

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE SURFACTANTES COMO AGENTE
DISPERSANTE DEL LITECEM[®] EN LECHADAS DE
CEMENTO DE BAJA DENSIDAD BAJO LAS CONDICIONES
OPERACIONALES DEL CAMPO TÍA JUANA.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Hernández M, Robersy C.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2012

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE SURFACTANTES COMO AGENTE DISPERSANTE DEL LITECEM® EN LECHADAS DE CEMENTO DE BAJA DENSIDAD BAJO LAS CONDICIONES OPERACIONALES DEL CAMPO TÍA JUANA.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Violeta Wills.

TUTORES INDUSTRIALES: MSc. Geralf Pineda.

MSc. Jean Carruyo.

Ing. José González.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Br. Hernández M., Robersy C.
Para optar al Título de
Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2012

Caracas, 9 de noviembre de 2012

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Robersy C. Hernández M., titulado:

“EVALUACIÓN DE SURFACTANTES COMO AGENTE DISPERSANTE DEL LITECEM® EN LECHADAS DE CEMENTO DE BAJA DENSIDAD BAJO LAS CONDICIONES OPERACIONALES DEL CAMPO TÍA JUANA”

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

Prof. Carlos Gil
Jurado

Prof. René Rojas
Jurado

Prof. Violeta Wills
Tutora Académica



DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico en especial a mis padres Roberto y Alicia por ser los pilares principales de mi vida, a mis hermanos de sangre Rosbert y Rosbeidy, a mis tías, Romelia, Cira y Visneida que han sido para mí muy especiales, mis primos Liliana, Añita y César, Gracias por estar allí.

¡LOS AMO!

AGRADECIMIENTOS

Primero le doy la Gracias a Dios, por permitirme llegar hasta aquí, a mis padres por darme la vida y la familia que tengo, a mis hermanos por creer en mí, mis tías *Visneida* (tía Gloria por cariño) por apoyarme con sus consejos de igual manera a mi tía *Cira* y mi tía *Romelia* a mis abuelos *José y María* por estar allí desde que nací para cuidarme y verme crecer, *mis tíos José, Manuel, César, Alberto ¡Los Quiero!*

A mis Padrinos, *Carlos González, Mercedes de Medina, Antonio Díaz y Mirian de Díaz*, por ser unos segundos padres para mí, y estar allí con esos sabios consejos que me dan, gracias por ser mis segundos padres.

A mis primos, hermanos de crianza a toda mi familia por parte de mamá y papá, mis tías y tíos de Caracas, de Barquisimeto, de Maracay, a mis vecinos y amigos de la infancia, *Jonathan Salazar, César Lobo, Celenia Lobo, Luis Delgado, Manuel Colmenares y Orianita*, gracias familia!

En especial al Núcleo Armando Mendoza (núcleo Cagua) y a la Escuela de Petróleo por permitir que creciera tanto en conocimientos como personal, a los mejores profesores que he tenido *Nelson Milano y Rafael Amaro*, al *Sr Manuel* por ser como un padre para mí, a la *Sra. Lieba*, a todos mis amigos y compañeros *Alejandro Burgos, Ivan Bolívar, Carlos Luna, Juan, Patricia Muñoz, Abrhan, Greimilys, Danilo Bastidas, Emilys Pacheco, Andrés Ortega, Naylet Aguirre, Cinthia Hernández, Carlos Contreras, Airam Flores, Carlos González, Ingemar Quintero, César Yopez, Cesar Briceño, Diasis Yopez, Raúl Rodríguez, Jacqueline Rondón, Niria Rodríguez, Betty, Martin Blanco, Rafael Farfan, José Blanco, Andrea Hernández, Ivana, Jorge Serrao, Keith Contreras, Maria Isabel, Pedrimar Díaz*, y los que faltan gracias por hacer de mi estadía en el núcleo la mejor.

Mis amigos de la Escuela de Petróleo, sin ellos el paso en la escuela no hubiera sido el mismo, **Keith Contreras, Alejandra Moreno, Johanna Barreiro, Reina Pérez, María Hernández, María Vargas, Lennies Guevara, Gloriana Castillo, Edinth Herrera, Yolanda Rodríguez, Efraín Aristimuño, Cesar Briceño, Raúl Rodríguez, Robert Romero, Andrés Ortega, Daniel Sosa, Yino Useche, Yorangel Tineo, Neifrank Ortuño.**

Aracelis Vicuña, Frank Contreras, Ana Hernández, Mirian Ramírez, Joely Colina por ser una familia más para mí, gracias por recibirme en sus casas.

Los profesores de la escuela por apoyarme en cada semestre, y hacer de cada uno de los estudiantes profesionales de la rama del petróleo, **Lisbeth Miranda, Evelyn Azuaje, Violeta Wills, Pedro Díaz, Sandro Gasbarri, Pedro Martorano, Alexis Gamiero, Angel Da Silva, Rene Rojas, Carlos Gil, Ovidio Suárez, Gracias!**

En especial **Violeta Wills**, mi tutora académica, por permitirme que desarrollara el Trabajo Especial de Grado junta a ella, a mis tutores industriales **GeraIf Pineda, Jean Carruyo y José González** con su sabiduría y experiencia esenciales para el desarrollo del tema, gracias por la paciencia que me tuvieron.

A mis compañeros y amigos de INTEVEP, **Doris, Eleazar, Neidy, German, Johanna, a los colaboradores de cariño Abrahan Salazar, Carolina Zambrano, Franklin Quintero, Fedymar Pereira, Alejandro Gonzales, Leonardo Graterol** y todas aquellas personas que me ayudaron en el desarrollo de la tesis gracias nuevamente. A los compañeros de ruta **Viviana, Arlis, Gonzalo, Sergio, Tony, César, Sr. Carlos, César (¡veneno!), Sr. Eduardo**, gracias por hacerme reír cada mañana, y de una u otra forma ayudaron al desarrollo de mi trabajo.

Quiero darle un reconocimiento especial a **Doris Virginia Vasconcelos** y a **Keith Contreras** quienes sin esperar algo a cambio me prestaron su ayuda y apoyo en los momentos más fuertes de mi Tesis, Gracias son las mejores!

A **Jorge Álvarez**, por ser mi apoyo en estos momentos culminantes para un ciclo de mi vida, gracias por estar junto a mí y compartir estos detalles de la vida, simplemente Gracias.

HERNÁNDEZ M., ROBERSY C.

**EVALUACIÓN DE SURFACTANTES COMO AGENTE DISPERSANTE
DEL LITECEM[®] EN LECHADAS DE CEMENTO DE BAJA DENSIDAD
BAJO LAS CONDICIONES OPERACIONALES DEL CAMPO TÍA
JUANA**

**Tutor Académico: Prof. Violeta Wills. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2012. 212p.**

Palabras clave: sistemas cementantes, lechadas, surfactantes, lechadas de baja densidad, propiedades físicas, resistencia a la compresión, Campo Tía Juana (Edo. Zulia).

Resumen. La cementación es una etapa crucial para la construcción de pozos, en yacimientos con bajas presiones y con bajos gradiente de presión, ésta operación requiere de lechadas con densidades por debajo a las convencionales, que proporcionen además de la disminución de la presión hidrostática mediante reducciones de la densidad también proporcionen un sello de cemento con propiedades mecánicas que sean capaces de soportar esfuerzos in situ y los asociados a presión y temperatura que puedan ser originados por las operaciones de completación, estimulación y producción durante la vida del pozo. El sistema cementante LITECEM[®], es una lechada no convencional donde la misma puede variar el rango de aplicabilidad de 11,5 a 13 lb/gal, la propuesta es de mejorar la dispersión de las partículas poliméricas (LITECEM[®]) y ampliar la ventana operacional de este sistema hasta una densidad de 11 lb/gal, para esto se plantea como objetivo evaluar surfactantes como agente dispersante del LITECEM[®] en lechadas de cemento de baja densidad, con el fin de estudiar los fenómenos interfaciales en la interacción de cemento-surfactante, mojabilidad de las esferas poliméricas y las propiedades físicas y de resistencia a la compresión de los sistemas cementantes con surfactante; siendo este trabajo de tipo experimental por la manipulación de las concentraciones de los surfactantes. En consecuencia de la evaluación de los fenómenos interfaciales, se procede al estudio de las propiedades físicas y de resistencia a la compresión del sistema con los surfactantes A y C, teniendo como conclusión que el surfactante C a una concentración de 0,8 gal/sx es el que mejor dispersa las partículas poliméricas y mejora las propiedades de resistencia a la compresión y volumen de filtrado.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS	xvii
LISTA DE ECUACIONES	xxii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Alcance de la investigación.....	5
1.4 Justificación.....	5
CAPÍTULO II	7
MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Antecedentes de la investigación	7
2.2 Cementación.....	12
2.2.1 Tipos de cementación.....	13
2.2.2 Tipos de Revestidores	14
2.2.3 Parámetros para el Diseño de Cementación.....	15
2.3 Lechadas de cemento	20
2.3.1 Cemento Portland.....	20
2.3.2 Puzolanas	24
2.3.3 Aditivos utilizados en la preparación de lechadas de cemento	24
2.3.4 Propiedades Físicas de la Lechada.....	25
2.4 LITECEM®	30
2.5 Surfactantes	31
2.5.1 Clasificación de los Surfactantes	32
2.5.2 Aplicaciones de los Surfactantes en los Procesos Industriales	33
2.5.3 Propiedades de las Soluciones Acuosas de Surfactantes	34
2.5.4 Adsorción de surfactantes sobre superficies sólidas	36
2.5.5 Adsorción y mojabilidad en superficies sólidas.....	38
CAPÍTULO III.....	39
MARCO METODOLÓGICO	39

