciendo una mayor confiabilidad a la hora de implementarlo en campo.
- La densidad de la lechada de cemento se pudo disminuir al valor determinado de 12.5 Lb/gal con respecto a una lechada de cemento de 14.5 Lb/gal, por medio de la inyección de un gas en su matriz, esto con el fin de evitar la generación de nuevas fracturas en el yacimiento.
- Con la simulación se comprobó que el uso de cementos espumados disminuye el valor del ECD final y la densidad, mostrando así que el cemento espumado es adecuado para ser implementado en yacimientos con bajos gradientes de fractura.
- La realización de una simulación previa a las pruebas de laboratorio permite realizar un diseño más acertado, evaluando distintos escenarios en las propiedades de la lechada a las condiciones de presión y temperatura del pozo.
- La presencia del surfactante en el cemento espumado no muestra ningún cambio en su comportamiento en comparación con el cemento actualmente utilizado, lo cual se evidenció en las pruebas de laboratorio
- El cemento espumado muestra ser la mejor solución cuando se requiere una lechada con baja densidad (12.49 lb/gal), que tenga buena resistencia a la compresión, un aceptable tiempo de bombeo,
- Los valores de resistencia a la compresión muestran que el cemento no espumado resiste más que el cemento espumado, pero el cemento espumado, a pesar de tener un gas en su matriz alcanza una resistencia menor solo 400 psi.

7. RECOMENDACIONES

- Se propone evaluar la interacción Roca-Fluido que tiene el cemento espumado considerando diferentes variables de estudio como la elasticidad.
- Se recomienda evaluar el comportamiento volumétrico que tiene el cemento espumado en diferentes escenarios, considerando la tortuosidad del hueco.
- Se sugiere analizar el nivel de interacción que poseen las propiedades del cemento espumado con respecto a la cantidad de nitrógeno inyectado a la lechada.
- Se propone cambiar el aditivo espumante para así evaluar la compatibilidad con la lechada y así ajustar el tiempo de bombeo a los parámetros planeados.
- Se aconseja realizar un diseño diferente de cemento espumado con el fin de aumentar la resistencia a la compresión durante las primeras 24 horas de tiempo de fraguado.
- Se recomienda realizar distintas formulaciones híbridas de cemento, modificando la concentración de microesferas y espuma.
- Se recomienda realizar las pruebas de laboratorio con agua del campo a evaluar, para así poder confirmar la compatibilidad y realizar las pruebas de manera real.
- Se sugiere determinar factores de riesgo durante las operaciones de cementación, en donde se utilice un gas inerte como aditivo, con el fin de plantear y evaluar posibles planes de contingencia del gas en los trabajos de campo.
- Se recomienda evaluar las propiedades del cemento espumado a través de pruebas de laboratorio utilizando el nitrógeno como aditivo y no un surfactante o espumante que simule las propiedades del gas.
- Se propone evaluar el comportamiento del cemento espumado en el caso de una contaminación con el fluido de perforación.

BIBLIOGRAFÍA

3M. Cementación de baja densidad con esferas de vidrio de serie HGS de 3M™. [0]. [Consultado el 12 - Julio -2017]. Disponible en: http://solutions.3m.com.mx/wps/portal/3M/es_MX/Oil-Gas_LA/3M-Oil-and-Gas/oil-and-gas-Solutions/upstream-oil-and-gas-exploration/upstream-oil-and-gas-drilling/upstream-lightweight-cementing/

3M. Glass Bubbles HGS18000 For low density drilling fluids and drilling cements. [0]:2012.

3M. Materiales Avanzados: Microesferas De Vidrio. [0]. [Consultado el 12 - Julio - 2017]. Disponible en: http://solutions.3m.com.co/wps/portal/3M/es_CO/Mining_Industry_LA/Home/Products/AdvancedMaterials/?PC_Z7_RJH9U5230GG880IHA65CELMMB0000000_nid=TPSM658GR0beCKTQZTV052gl

A. RUCH. New Generation Foam Cement – A Universal System for Cementing. [0]: OIL GAS European Magazine, 2000. ISBN 0179-3187.