3.1 Tipo de investigación	39
3.2 Diseño de la investigación	39
3.3 Población y muestra	40
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	40
3.4.1 Revisión Bibliográfica	40
3.4.2 Observación.....	41
3.4.3 Gráficas	41
3.4.4 Ensayos de Laboratorio.....	41
3.4.5 Instrumentos recolección de información	42
3.5 Metodología de la investigación	56
3.6 Operacionalización de objetivos	79
CAPÍTULO IV	84
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	84
4.1 Ubicación de la Cuenca del lago de Maracaibo	84
4.1.1 Descripción del Campo Tía Juana.....	85
4.2 Área de estudio, formaciones geológicas.....	87
CAPÍTULO V	90
ANÁLISIS DE RESULTADOS	90
5.1 Efecto del surfactante sobre la tensión superficial de las soluciones.....	90
5.2 Efecto del surfactante sobre la mojabilidad de las esferas poliméricas	92
5.3 Efecto del surfactante sobre la mojabilidad de partículas de cemento.....	97
5.4 Evaluar las propiedades de control de calidad del cemento petrolero	103
5.5 Evaluar las propiedades físicas y de resistencia a la compresión del sistema cementante con surfactante y sistema comercial	105
5.5.1 Sistema Blanco.....	107
5.5.2 Sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx.....	113
5.5.3 Sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx.....	119
5.5.4 Sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx.....	124
5.5.5 Sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	130
5.5.6 Sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx	135
5.5.7 Sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx	141
5.5.8 Sistema Blanco sin A/A	147
5.5.9 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	153
5.5.10 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	159
5.5.11 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	164
5.5.12 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	171
5.5.13 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	176
5.5.14 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	182

5.6 Propiedades críticas de los sistemas evaluados.....	189
CONCLUSIONES	201
RECOMENDACIONES	203
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	204
BIBLIOGRAFÍA	208

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Condiciones ideales para cementar un hoyo perforado. [Carruyo, 2005]	17
Figura 2.2: Proceso de fabricación del cemento Portland [Caillon, 2011]	23
Figura 2.3: Fotomicrografía del poliestireno expandido. [Medina, 1997].....	31
Figura 2.4: Estructura química de algunos surfactantes comunes	32
Figura 3.1: Equipo para el mezclado de los sistemas cementantes, [Hernández, 2012]	43
Figura 3.2: Equipo para medir la densidad, balanza presurizada, [Hernández, 2012]	43
Figura 3.3: Equipo Consistómetro presurizado, [Hernández, 2012].....	44
Figura 3.4: Equipo cámara de curado, [Hernández, 2012]	45
Figura 3.5: Equipo prensa mecánica, [Hernández, 2012]	46
Figura 3.6: Equipo para acondicionar los sistemas cementante, [Hernández, 2012]	47
Figura 3.7: Equipo para medir la reología, Viscosímetro, [Hernández, 2012]	48
Figura 3.8: Equipo para la medición de la pérdida de filtrado [Hernández, 2012]	51
Figura 3.9: Equipo para el montaje del ensayo de fluido libre [Hernández, 2012]	52
Figura 3.10: Equipo permeámetro al agua, [Hernández, 2012]	53
Figura 3.11: DCAT11 de DataPhysics, método de la Placa de Wilhelmy para la determinación de tensiones superficiales en medio acuoso.	54
Figura 3.12: Proceso metodológico de la investigación [Hernández, 2012].....	56
Figura 3.13: Pasos a seguir para la preparación de soluciones, [Hernández, 2012]	62
Figura 3.14: Montaje del ensayo de de tensión superficial por el método de la placa de Wihelmy, [Hernández, 2012].....	64
Figura 3.15: Montaje del ensayo para medir la tensión interfacial sólido-líquido, [Hernández, 2012].....	65
Figura 3.16: Montaje del ensayo para calcular el ángulo de contacto sobre las partículas de LITECEM®, [Hernández, 2012]	66
Figura 3.17: Montaje del ensayo para calcular el ángulo de contacto sobre as partículas de cemento, [Hernández, 2012].....	67

Figura 4.1: Ubicación Geográfica de la Costa Oriental del Lago, [Henández, 2012]	85
Figura 4.2: Ubicación del Campo Tía Juana, [WEC, 1997]	86
Figura 4.3: Prognosis geológica de la localización del área de estudio, [Programa de Ingeniería de Perforación, 2010]	88
Figura 4.4: Diagrama Mecánico tipo para pozos del área en estudio, [Programa de Ingeniería de Perforación, 2010].....	89
Figura 5.1. Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de esferas de poliestireno. Vimb en función del tiempo.....	93
Figura 5.2: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de esferas de poliestireno. Vimb2 en función del tiempo.....	94
Figura 5.3: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante B en un empaque de esferas poliméricas. Vimb en función del tiempo.....	95
Figura 5.4: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante C en un empaque de esferas poliméricas. Vimb en función del tiempo.....	95
Figura 5.5: Máximo ascenso capilar para un tiempo de 300 s de las soluciones acuosas de surfactantes estudiadas junto al efecto porcentual sobre la mojabilidad al agua	97
Figura 5.6: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de partículas de cemento. Vimb en función del tiempo.....	98
Figura 5.7: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de partículas de cemento. Vimb en función del tiempo.....	99
Figura 5.8: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de partículas de cemento. Vimb2 en función del tiempo.....	100
Figura 5.9. Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante B en un empaque de partículas de cemento. Vimb en función del tiempo.....	102
Figura 5.10: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante C en un empaque de partículas de cemento. Vimb en función del tiempo	102
Figura 5.11: Tiempo de Bombeabilidad de la lechada agua/ cemento.	104
Figura 5.12: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco.	110
Figura 5.13: Grafica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco	110
Figura 5.14: Grafica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco.....	112
Figura 5.15: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	116
Figura 5.16: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	116

Figura 5.17: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	118
Figura 5.18: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	122
Figura 5.19: Grafica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	122
Figura 5.20: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	123
Figura 5.21: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	127
Figura 5.22: Grafica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	128
Figura 5.23: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	129
Figura 5.24: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	133
Figura 5.25: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx.....	133
Figura 5.26: Grafica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	135
Figura 5.27: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx	139
Figura 5.28: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx.....	139
Figura 5.29: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx	141
Figura 5.30: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx	145
Figura 5.31: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx.....	145
Figura 5.32: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx	146
Figura 5.33: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A	151
Figura 5.34: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A.....	151
Figura 5.35: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A.	153
Figura 5.36: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	157

Figura 5.37: Gráfica de volumen de filtrado Y volumen acumulado de filtrado sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	157
Figura 5.38: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	158
Figura 5.39: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	162
Figura 5.40: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	163
Figura 5.41: Tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	164
Figura 5.42: Grafica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	168
Figura 5.43: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	168
Figura 5.44: tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	170
Figura 5.45: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	174
Figura 5.46: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	175
Figura 5.47: Tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	176
Figura 5.48: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	180
Figura 5.49: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	180
Figura 5.50: Tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	182
Figura 5.51: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	186
Figura 5.52: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	187
Figura 5.53: Tiempo de Bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	188
Figura 5.54: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Estabilidad para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones.....	190
Figura 5.55: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Estabilidad para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones.....	191

Figura 5.56: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Pérdida de filtrado para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones. 192

Figura 5.57: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Pérdida de filtrado para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones. 193

Figura 5.58: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Permeabilidad para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones. 194

Figura 5.59: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Permeabilidad para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones. 195

Figura 5.60: Gráfica comparativa de resultados del ensayo Tiempo de Bombeabilidad para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones. 196

Figura 5.61: Gráfica comparativa de resultados del ensayo Tiempo de Bombeabilidad para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones. 197

Figura 5.62: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Resistencia a la Compresión para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones. 198

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Clasificación de cementos API, [The Robert Gordon University, 2007]	21
Tabla 2.2. Formulación Química del Cemento, [Rodríguez, 2012].....	22
Tabla 2.3: Especificaciones técnicas del LITECEM®, [Protocolo de aplicación del producto tecnológico LITECEM®, 2006]	30
Tabla 3.1: Requerimientos para la preparación de la lechada, fuente [FONDONORMA 3866:2005]	58
Tabla 3.2: Requerimientos de aceptación en el tiempo de espesamiento, fuente [FONDONORMA 3866:2005]	58
Tabla 3.3: Requerimientos de aceptación para porcentaje de fluido libre, fuente [FONDONORMA 3866:2005]	59
Tabla 3.4: Requerimientos de aceptación para la resistencia a la compresión, tiempo de curado 8 horas, fuente [FONDONORMA 3866:2005].....	60
Tabla 3.5: Propiedades de las soluciones acuosas de surfactantes.....	62
Tabla 3.6: Matriz de ensayos para evaluar la adsorción del surfactante en la fase líquido-gas.....	63
Tabla 3.7: Matriz de ensayos para evaluar la adsorción del surfactante en la fase líquido-sólido.	64
Tabla 3.8: Diseño del sistema cementante a evaluar (blanco), para un volumen de 600 cc	68
Tabla 3.9: Diseño del sistema cementante a evaluar (blanco) sin el aditivo acelerador, para un volumen de 600 cc.....	68
Tabla 3.10: Diseño del sistema cementante + 0,8 gal/sx del surfactante X, para un volumen de 600 cc	73
Tabla 3.11: Diseño del sistema cementante + 1,2 gal/sx del surfactante X, para un volumen de 600 cc	73
Tabla 3.12: Diseño del sistema cementante + 1,6 gal/sx del surfactante X, para un volumen de 600 cc	74
Tabla 3.13: Diseño del sistema cementante sin el aditivo acelerador + 0,8 gal/sx de surfactante X, para un volumen de 600 cc	74
Tabla 3.14: Diseño del sistema cementante sin el aditivo acelerador + 1,2 gal/sx de surfactante X, para un volumen de 600 cc	75

Tabla 3.15: Diseño del sistema cementante sin el aditivo acelerador + 1,6 gal/sx de surfactante X, para un volumen de 600 cc	75
Tabla 3.16: Matriz de operacionalización de objetivos 1y 2	80
Tabla 3.17: Matriz de operacionalización de objetivos 3 y 4	81
Tabla 3.18: Matriz de operacionalización de objetivos 5 y 6	82
Tabla 3.19: Matriz de operacionalización del objetivo 7.....	83
Tabla 5.1. Propiedades de las soluciones de surfactantes	91
Tabla 5.2: Determinación ángulos de contacto sobre partículas de cemento	101
Tabla 5.3: Resistencia a la compresión a temperatura de 100 °F, tiempo de curado 8 horas.	105
Tabla 5.4: Resistencia a la compresión a temperatura de 140 °F, tiempo de curado 8 horas.	105
Tabla 5.5: Propiedades recomendadas del fluido de perforación, hoyo productor 8½”, [Programa de ingeniería de perforación, 2010].....	106
Tabla 5.6: Propiedades del sistema cementante a utilizar en el área de estudio, hoyo productor 8½”, [Programa de ingeniería de perforación, 2010]	106
Tabla 5.7: Ensayo de estabilidad del sistema Blanco	108
Tabla 5.8: Datos de reología del sistema Blanco	109
Tabla 5.9: Modelos reológicos del sistema Blanco.....	109
Tabla 5.10: Permeabilidad del sistema Blanco	111
Tabla 5.11: Resistencia a la compresión del sistema Blanco.....	112
Tabla 5.12: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	113
Tabla 5.13: Datos de reología sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	115
Tabla 5.14: Modelos reológicos para el sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	115
Tabla 5.15: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	117
Tala 5.16: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx	118
Tabla 5.17: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	119
Tabla 5.18: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	121
Tabla 5.19: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	121
Tabla 5.20: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	123
Tabla 5.21: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx	124

Tabla 5.22: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	125
Tabla 5.23: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	126
Tabla 5.24: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	126
Tabla 5.25: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	128
Tabla 5.26: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx	129
Tabla 5.27: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	130
Tabla 5.28: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	132
Tabla 5.29: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	132
Tabla 5.30: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx.....	134
Tabla 5.31: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx	135
Tabla 5.32: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx,	136
Tabla 5.33: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx,	138
Tabla 5.34: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx,	138
Tabla 5.35: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx.....	140
Tabla 5.36: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx	141
Tabla 5.37: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx	142
Tabla 5.38: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx .	144
Tabla 5.39: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx	144
Tabla 5.40: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx.....	146
Tabla 5.41: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx	147
Tabla 5.42: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A	148
Tabla 5.43: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A.....	150
Tabla 5.44: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A	150
Tabla 5.45: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A.....	152
Tabla 5.46: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A	153

Tabla 5.47: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	154
Tabla 5.48: Datos de reología sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	156
Tabla 5.49: Modelos reológicos sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	156
Tabla 5.50: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	158
Tabla 5.51: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx	159
Tabla 5.52: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	160
Tabla 5.53: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	161
Tabla 5.54: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	162
Tabla 5.55: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	163
Tabla 5.56: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx	164
Tabla 5.57: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	165
Tabla 5.58: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	167
Tabla 5.59: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	167
Tabla 5.60: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	169
Tabla 5.61: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx	170
Tabla 5.62: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	172
Tabla 5.63: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	173
Tabla 5.64: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	173
Tabla 5.65: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	175

Tabla 5.66: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx	176
Tabla 5.67: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	177
Tabla 5.68: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	179
Tabla 5.69: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	179
Tabla 5.70: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	181
Tabla 5.71: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx	182
Tabla 5.72: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	184
Tabla 5.73: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	185
Tabla 5.74: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	185
Tabla 5.75: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	187
Tabla 5.76: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx	188

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 3.1: Modelo reológico Plástico de Bingham	48
Ecuación 3.2: Viscosidad plástica.....	48
Ecuación 3.3: Modelo reológico ley de potencia	49
Ecuación 3.4: Índice de ley de potencia.....	49
Ecuación 3.5: Índice de consistencia	50
Ecuación 3.6: Pérdida de filtrado	51
Ecuación 3.7: Ecuación de Darcy	53
Ecuación 3.8: Tensión superficial	55
Ecuación 3.9: Porcentaje de fluido libre	60
Ecuación 3.10: Porcentaje de Concentración peso/peso	61
Ecuación 3.11: Ecuacion de Washburn	65
Ecuación 3.12: Densidad relativa.....	70

INTRODUCCIÓN

La cementación es una etapa crucial en la perforación de pozos petroleros, ésta permite aislar las diferentes formaciones que pudieran interceptar la trayectoria de un pozo, y los fluidos que éstas posean. El fluido cementante o lechada debe poseer características adaptadas a las diferentes condiciones a las que va a ser expuesta, y a las propiedades de la formación con la que va a estar en contacto, las propiedades de los fluidos cementantes son determinadas y alcanzadas luego de un estudio analítico experimental. En pozos con bajos gradientes de presión y baja presión de fractura es fundamental impedir la migración de los fluidos hacia la formación para lograr una cementación exitosa, es por eso que en estos casos se deben formular lechadas de baja densidad.

El LITECEM® es una tecnología desarrollada por PDVSA Intevep que permite diseñar lechadas de cemento de baja densidad mediante el uso de materiales poliméricos de baja gravedad específica. Estudios previos muestran la factibilidad de usar surfactantes para mejorar la dispersión de las partículas en el sistema cementante.

El objetivo de este trabajo de investigación es el de seleccionar, a partir de un procedimiento inicial de descarte de surfactantes, y un procedimiento secundario de análisis de sistemas, el conjunto más indicado de LITECEM®, surfactantes y aditivos, que garanticen una buena dispersión del primero y buenas propiedades reológicas y de resistencia que se adapten al campo TIA JUANA LAGO-VENEZUELA.

En el siguiente trabajo se mostrará de forma metodológica los resultados del procedimiento de formulación y selección del sistema ideal para la aplicación indicada.

CAPÍTULO I

El presente capítulo pretende explicar las razones e ideas que le dan base al problema, al cual se le buscará una solución durante el desarrollo del presente trabajo. Así mismo, se exponen los objetivos necesarios para cumplir con las metas planteadas. De igual manera, se presenta el alcance y la justificación para dicha investigación.

1.1 Planteamiento del problema

En la perforación de pozos de petróleo se van atravesando distintas formaciones con gradientes de presiones variables los cuales pueden ser normales (0,465 lpc/pie), anormales ($>0,465$ lpc/pie) y subnormales ($< 0,465$ lpc/pie). La presencia de presiones subnormales en este tipo de operaciones representa un problema considerable ya que se puede tener pérdida de circulación con respecto al fluido de perforación y las lechadas de cemento debido a la presión hidrostática ejercida por los mismos.

La tecnología de LITECEM[®] permite reducir la densidad de sistemas cementantes hasta 11,5 lpg, está constituida de un material polimérico en forma de partícula esférica de baja gravedad específica (g.e.= 0,48), que tiene como característica principal ser hidrofóbico, lo cual garantiza que la fase continua de la lechada no penetre a la partícula y pierda su efectividad de aditivo extendedor. Ésta característica del material trae como consecuencia la no homogeneidad en el sistema cementante debido a la baja gravedad específica permitiendo que flote con mayor facilidad hacia la superficie, lo cual puede generar una diferencia de densidad entre el tope y la base del cemento fraguado.

En el Campo Tía Juana para el año 2010 se realizaron pruebas pilotos donde se recomendó mejorar la dispersión del aditivo en la lechada con el fin de homogeneizar la misma y evitar los problemas antes expuestos. Debido a esto, se planteó la necesidad de iniciar una investigación sobre el uso de surfactantes como agentes dispersantes del LITECEM[®] en lechadas de cemento de baja densidad y así mejorar la ventana operacional de la tecnología. Estudios previos muestran la factibilidad de emplear surfactantes para mejorar la dispersión de esferas de poliestireno en matrices cementantes. Los surfactantes son sustancias químicas que se caracterizan por tener en su estructura molecular un grupo polar (afín a sustancias polares) y un grupo no polar (afín a sustancias orgánicas), entre sus propiedades principales se tiene la adsorción en interfaces, lo cual permite la estabilización de sistemas dispersos y mejoras en la mojabilidad de superficies hidrofóbicas, propiedades de interés para esta investigación.

En tal sentido, con la realización de este estudio se pretende evaluar el efecto de distintos surfactantes de fabricación nacional sobre la mojabilidad y dispersión de las esferas poliméricas (LITECEM[®]) en lechadas de cemento, igualmente se pretende evaluar la influencia de tales aditivos en las propiedades físicas y mecánicas de dicho sistema.

Como resultado de lo explicado anteriormente surgen las siguientes interrogantes: ¿Cuál y en que concentración el surfactante genera el mayor cambio de dispersión y mojabilidad del LITECEM[®] en el sistema cementante?, ¿Cómo afecta el uso de surfactantes a las propiedades físicas y de resistencia a la compresión del sistema cementante?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar surfactantes como agente dispersante del LITECEM[®] en lechadas de cemento de baja densidad bajo las condiciones operacionales del Campo Tía Juana.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información bibliográfica y geológica del área de Tía Juana.
2. Evaluar el efecto del surfactante sobre la mojabilidad de las esferas poliméricas.
3. Evaluar el efecto del cemento sobre la adsorción del surfactante en interfases liquido-sólido y liquido-gas.
4. Evaluar el efecto del surfactante sobre la mojabilidad de las partículas de cemento.
5. Evaluar las propiedades de control de calidad del cemento petrolero bajo la norma ISO 10426-2.
6. Evaluar las propiedades físicas del sistema LITECEM[®] con surfactante y del sistema LITECEM[®] de acuerdo a las normas ISO 10426-2, ISO/FDIS 10426-6.
7. Evaluar la resistencia a la compresión de ambos sistemas.