Agencia Nacional de Hidrocarburos. Integración Geológica de la Digitalización y Análisis de Núcleos. [0]: La Paz: Global Network Content Services LLC, DBA Noticias Financieras LLC, 2012.

AL-YAMI, Abdullah, et al. Evaluation and Optimization of Low-Density Cement: Laboratory Studies and Field Application. En: SPE DRILLING & COMPLETION. Mar.vol. 25, no. 1, p. 70-89

API. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. En: Anonymous API Recommended Practices. First ed. 2004.

AZWAR, C., *et al.* Wellbore Cementing: An Integral Part of Well Integrity. [0]: SPE, 2015.

BENGE, Glen. Cement Evaluation—A Risky Business. [0]: SPE, 2015.

BIKMUKHAMETOV, A., *et al.* Experience of Using the Foamed Cement Technology for Difficult Lost Circulation Control. [0]: Elsevier Science & Technology, 2014. 19 ISBN 0376-7361.

CASTAÑEDA, Carlos and DIAZ, Javier. EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE CEMENTOS ESPUMADOS EN LOS CAMPOS NUTRIA Y SARDINATA. Fundación Universidad de América.: Fundación Universidad de América., 2011.

Catalin Teodoriu, *et al.* Well Integrity Estimation of Salt Cements with Application to Long Term Underground Storage Systems. [0]: SPE, 2016.

COCKRAM, Mark. Foam Cementing Controls Deepwater Shallow Flow in the East Mediterranean. [0]: SPE, 2002.

CRANDALL, Dustin, *et al.* A Look at Processes Impacting Foamed Cements. [0]: SPE, 2016.

DOAN, Angela; OMUWUNMI, Mosunmola and LI, Li. Better Foam Cement with a Liquid Stabilizer: Offshore Case Histories. [0]: SPE, 2016.

EL-SEGINY, Ahmed, *et al.* Improving Deep-Well Economics with Foamed-Cementing Solutions. [0]: SPE, 2010.

ESPINOSA, Camilo and GAVIRIA, Gustavo. Diseño de una lechada alivianada para una cementación de liner de 7" en el campo Castilla. Bogotá.: Fundación Universidad de América., 2014.

FAZIO, James, *et al.* Physical and Mechanical Properties of Field-Generated Foam Cements: Implications for Cement Property Prediction and Modeling. [0]: SPE, 2016.

Fred Sabins. Ultra Light-Weight Cement Slurries Improve Cement Performance. [0]: United States: US, 2002.

GARNIER, Andre, *et al.* An Innovative Methodology for Designing Cement-Sheath Integrity Exposed to Steam Stimulation. En: SPE DRILLING & COMPLETION. Mar.vol. 25, no. 1, p. 58-69

Halliburton. Foam Cementing Operations Manual. 1998.

Halliburton. Halliburton Cementing Tables. 1981.

Halliburton. WellPlan Software Release 5000.1. Estados Unidos: Halliburton, 2012. 293-350 p

HARLAN, Tony, *et al.* Foamed Cement Selection for Horizontal Liners Proves Effective for Zonal Isolation? Case History. Keystone, Colorado.: SPE, May 21, 2001.

HARMS, W. M. and FEBUS, J. S. Cementing of fragile-formation wells with foamed cement slurries. [0]: United States: SPE, 1985. 1049-1057

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: El instituto, 1998, 23p.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 36p. 2008.

JACOBS, Trent. Offshore Industry Gets a Fresh Look at Foamed Cement. En: JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY. Jan 1, .vol. 67, no. 1, p. 58-63

JOHNSON, P.; HOBBERSTAD, Rune and GREEN, K. Foam Cementing on the Eldfisk Field: A Case Study. [0]: SPE, 2003.

KOOP, Kevin, *et al.* Foamed Cement vs. Conventional Cement for Zonal Isolation—Case Histories. [0]: SPE, 2000.

KULAKOFSKY, David, *et al.* New Ultra-lightweight Cementing Technology Proven with Case Studies, Combines Benefits of Current Leading Methodologies. [0]: SPE, 2005.

MALAGON, Jonathan. La competitividad del sector de hidrocarburos en las diferentes regiones de Colombia. [0]: Göteborg: Litterär Gestaltning, 2016.