1.3 Alcance de la investigación

Con la realización de este estudio se pretende evaluar el efecto de tres surfactantes de diferentes estructuras químicas: aniónico/no-iónico basado en sulfato; aniónico/no-iónico basado en fosfato y un catiónico basado en aminas, sobre la mojabilidad de esferas poliméricas (LITECEM[®]) en medio acuoso, así como su efecto en las propiedades físicas de los sistemas cementantes de baja densidad para mejorar la dispersión del LITECEM[®] y evitar los problemas de consistencia en el sistema, a fin de proponer una solución tecnológica propia a las áreas operacionales que aplican lechadas de baja densidad.

1.4 Justificación

En la actualidad la construcción de pozos en áreas de yacimientos agotados o en zonas de estratos con presiones subnormales requieren tecnologías de lechadas cementantes de baja densidad. En el mercado hay una amplia variedad de aditivos extendedores que permiten tener densidades menores a las lechadas convencionales. PDVSA Intevep desarrolló la tecnología LITECEM[®], la cual es un sistema cementante que utiliza un agente reductor de densidad, la misma se puede aplicar en áreas con temperaturas menores a 180 °F para evitar la degradación del polímero. Sin embargo, los ensayos de estabilidad y sedimentación de la lechada han mostrado que la dispersión de las partículas no es homogénea, esto se debe a las características de las partículas de poliestireno. No obstante, el uso de aditivos que aumentan la viscosidad de la lechada de manera controlada, han mantenido una densidad homogénea a lo largo de la columna de cemento evitando que las partículas se separen hacia la superficie para los sistemas que posean una densidad mayor a la de 12,5 lpg, en tal sentido éste estudio busca ampliar la ventana operacional del aditivo, disminuyendo la densidad hasta 11 lpg, lo cual requiere una mejor dispersión de la esferas dentro de la lechada, así como evitar problemas de segregación durante la etapa de preparación a nivel de campo. Estudios previos muestran la factibilidad de usar surfactantes para mejorar la dispersión de las partículas en el sistema cementante; por tal motivo, se propone realizar esta investigación para determinar la

factibilidad técnica de mejorar la homogeneidad del LITECEM® mediante el uso de surfactantes, para así ampliar el rango de aplicabilidad en distintas áreas donde se pueda utilizar sistemas no convencionales.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta la recopilación de conceptos que sirven de base para fundamentar este estudio. Las bases teóricas han sido divididas en diferentes secciones, estas son: Antecedentes, Cementación, Lechadas de cemento, LITECEM[®] y Surfactantes. El desarrollo de estos conceptos permiten el entendimiento de la investigación ya que ésta tiene como propósito evaluar distintos surfactantes como agente dispersante del LITECEM[®] en lechadas de cemento de baja densidad.

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Colina A., Mas M., Aular W., Blanco A. y Massirubi L. (2004) en un artículo titulado: *Tecnología y Aplicación en campo de lechada tensoactiva*, presentaron el estudio de un sistema cementante tensoactivo, que permite que se pueda utilizar en hoyos perforados con lodo base aceite, el sistema consiste en la combinación de un sistema cementante con una concentración de surfactante capaz de cambiar la mojabilidad en las paredes del hoyo. La mezcla de surfactantes que se utiliza en esta tecnología es de menor concentración que la utilizada en los lavadores de revoque para que haya una buena adherencia cemento–formación.

Realizaron la formulación de lechadas de cemento convencional a las que le añadieron una cantidad determinada de surfactantes, con la finalidad de evitar que la contaminación del cemento por el aceite impidiera su fraguado, manteniendo intactas las propiedades de la lechada, no se altera la matriz del cemento y obtienen lechadas factibles técnica y económicamente, logrando de esta manera realizar operaciones de cementación exitosas en ambientes contaminados con fluidos base aceite. Este trabajo permite verificar la compatibilidad entre los

surfactantes y el cemento y las concentraciones a las cuales se pudiera utilizar sin alterar la funcionalidad del cemento.

Solís R., Moreno E. y Chuc N. (2006); realizaron un estudio de la *Evaluación del concreto con reductor de agua en clima cálido*, para los autores el desempeño del concreto, no se debe solo al uso de sus tres componentes principales (agua, cemento y grava), si no también a la incorporación de aditivos adicionales; sin embargo disminuir la relación de agua y cemento es una buena practica, solo que tiene el riesgo de que la mezcla no se pueda trabajar.

Las partículas de cemento Portland tienen una fuerte tendencia a flocularse cuando se mezclan con agua, esto ocurre por fuerzas electrostáticas entre partículas con cargas opuestas, y a la interacción entre las moléculas de agua y los hidratos, debido a esto las partículas de la fase sólida deben deflocularse.

La agregación de surfactantes a un sistema agua-cemento, permite disminuir la tensión superficial de la fase líquida y la adsorción del surfactante sobre las partículas de cemento permiten mejorar su dispersión en agua, evitando la floculación.

La solución que proponen es la utilización de aditivos reductores de agua, también llamados fluidificantes, que permiten disminuir desde un 5 % hasta un 15 % de la cantidad de agua del mezclado, para conservar la fluidez de la mezcla, de esta forma obtienen una solución alterna que permite disminuir el consumo de cemento en la misma proporción que la del agua, conservando la relación entre ellos. La parte activa de los reductores de agua son agentes químicos tensoactivos que permiten la disminución de la tensión superficial de las partículas, también conocidos como surfactantes.

Este artículo permite entender el efecto del surfactante sobre la dispersión de las partículas de cemento.

Puertas F. y Vazquez T. (2001), realizaron una investigación titulada: ***Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes***; en la cual estudian la hidratación inicial del cemento Portland aditivado con superplastificantes conocidos como surfactantes de diferente naturaleza, la concentración fijada es en relación del peso del cemento y en otro caso variando la concentración para evaluar la influencia de la misma. Las pruebas realizadas para el estudio fueron: Calorimetría de conducción, Difracción de rayos X y Espectroscopia infrarroja. La metodología utilizada fue la preparación de pastas de cemento con una relación de agua-cemento =0,4, en las que el aditivo se adicionó al agua de mezclado. La concentración de los mismos fue la siguiente: surfactante A= 1% en peso de cemento, surfactante B= 1% en peso de cemento y variando la concentración del surfactante C en 0,3; 0,5; 0,7 y 1% en peso de cemento así como también prepararon mezclas sin surfactante como muestras de referencia.

Este estudio arrojó como resultados, que los aditivos superplastificantes (surfactantes) retardan la hidratación de las partículas de cemento independientemente cual sea su naturaleza y concentración; también comprobaron que el calor desprendido como consecuencia de las distintas reacciones asociadas a esta etapa de hidratación, es independiente de la naturaleza y dosificación del aditivo, colocando en manifiesto que las reacciones que se producen son las mismas.

Dicho estudio, establece que el uso de distintos surfactantes a diferentes concentraciones no afecta las reacciones químicas que se producen en la fase de hidratación y fraguado de la mezcla, al tener conocimiento de esto se puede estudiar, el efecto de estos aditivos sobre la mojabilidad y adsorción de las esferas poliméricas en solución acuosa de surfactante y solución acuosa de surfactante más cemento; esto con el fin de observar si el surfactante pierde o no sus propiedades de mojabilidad y adsorción en contacto con cemento.

Spoerker, H., OMV A. y Doschek, M. (2002), presentaron un artículo técnico titulado: *Field Experience with Applying Foamed Cement Slurries in Mature Depleted Formations*; en esta investigación aplican la tecnología de cemento espumado en las zonas de los yacimientos agotados, el cual consiste en lechadas de baja densidad que se logran con el uso de nitrógeno, lo que lleva al uso de esta tecnología son los problemas presentados en el hoyo durante la perforación. Los diseños de lechadas espumadas es la incorporación de una fase gaseosa en la matriz de cemento, es fase gaseosa es nitrógeno, el equilibrio de estos sistemas se logra con el uso de surfactantes que permiten la estabilización de las burbujas de gas, se pueden lograr densidades hasta de 4 lpg, pero el rango normalmente utilizado en las cementaciones se encuentra entre 9 y 14 lpg, a menor densidad, se tiene menos resistencia a la compresión, mayor permeabilidad, lo cual no son características óptimas para un sistema cementante. La ventaja de este sistema a diferencia del resto de los sistemas cementantes de baja densidad, es que se puede variar in situ la densidad, aumentando o disminuyendo la cantidad de nitrógeno inyectado.

Los estudios realizados dicen que se puede aplicar hasta un 34% de espuma, pero para este trabajo se fijo un valor de 25% para que la resistencia a la compresión sea adecuada y mantenga una baja permeabilidad. Esta tecnología puede ser una variante de las lechadas no convencionales ya que proporcionan un adecuado aislamiento zonal en los diferentes tipos de pozos, las burbujas de gas contra la formación integran una barrera lo cual permite que no afecte la pérdida de fluido hacia la formación.

Dicho estudio nos permite entender que a mayor concentración de aditivo extendedor pueden disminuir propiedades del sistema cementante, las cuales le dan vida productiva al pozo.

Moulin, E., Philippe, R. y Jain, B. (1997), en el artículo titulado: *Using Concrete Technology to improve the Performance of Lightweight Cements*, presentan los resultados, tanto de laboratorio como de campo, de la adaptación de una tecnología desarrollada en la Industria de la Ingeniería Civil al diseño de lechadas

de cemento de baja densidad para pozos petroleros. Esta tecnología, basada en el concepto de empaquetamiento de partículas, consiste en optimizar la distribución granulométrica de una mezcla de sólidos con el fin de incorporar un amplio rango de tamaños de partículas de modo que las más pequeñas se ubiquen en los espacios formados por las partículas de mayor tamaño. La tecnología de empaquetamiento de partículas permite eliminar la interrelación que existe entre el comportamiento de la lechada y el del cemento fraguado, pues los sistemas convencionales de baja densidad, como los fundamentados en el uso de extendedores, se caracterizan porque a medida que disminuye la densidad, mediante la incorporación de agua, también disminuye la resistencia mecánica del cemento fraguado. Con esta tecnología se pueden obtener densidades entre 10,5 y 13 lpg con resistencia a la compresión de 2000 y 4000 psi a las 24 hr, respectivamente, la permeabilidad llega a ser menor que 10 mD, la porosidad cerca del 20%. Este tipo de lechadas reduce el tiempo de espera para fraguado del cemento, elimina la cementación en dos etapas en yacimientos con bajo gradiente de fractura y con intercalaciones de lutitas y arenas no consolidadas.

Este estudio permite entender que, el empaquetamiento de las partículas de distintos tamaños permite la reducción de la densidad en sistemas cementante, manteniendo la integridad del sistema.

Lilkov, V.; Djabarov, N.; Bechev, G. y Kolev, K.(1999), en el trabajo titulado: ***Properties and hydration products of lightweight and expansive cements***, los autores realizaron un estudio de las propiedades físicas (densidad, expansión, fluido libre, permeabilidad al agua y al aire, estructura de poro, tiempo de espesamiento) y mecánicas (resistencia a la compresión, flexión, tracción y adherencia cemento-tubería y cemento-roca) de sistemas cementantes livianos y expansivos curados a 20 y 75 °C para aplicaciones de tapones de cemento. Como aditivo reductor de densidad utilizaron cenizas volantes las cuales son materiales de desecho de la planta termoeléctrica *Bobov Dol* de Bulgaria y como aditivo expansivo la Bulexa que es un tipo de hidróxido. La incorporación de cenizas volantes

en la lechada, bien sea sola o en combinación con aditivos expansivos, permite reducir la densidad de tapones de cemento.

Las esferas son cuerpos huecos de silicato con gravedad específica entre 0,35 y 0,5, según la escala de Mohs su dureza es 5-6. En este material se identificaron dos fracciones:

Fracción A: esferas grandes de color gris con superficie porosa, diámetro máximo de 2 mm y superficie específica de $767 \text{ m}^2/\text{gr}$, contiene aproximadamente 59% SiO_2 y 22% Al_2O_3 .

Fracción B: esferas pequeñas de color blanco con superficie lisa, diámetro máximo de 0,2 mm y superficie específica de $450 \text{ m}^2/\text{gr}$, contiene aproximadamente 60% SiO_2 y 24% Al_2O_3 .

Se utilizaron dos tipos de cementos, PC 45 y PC 35 (PC: Cemento Portland), con diferentes grados de fineza y cuya área superficial específica era 314 y 420 m^2/g , respectivamente. Los diseños evaluados en un rango de densidad entre 12,3 y 13,4 lpg para los dos tipos de esferas, dan buenos resultados en las propiedades físicas y mecánicas a condiciones de fraguado de 20°C y cuarenta y ocho (48) horas. Según este estudio el aditivo expansivo Bulexa permite una expansión controlada del cemento y mejora la adherencia del cemento hacia la tubería y la roca.

En este trabajo nos permite entender que el uso de esferas huecas de distintos tamaños no afecta la evaluación de las propiedades físicas del sistema cementante en laboratorio.

2.2 CEMENTACIÓN

Carruyo (2005), dice que la cementación es un proceso dinámico que consiste en preparar la lechada combinando cemento seco, agua y los aditivos necesarios en un mezclador para luego bombearla y desplazarla hacia el espacio anular.

El proceso se completa si el cemento en el anular evita el flujo de fluidos de la formación. Para alcanzar el aislamiento zonal, se deben remover los ripios del anular y reemplazarlos por la lechada de cemento. Luego, la lechada debe

hidratarse, cambiar de la fase líquida a la sólida, desarrollar propiedades para evitar el flujo de fluidos de la formación y soportar operaciones de la completación de pozos como lo son: cañoneos, estimulación, producción y cualquier otra acción durante la vida útil del pozo.

2.2.1 Tipos de cementación

Cementación Primaria

La cementación primaria es la técnica utilizada para colocar lechadas de cemento en el espacio anular entre el revestidor y las paredes del hoyo. Para Diaz y Mendez (2007), expresan que la lechada luego de ser vertida forma un sello hidráulico en el hoyo, evitando la migración de fluidos de la formación hacia el espacio anular, a yacimientos de menor presión o hacia la superficie. Esta cementación es una de las etapas más críticas durante la perforación y completación de un pozo ya que el procedimiento debe ser planificado y ejecutado cuidadosamente, debido a que hay una sola oportunidad para realizar el trabajo.

Además de proporcionar el aislamiento zonal, el cemento debe anclar, soportar y proteger contra la corrosión de los fluidos de la formación a la tubería de revestimiento. Los revestidores no cementados pueden corroerse rápidamente, cuando se exponen a las salmueras de las formaciones, al H_2S y CO_2 . Las cargas laterales sobre las sartas de revestimiento mal cementadas pueden causar deformación, pandeo o colapso sobre ciertos puntos; a diferencia de los revestidores bien cementados que soportan cargas uniformes.

Cementación Secundaria

Carruyo (2005), escribe que la cementación secundaria es el trabajo de cementación adicional realizada en una fase posterior, esta se define como un proceso de bombear una lechada de cemento en el pozo, bajo presión, forzándola contra una formación porosa, tanto en las perforaciones del revestidor o directamente al hoyo abierto.

Cuando la lechada es forzada contra una formación permeable, las partículas sólidas pierden filtrado en la cara de la formación de tal manera que la fase acuosa que entra en la matriz de la formación, forma una torta que ocupa los espacios

porosos, creando un sello impermeable. El objetivo de una cementación forzada es obtener una zona aislada o sellada en el espacio anular entre el revestidor y la formación. La cementación secundaria se puede realizar durante la ejecución de cualquiera de los siguientes procesos: Perforación, completación o trabajos de reacondicionamiento.

A continuación se especifican las razones para realizar un trabajo de cementación secundaria.

- a) Reparar un trabajo de cementación primaria deficiente, debido a la canalización de la lechada de cemento a través del lodo, o por altura insuficiente del cemento en el anular (*Top Job*).
- b) Eliminar la intrusión de agua de las zonas adyacentes o también de la misma formación productora de hidrocarburos.
- c) Reducir la alta producción Gas/Petróleo (RGP), aislando las zonas de gas adyacentes a los intervalos productores de hidrocarburos.
- d) Reparar una filtración causada por corrosión o por partidura del revestidor.
- e) Abandonar una zona no productora o agotada.
- f) Taponar uno o más intervalos de una zona de inyección múltiple, de tal forma de hacer una inyección directa en los intervalos seleccionados.
- g) Sellar zonas de pérdidas de circulación o zonas ladronas.
- h) Proteger la migración de fluidos hacia las zonas productoras.

2.2.2 Tipos de Revestidores

La cementación del anular entre el hoyo y el revestidor, es una práctica universal que se realiza por numerosas razones y dependen del tipo de revestidores a cementar. Para Arrieta (s.f.) los propósitos por los cuales se cementan cada uno de lo revestidores son:

Revestidores Conductores

El conductor sirve para evitar que los fluidos de perforación contaminen las arenas poco profundas, así como para evitar los derrumbes, que pueden producirse fácilmente cerca de las superficies donde hay capas superficiales o lechos de

grava no consolidados o sueltos, la profundidad promedio es de 30 a 200 pie, donde la mas común es menor a 100 pies.

Revestidores Superficiales

El revestidor superficial también actúa como aislamiento para las formaciones no consolidadas, sella y protege zonas de agua dulce presentes a poca profundidad, suministra un anclaje para los impiderreventones y para dar soporte superficial al resto de las sargas de revestimiento que se usarán en el pozo, los mismos son utilizados a profundidades de 100 a 3000 pies o mas, esto va a dependes de la profundidad final y el diseño de la completación del pozo.

Revestidores Intermedios

Las tuberías de revestimiento intermedias se utilizan para aislar zonas de pérdida de circulación, secciones salinas, zonas de sobrepresión, secciones con lutitas y para facilitar el control del pozo en caso de arremetidas, las profundidades promedio se encuentran en un rango de 3000 a 10000 pies dependiendo de la profundidad final del pozo..

Revestidores de Producción

Evitar la migración de fluidos a otras zonas que podrían causar una reducción de la productividad del pozo, actúa como cubierta de protección de los equipos de terminación y aísla zonas productoras para desarrollos futuros, este revestidor se coloca hasta cubrir la zona productora y proporciona un refuerzo para la tubería de producción durante las operaciones de producción del pozo. Por lo general, no se extiende hasta la superficie y es colgada en la sarga de revestimiento anterior a ella. La profundidad de asentamiento es la profundidad total del pozo.

2.2.3 Parámetros para el Diseño de Cementación

El análisis de las características del pozo es una de las facetas que se deben considerar en las operaciones de cementación. En cualquier diseño de un trabajo de cementación, los factores que se necesitan examinar en primer término caen en tres categorías básicas: profundidad y configuración del pozo, condiciones del hoyo y temperatura.

La configuración del anular sugiere que régimen es más práctico y las propiedades reológicas que pueden ser requeridas. Las condiciones del hoyo indican si se debe incorporar materiales especiales en la formulación de la lechada, debido a la presencia de gas, sal y elementos corrosivos; la densidad del lodo indica la mínima densidad de la lechada. Estos factores unidos a los datos de temperatura, sirven de guía para la selección de los aditivos a usar para el control de las propiedades de flujo de la lechada y el tiempo de espesamiento.

Profundidad

Los datos de profundidad, son importantes porque influyen en la temperatura, volumen de fluido y presión hidrostática. La presión y la temperatura afectan el tiempo de bombeabilidad y la resistencia a la compresión (retrogresión térmica del cemento) de las lechadas de cemento. La temperatura tiene mayor influencia a medida que aumenta, la lechada se deshidrata y el fraguado se produce más rápidamente. Esto ocasiona que el tiempo de bombeabilidad disminuya.