MEDINA, Jorge. EVALUACION Y ANALISIS TECNICO OPERATIVO PARA LA IMPLEMENTACION DE CEMENTOS ESPUMADOS EN OPERACIONES DE PERFORACION Y REACONDICIONAMIENTO DE POZO. Universidad de America, 2015.

MILLER, Larry and FRANK, William. Foam Cementing Cyclic-Steam, Producing Wells: Cymric Field Case Study. [0]: SPE, 1998.

MONTIEL, Armando and MONTIEL, Gil. ABC cementacion. 2002.

MOORE, S., *et al.* Foam Cementing Applications on a Deepwater Subsalt Well—Case History. [0]: SPE, 2000.

NABI, A.; QURESHI, S. and ARIF, M. Designing of Ultralight Slurry for Liner Cementation: Case Study. [0]: SPE, 2010.

NELSON, E. B. Well Cementing. [0]: Developments in Petroleum Science. NL: Elsevier Science, 1999.

NORMA API 10B-4. Recommended Practice on Preparation and Testing of Foamed Cement Slurries at Atmospheric Pressure. 2004.

PARDO, Andres; VARGAS, Carlos and MARTINEZ, Juan. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. [0]: ANH and B&M Exploration Ltda, 2007.

PIRSON, Sylvain Joseph. Oil reservoir engineering. 2. ed. ed. New York [u.a.]: McGraw-Hill, 1958.

ROZIÈRES, Jeande and GRIFFIN, Tom J. Experience if Using the Foamed Cement Technology for Difficult Lost Circulation Control. [0]: Elsevier Science & Technology, 1990. 19 ISBN 0376-7361.

SANCHEZ,N., *et al.* Petroleum system modeling in the Eastern Cordillera of Colombia using geochemistry and timing of thrusting and deformation. En: AAPG BULLETING. Agosto 15.vol. 99, no. 8, p. 1537-1556

SARMAH, Pranjali; YADAW, Prahlad and AGRAWAL, Gaurav. High-Strength Lightweight Cement Optimized for Weak Formations - Use of Local Raw Material Improves Performance and Operational Latitude. [0]: SPE, 2015.

SAUER, C. W. Mud Displacement During Cementing State of the Art. En: JOURNAL OF PETROLEUM TECHNOLOGY. Sep.vol. 39, no. 9, p. 1091-1101

SCHLUMBERGER, Dowell. Cementing Technology. 1984.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. Banco de información petrolera. [0]. [Consultado el Nov 1,2017]. Disponible en: http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Geovisor_BIP/.

SMITH, Charles; WILLIAMS, Brett and HAMILTON, Layne. Ultrasonic Log Response in Lightweight Cement Conditions. [0]: SPE/CSUR Unconventional Resources Conference: SPE, 2014.

SMITH, Dwight K. Cementing. 1987.

SONES, E. and EULBERG, J. Minimizing NPT: The Elimination of Cement Plug Failures in the Western. [0]: SPE, 2015.

SUMMAN, George. Cementing Handbook & nbsp; Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 1997. 22-31 p.

SUTTON, Ian. Summarizing the Deepwater Horizon / Macondo Reports. [0]: SPE, 2013.

TAIWO, Oyetade and OGBONNA, Joel. Foam Cementing Design and & nbsp; Application: A Cure for Low Gradient- Associated Problems in Deepwater Operations in the Gulf of Guinea. [0]: SPE, 2011.

VELEZ, Johana. Programa de Perforación Pozo Castilla Norte & nbsp; [0]: Bogotá: Ecopetrol, 2016. 10-11

ANEXOS

**ANEXO A
WELLCAT**

Ver carpeta de anexos.

 Fundación Universidad de América	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL LUMIERES

Nosotros Larry Andrés Gómez Flórez y Karent Daniela Tarquino Nieto en calidad de titulares de la obra Diseño de una lechada de cemento espumado como base para una cementación primaria para yacimientos con bajos gradientes de fractura, elaborada en el año 2017 , autorizamos al **Sistema de Bibliotecas de la Fundación Universidad América** para que incluya una copia, indexe y divulgue en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres, la obra mencionada con el fin de facilitar los procesos de visibilidad e impacto de la misma, conforme a los derechos patrimoniales que nos corresponden y que incluyen: la reproducción, comunicación pública, distribución al público, transformación, en conformidad con la normatividad vigente sobre derechos de autor y derechos conexos (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, entre otras).