El fenómeno de retrogresión térmica del cemento, Galindo (2006), se debe a que en pozos con elevadas temperaturas (mayores a 230 °F) el gel C-S-H sufre metamorfosis disminuyendo la resistencia a la compresión y aumentando la permeabilidad del cemento endurecido; dicho gel llamado silicato cálcico hidratado se produce por la combinación del silicato tricálcico con agua, donde el mismo es el responsable del desarrollo de la resistencia a la compresión y la estabilidad dimensional del cemento endurecido a temperaturas ordinarias.

Geometría del Hoyo Perforado

El hoyo perforado debe reunir ciertos requisitos para que se pueda cementar y se logren los objetivos deseados. Este segmento de la planificación del trabajo de cementación, comienza mucho antes de que el pozo sea perforado. De mayor importancia en todas las decisiones con respecto a la planificación y perforación, es el objetivo de obtener un aislamiento zonal completo dentro del hoyo perforado; existen condiciones bajo las cuales se debe diseñar y perforar el pozo como lo es que el pozo no deber tener socavamientos ya que esto indica un

volumen adicional el cual no puede ser cuantificado, el hoyo debe ser lo más rectos posible, no debe haber pérdida de circulación, el espacio anular entre la tubería y el hoyo no debe ser menor a tres pulgadas entre otras. En la figura 2.1 se muestra las condiciones ideales bajo las cuales se debe diseñar y perforar el hoyo para realizar una cementación exitosa.

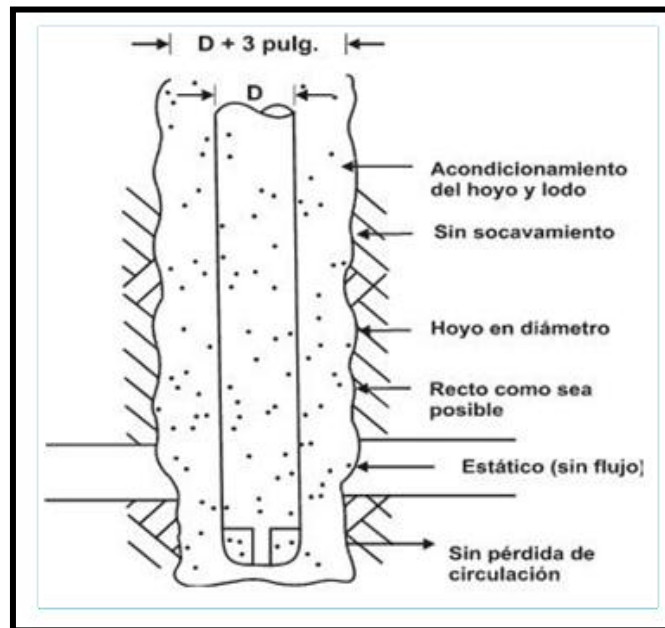


Figura 2.1. Condiciones ideales para cementar un hoyo perforado. [Carruyo, 2005]

Ángulos de Desviación

Los altos ángulos de desviación pueden tener un impacto sobre los parámetros del pozo y pueden requerir el diseño de sistemas especiales para el desplazamiento del lodo y lechadas de cemento donde esta última no debe tener agua libre debido a que el revestidor queda mal cementado.

Calibración del Hoyo

El diámetro del hoyo, es función del diámetro de la mecha de perforación utilizada la cual ocasionalmente se desgasta. Algunas formaciones son más susceptibles a erosión que otras. El uso de registros de calibración corridos con guayas estima el diámetro del hoyo y de esta forma el volumen anular, con diferentes grados de exactitud. El registro de calibración permite realizar una

mejor ubicación de los centralizadores para así realizar una cementación uniforme a lo largo del hoyo.

Condiciones del Hoyo

Los problemas específicos debido a condiciones naturales en el intervalo de hoyo abierto requieren de una evaluación cuidadosa. En las condiciones del hoyo se deben considerar la presencia de zonas de pérdida de circulación, formaciones de alta presión, bajos gradientes de factura, presencia de gas, zonas salinas, entre otras.

Presiones de Formación

Las presiones de formación, son importantes desde el punto de vista del control del pozo y la información de ésta se puede obtener de los perfiles de lodo. Si no se dispone de estos, el peso del lodo da una indicación correcta de la máxima presión de poro del intervalo perforado. Si se ha tomado una arremetida, durante la perforación, esta dará una verificación sobre las estimaciones.

Presión de Fractura

La presión de fractura de la formación de fondo cercana a la zapata del revestidor, o en las formaciones débiles debe conocerse con el fin de seleccionar la densidad de la lechada, esta presión puede ser estimada con una prueba llamada Leak off Test, que consiste en aplicar presión en el pozo para determinar el momento en que la formación inicia su fracturamiento sin llegar a presentar fracturas profundas. Durante la etapa de planificación para la perforación de un pozo, se deben tomar decisiones con respecto al asiento del revestidor, peso del lodo y requerimientos de la cementación. Las decisiones se confirman más, a medida que más información se tiene disponible durante el proceso de la perforación.

El conocimiento suficiente de la presión de fractura de la formación, presión de poro y litología se requiere no solamente para mejorar el asentamiento del revestidor y el plan de perforación, sino también para proporcionar un trabajo de cementación con éxito.

La presión de fractura de la formación se define, para los propósitos de cementación, como la presión de propagación de la fractura. Esto no se debe confundir con la presión inicial de fractura, la cual por lo general, es mayor debido a la fuerza de tensión de las rocas expuestas. Sin embargo, en vista de que la fuerza de la roca no puede medirse con exactitud en sitio, la presión de iniciación de fractura no puede predecirse muy exactamente.

Zonas de Pérdida de Circulación

Las zonas de pérdida de circulación, en su mayoría son zonas de baja presión que ameritan una atención especial ya que en la misma no debería haber daños y ser cementadas con mayor eficiencia para asegurar la máxima vida productiva al pozo.

Presencia de Gas

La presencia de gas en una formación requiere, además de otras precauciones, una lechada de cemento especial para asegurar que el gas no migre a través de la columna de cemento durante el fraguado.

Temperatura

Uno de los parámetros que tiene mayor efecto sobre la lechada de cemento es la temperatura ya que dependiendo de la misma puede haber la retrogresión térmica del cemento. Se debe considerar la temperatura circulante de fondo de hoyo, la temperatura estática y la diferencia de temperatura entre el fondo y el tope de la columna de cemento.

Temperatura Circulante

La temperatura circulante, es la temperatura a la cual, teóricamente, el cemento estará expuesto durante su colocación en el pozo. Esta es la temperatura que se toma para realizar la prueba del tiempo de espesamiento a alta presión y temperatura, en la formulación de cemento. De esta forma, se selecciona el retardador y su concentración adecuada, de acuerdo a las condiciones dadas.

La temperatura circulante de pozo se determina normalmente de una lista o correlación establecida por el API (Spec 10, 1988). Sin embargo, algunos

operadores prefieren trabajar con temperatura medidas en los pozos durante la circulación. También, se ha introducido modelos físicos de transferencia de calor, pero su uso aún no se ha extendido.

Temperatura Estática

La temperatura estática, es importante principalmente por su valoración al estabilizarse por un largo período o por la tasa de desarrollo de la resistencia compresiva de un sistema de cemento dado.

Normalmente, se determina a partir del gradiente geotérmico promedio del área de interés o se puede estimar a través de medidas hechas durante la corrida de los perfiles.

Diferencia de Temperatura

La diferencia de temperatura entre el tope y el fondo de la columna de cemento puede ser importante en el diseño de la lechada. Una lechada de cemento retardada para un tiempo de colocación adecuado, a las condiciones circulantes en el fondo del hoyo, puede permanecer líquida o haber desarrollado poca resistencia cuando se encuentre a una profundidad más llana en el pozo.

Una regla práctica, es asegurar que la temperatura estática en el tope del cemento sea mayor a la temperatura circulante de fondo. Donde no sea posible aplicar este criterio, se deben realizar pruebas de resistencia compresiva a las condiciones del tope del cemento y si estas no son satisfactorias se debe realizar el trabajo en más de una etapa. Estas reglas suministran un medio simple de cálculo para la localización apropiada del cuello o herramienta de etapas.

2.3 LECHADAS DE CEMENTO

La mayoría de las lechadas para la cementación contienen aditivos para mejorar las propiedades individuales, esto va a depender del de las condiciones del trabajo de cementación a realizar.

2.3.1 Cemento Portland

El cemento Portland es el material más común usado para la cementación de pozos petroleros. Existen varias clases de cementos, que son clasificados desde la

letra A hasta la H según el Instituto Americano del Petróleo, cumpliendo cada uno con funciones específicas como se puede observar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Clasificación de cementos API, [The Robert Gordon University, 2007]

Clase de cemento API	Requerimiento de agua [gal/sx]	Densidad de la lechada [lpq]	Profundidad del pozo [pies]	Temperatura estática [°F]
A	5,2	15,6	0-6.000	80-170
B	5,2	15,6	0-6.000	80-170
C	6,3	14,8	0-6.000	80-170
D	4,3	16,4	6.000-10.000	170-230
E	4,3	16,4	6.000-14.000	170-290
F	4,3	16,4	10.000-16.000	230-320
G	5,0	15,8	0-8.000	80-200
H	4,3	16,4	0-8.000	80-200

Los cementos clase G y H son los más usados hoy en día y son diseñados para ser utilizados desde superficie hasta 8000 pies de profundidad, usados con retardadores o aceleradores para cubrir un amplio rango de presiones y temperaturas.

La base de la fabricación del cemento Portland es el clinker, este presenta los siguientes compuestos básicos: silicato tricálcico C_3S (Ca_3SiO_5) conocido como la Alita, silicato dicálcico C_2S (Ca_2SiO_4) llamado también Belita, aluminato tricálcico C_3A (Ca_3SiO_5) y ferroaluminato tetracálcico C_4AF (Ca_2AlFeO_5) también conocido como la Celita (ver tabla 2.2), siendo la materia prima para estos materiales calcáreos y materiales arcillosos (Michaux y otros, 1990).

Tabla 2.2. Formulación Química del Cemento, [Rodríguez, 2012]

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

En la preparación de un sistema cementante, la adición de cemento y agua, esta última hace que la fase sólida se hidrate permitiendo el desarrollo de una serie de reacciones químicas, entre ellas tenemos el desarrollo del gel CSH, la cual es una de las más importante debido a sus propiedades; para Martínez, 2008, dice que la pasta de cemento hidratadas (mezcla de cemento y agua) están fundamentalmente constituidas por un conjunto de fases cristalinas, (portlandita, etringita, monosulfoaluminato cálcico hidratado), por granos de cemento anhidro y sobre todo por un silicato cálcico hidratado, de naturaleza cuasi-amorfa, que se denominada gel C-S-H, que es el principal producto en la hidratación de los silicatos del cemento y que además confiere al producto final sus propiedades adherentes y mecánico-resistentes; sin olvidar su contribución a los aspectos de durabilidad.

Mientras que el gel CSH es el principal responsable del desarrollo de resistencia y de la durabilidad del cemento fraguado, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, llamado comúnmente portlandita, es muy poco resistente desde el punto de vista mecánico y es vulnerable a la presencia de agua, sulfatos y otros agentes.

Caillon, (2011) dice que la fabricación del cemento se puede dividir en cuatro fases, donde las mismas son importantes donde dependen entre si, como se observa en la figura 2.2, las fases son:

1ª Fase: la obtención y preparación de las materias primas.

2ª Fase: homogeneización, molienda de la materia y precalentado de ciclones.

3ª Fase: obtención del clinker.

4ª Fase: Molienda de clinker y expedición.

La obtención de la materia prima viene de las canteras, donde la misma es triturada y almacenada para posteriormente ser preparada para la homogeneización y molienda de la materia en crudo, después de esto se calienta la misma hasta la obtención del clinker el cual es enfriado para luego molerlo y añadirle distintos aditivos, lo cual hacen la diferencia entre las distintas clases del cemento portland

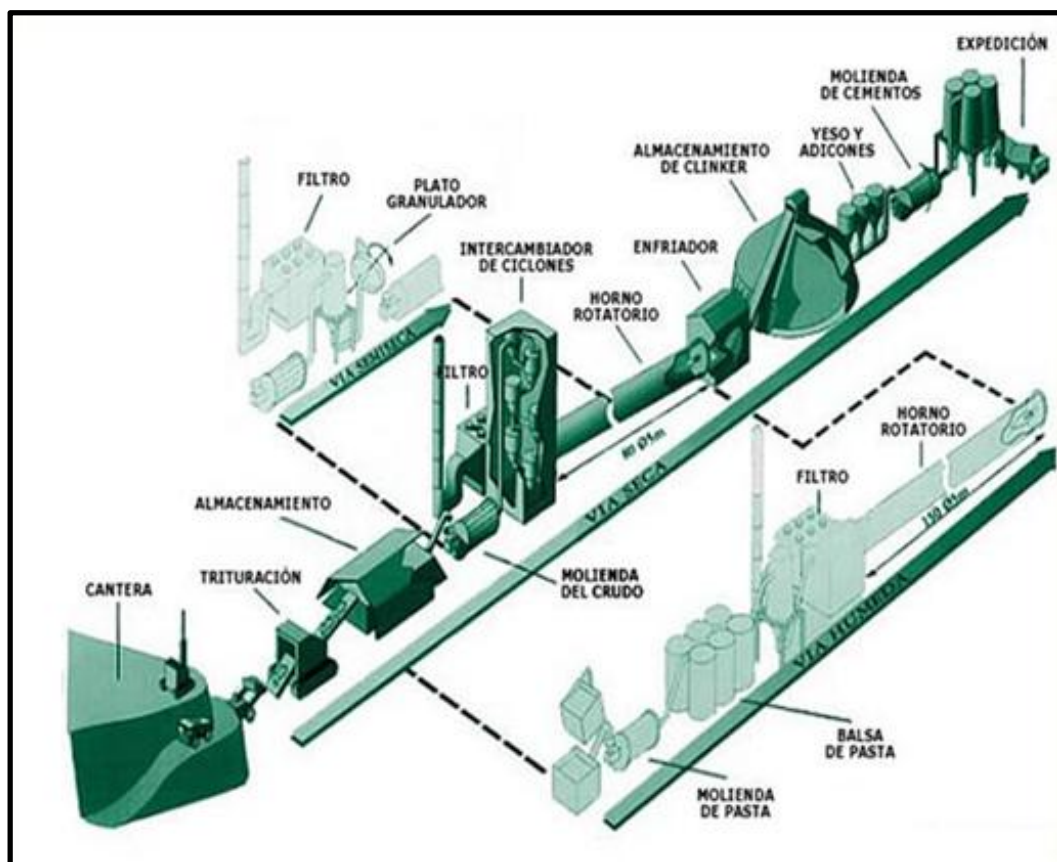


Figura 2.2: Proceso de fabricación del cemento Portland [Caillon, 2011]

2.3.2 Puzolanas

Las puzolanas son sustancias que contienen minerales silíceos y aluminosos que si bien no tienen por sí mismo cualidades cementantes, son capaces de reaccionar con la cal en la presencia del agua o temperaturas ordinarias para formar compuestos cementantes. Las puzolanas son quizás el grupo más importante de extendedores cuando se utilizan con el cemento Portland. Las puzolanas no sólo hacen que se extiendan los sistemas de cementos Portland, sino que también reaccionan y contribuyen al desarrollo de la resistencia a la compresión del producto fraguado.

2.3.3 Aditivos utilizados en la preparación de lechadas de cemento

En el diseño de un sistema cementante, los aditivos podrían ser requeridos para: variar la densidad de la lechada, aumentar la resistencia a la compresión, acelerar o retardar el tiempo de fraguado, controlar el fluido libre y la pérdida de filtrado y reducir o aumentar la viscosidad de la lechada.

Los aditivos pueden ser secos/granulares, líquidos o podrían estar mezclados con el cemento. Las cantidades de aditivos secos normalmente son expresados en términos de porcentaje por peso de cemento (% BWOC) y los aditivos líquidos normalmente son expresados en términos de volumen por peso de cemento (gal/sx).

Retardadores

Estos aditivos hacen que el tiempo de fraguado y el desarrollo de resistencia a la compresión sean más lentos, se utiliza en secciones más profundas en donde las altas temperaturas promueven un asentamiento más rápido.

Aceleradores

A diferencia de los aditivos retardadores, estos reducen el tiempo de fraguado y aumentan la velocidad de desarrollo de la resistencia a la compresión del cemento, normalmente son utilizados en pozos someros con bajas temperaturas.

Densificantes

Son materiales que aumentan la densidad del cemento o que aumentan la cantidad de cemento por unidad de volumen de material fraguado, con el fin de aumentar la presión hidrostática normalmente en zonas sobre presurizadas.

Control del filtrado

Estos controlan la pérdida de la fase acuosa del sistema cementante frente a una formación permeable, con este aditivo se previene la deshidratación y fraguado prematuro del sistema y suele ser utilizado para reducir el contenido de agua libre.

Dispersante

Se utilizan para mejorar las propiedades de flujo esto se debe a la concentración de partículas sólidas en el agua, es un reductor de viscosidad que permite alcanzar flujo turbulento a una presión circulante menor, para tener un menor riesgo de incurrir en pérdidas.

Extendedores

Son materiales que reducen la densidad del cemento o que reducen la cantidad de cemento por unidad de volumen del material fraguado, con el fin de reducir la presión hidrostática. Los aditivos extendedores son los mas utilizados para el diseño de sistemas cementantes no convencionales (de baja densidad), en la actualidad hay una amplia variedad de estos aditivos entre los cuales nos enfocamos en el LITECEM[®].

2.3.4 Propiedades Físicas de la Lechada

Las propiedades de la lechada y del cemento fraguado se diseñan y evalúan en un laboratorio, donde se simulan las distintas condiciones en las que van a utilizar el sistema. Los procedimientos de los ensayos en laboratorio se rigen por las normas ISO 10426-2.

Densidad

Es el peso por unidad de volumen de un material seco con aire atrapado. La densidad de la lechada o el peso de la lechada de cemento debe ser suficiente para poder controlar el pozo. La densidad está relacionada con la flotabilidad del

fluido, es decir con la fuerza de levantamiento generada por la diferencia entre la densidad de los sólidos y la del fluido, de modo que al aumentar la densidad del fluido aumentan las fuerzas de flotación que actúan sobre los sólidos.

Requerimiento de agua

El agua de mezcla es la cantidad de agua, expresada en galones por saco de mezcla de cemento seco, antes de la adición de los aditivos líquidos. Normalmente se expresa en galones por saco y puede ser tanto agua dulce como agua salada.

Rendimiento

Es el volumen de lechada obtenido al mezclar un saco de cemento con la cantidad deseada de agua y otros aditivos. Se suele expresar en m^3/kg o pies cúbicos/saco. En el momento de determinar el volumen de cemento requerido para un trabajo de cemento en particular, se debería usar un registro de caliper.

Reología

Se denomina reología, palabra introducida por Eugene Bingham en 1929, al estudio de la deformación y el fluir de la materia. Una definición más moderna expresa que la reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. Estas características se controlan con el fin de facilitar la mezcla y bombeabilidad y obtener las características deseadas del caudal del fluido. Las propiedades del fluido que definen la reología son:

Viscosidad plástica

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal. En realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad, siendo el modelo de viscosidad nula una aproximación bastante buena para ciertas aplicaciones. La viscosidad sólo se manifiesta en líquidos en movimiento. La unidad para medir la viscosidad se suele usar el centipoise [cP], es más usado debido a que el agua tiene una viscosidad de 1,0020 cP a 20 °C.