Al respecto como Autores manifestamos conocer que:

- La autorización es de carácter no exclusiva y limitada, esto implica que la licencia tiene una vigencia, que no es perpetua y que el autor puede publicar o difundir su obra en cualquier otro medio, así como llevar a cabo cualquier tipo de acción sobre el documento.
- La autorización tendrá una vigencia de cinco años a partir del momento de la inclusión de la obra en el repositorio, prorrogable indefinidamente por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales del autor y podrá darse por terminada una vez el autor lo manifieste por escrito a la institución, con la salvedad de que la obra es difundida globalmente y cosechada por diferentes buscadores y/o repositorios en Internet, lo que no garantiza que la obra pueda ser retirada de manera inmediata de otros sistemas de información en los que se haya indexado, diferentes al Repositorio Digital Institucional – Lumieres de la Fundación Universidad América.
- La autorización de publicación comprende el formato original de la obra y todos los demás que se requiera, para su publicación en el repositorio. Igualmente, la autorización permite a la institución el cambio de soporte de la obra con fines de preservación (impreso, electrónico, digital, Internet, intranet, o cualquier otro formato conocido o por conocer).
- La autorización es gratuita y se renuncia a recibir cualquier remuneración por los usos de la obra, de acuerdo con la licencia establecida en esta autorización.
- Al firmar esta autorización, se manifiesta que la obra es original y no existe en ella ninguna violación a los derechos de autor de terceros. En caso de que el trabajo haya sido financiado por terceros, el o los autores asumen la responsabilidad del cumplimiento de los acuerdos establecidos sobre los derechos patrimoniales de la obra.
- Frente a cualquier reclamación por terceros, el o los autores serán los responsables. En ningún caso la responsabilidad será asumida por la Fundación Universidad de América.
- Con la autorización, la Universidad puede difundir la obra en índices, buscadores y otros sistemas de información que favorezcan su visibilidad.

	FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA	Código:
	PROCESO: GESTIÓN DE BIBLIOTECA	Versión 0
	Autorización para Publicación en el Repositorio Digital Institucional – Lumieres	Julio - 2016

	Atribución- no comercial- sin derivar: permite distribuir, sin fines comerciales, sin obras derivadas, con reconocimiento del autor.	<input type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial: permite distribuir, crear obras derivadas, sin fines comerciales con reconocimiento del autor.	<input checked="" type="checkbox"/>
	Atribución – no comercial – compartir igual: permite distribuir, modificar, crear obras derivadas, sin fines económicos, siempre y cuando las obras derivadas estén licenciadas de la misma forma.	<input type="checkbox"/>

Licencias completas: http://co.creativecommons.org/?page_id=13

Siempre y cuando se haga alusión de alguna parte o nota del trabajo, se debe tener en cuenta la correspondiente citación bibliográfica para darle crédito al trabajo y a sus autores.

De igual forma como autores autorizamos la consulta de los medios físicos del presente trabajo de grado así:

AUTORIZAMOS	SI	NO
La consulta física (sólo en las instalaciones de la Biblioteca) del CD-ROM y/o Impreso	X	
La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer para efectos de preservación	X	

Información Confidencial: este Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica o secreta o se ha pedido su confidencialidad por parte del tercero, sobre quien se desarrolló la investigación. En caso afirmativo expresamente indicaremos, en carta adjunta, tal situación con el fin de que se respete la restricción de acceso.	SI	NO
		X

Para constancia se firma el presente documento en Bogotá, a los 13 días del mes de febrero del año 2018.

LOS AUTORES:

Autor 1

Nombres	Apellidos
Larry Andrés	Gómez Flórez
Documento de identificación No	Firma
1020799801	

Autor 2

Nombres	Apellidos
Karent Daniela	Tarquino Nieto
Documento de identificación No	Firma
1016078207	