Punto cedente

El punto cedente es la propiedad reológica del fluido que atrapa al sólido en condiciones dinámicas. Es el esfuerzo mínimo de corte que debe aplicarse a un fluido para que comience a desplazarse. Cuantos más sólidos contenga una lechada, mayor será la viscosidad plástica. Cuanto mejor sea la dispersión entre las partículas hidratadas de cemento, menor será el punto de cedencia.

Fluido libre

Líquido con color o sin color que se ha separado de la lechada de cemento y contribuye con la contracción de la lechada. La contracción de la lechada puede afectar la adherencia y contribuir con la migración de gas. En condiciones estáticas comienza un proceso de sedimentación de los sólidos por efecto de la gravedad, que deja un porcentaje de líquido sobrenadante, el cual será mayor o menor dependiendo de la estabilidad de la lechada.

Sedimentación de sólidos

Una lechada debe tener la capacidad para mantener en suspensión los sólidos que la componen de una forma homogénea en toda su longitud formada. Representa la estabilidad de la lechada bajo condiciones de presión y temperatura una vez que está colocada en el espacio anular. Es crítico en pozos horizontales y desviados y en diseños de lechadas para control de migración de gas.

Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitirle un fluido que lo atraviese. Se afirma que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado, e impermeable si la cantidad de fluido es despreciable.

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos:

- a) La porosidad del material
- b) La densidad del fluido considerado
- c) La presión a que está sometido el fluido

Pérdida de fluido

Es la capacidad de una lechada de cemento para mantener o perder una porción de su fase agua como una pérdida de filtrado hacia la formación. Se mide la deshidratación que sufre la lechada durante los trabajos de cementación e inmediatamente después de terminarlos. Una elevada pérdida de filtrado puede resultar en una deshidratación de la lechada, implicando que la lechada presente un fraguado prematuro e impidiendo la colocación del cemento en el anular, además se puede ocasionar daño en la formación productora con el exceso de filtrado.

Tiempo de bombeabilidad

Las pruebas del tiempo de espesamiento sirven para calcular el tiempo que una lechada está en estado líquido en las condiciones de presión y temperatura simuladas del pozo. Los resultados de la prueba se expresan en unidades Bearden de consistencia (Bc). La prueba del tiempo de espesamiento finaliza cuando la lechada de cementación alcanza una consistencia de 100 Bc. No obstante, 80 Bc se considera el valor máximo de consistencia bombeable.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del cemento fraguado indica la capacidad del cemento para no fallar en compresión. El cemento debe ser lo suficientemente resistente para sostener la tubería de revestimiento en el agujero, soportar los choques generados por las operaciones de perforación y disparo, y resistir una presión hidráulica alta sin fracturarse. La prueba de resistencia a la compresión sirve para determinar la resistencia del cemento fraguado en las condiciones del pozo. Determina cuanto tiempo se debe esperar antes de continuar con la perforación o realizar otro servicio en un pozo cementado. Esta propiedad se expresa en libras por pulgada cuadrada (psi).

Resistencia a la adherencia

Una lechada de cemento debe presentar una excelente adherencia en todo el espacio anular una vez que es colocada allí. La adherencia de un cemento se define como la resistencia a la tracción que ejerce dicho cemento a la acción de

una fuerza continua y directa. Existen diversas razones que provocan el deterioro de la adherencia del cemento; por ejemplo, la exposición a condiciones adversas de temperatura, presión y eventualmente aguas sulfatadas. Esto ocurre con mayor frecuencia si se han producido problemas durante la cementación primaria, como zonas de baja presión, migración de gas, o diseño deficiente de caños lavadores y espaciadores.

Tiempo de transición

El Tiempo de Transición, es el que necesita la lechada para pasar de ser un semilíquido a un sólido. De ahí la expresión de Transición; pasar de un estado a otro; y este sí está delimitado por dos valores: 100 lbf /100 pies² y 500 lbf /100 pies². Una lechada no puede ser considerada como un líquido, es un semilíquido, por los sólidos que contiene. Imaginemos una columna de una lechada de cemento dentro de un pozo; originalmente esa columna ejercerá cierta presión hidrostática hacia abajo y hacia los lados. A medida que esa columna vaya adquiriendo consistencia, la presión hidrostática irá disminuyendo hasta llegar a cero psi. Bien, al tiempo transcurrido entre que inicia el fraguado de la lechada, 100 lbf /100 pies² y alcanza los 500 lbf /100 pies², se le conoce como Tiempo de Transición.

A las 100 lbf /100 pies², la lechada inicia a perder presión hidrostática, y al alcanzar las 500 lbf /100 pies² esa presión hidrostática será igual a cero psi. Evidentemente, durante este tiempo, se presenta el fenómeno de desarrollo de gel por efecto mismo de hidratación del cemento hasta llegar al fraguado inicial del mismo que en este caso es de 500 lbf /100 pies². El tiempo de fraguado final puede llegar a convertirse en infinito: el cemento permanentemente seguirá incrementando su resistencia compresiva aunque de manera por demás imperceptible.

Para efectos de la realización de este trabajo especial de grado, se enfoca en la utilización del aditivo extendedor LITECEM[®], en cual hace reducir la densidad el sistema cementante a 11 lpg, donde el mismo por su porcentaje de peso con respecto al cemento y por su tamaño de partícula se procede al estudio de surfactantes como agentes dispersante del aditivo extendedor.

2.4 LITECEM®

Es un aditivo extendedor empleado en la preparación de lechadas de cemento de baja densidad, el cual consiste en un polímero capaz de atrapar un gas inerte en su interior. Su uso permite disminuir la presión hidrostática transmitida por la columna de cemento en el pozo.

El principio básico que sustenta el desarrollo de la tecnología LITECEM® esta basado en el uso de un aditivo polimérico expandido de bajo peso utilizado como agente reductor de la densidad de la lechada de cemento; las especificaciones técnicas de las partículas se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas del LITECEM®, [Protocolo de aplicación del producto tecnológico LITECEM®, 2006]

Gravedad específica	0,48
Densidad aparente	300 kg/m ³
Diámetro de partícula	300µm

El polímero (vinil) es sometido a un proceso de expansión controlado para lograr la obtención de microesferas de vinil con una estructura celular en su interior, lo cual produce una reducción en la densidad de las esferas por el hecho de aumentar su volumen. La estabilidad mecánica de las partículas expandidas esta determinada por el espesor de la pared de la microesfera que depende del espumado y consecuentemente de la densidad final de las mismas. Para las aplicaciones de cementos se debe controlar de manera rigurosa la expansión del material, para esto se requiere una densidad muy superior a la normal utilizada en otras aplicaciones del poliestireno debido a que para el diseño de lechadas es un requisito que el aditivo tenga adecuada resistencia a la compresión para poder soportar la presión hidrostática ejercida por la columna de cemento en el pozo.

La impermeabilidad es un requisito básico para las aplicaciones en el cemento, ya que la penetración de la fase líquida de la lechada u otro fluido dentro de la esfera ocasiona el aumento de su densidad, este efecto disminuye el poder reductor de la densidad; en la figura 2.3 presenta una fotomicrografía del poliestireno expandido,

donde se observa un tamaño uniforme de las partículas y la ausencia de porosidad superficial lo cual garantiza la impermeabilidad del material.

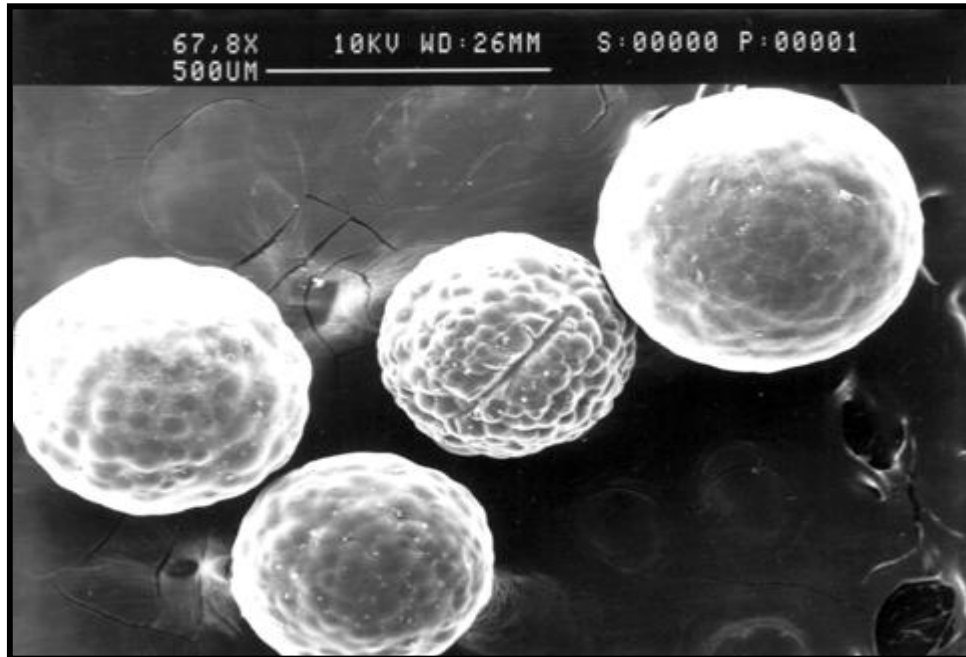


Figura 2.3: Fotomicrografía del poliestireno expandido. [Medina, 1997]

La densidad de la lechada puede aumentar por efecto de la presión hidrostática que ejerce la columna de fluidos en el pozo, en este caso las lechadas de baja densidad, tiene un incremento de densidad que se encuentra asociado a la ruptura o colapso de las esferas huecas por efecto de la presión con lo cual pierde de manera parcial o total la capacidad de reducción de densidad.

2.5 SURFACTANTES

Salager (2002), dice que un surfactante es una sustancia química que se caracteriza por tener en su estructura molecular un grupo polar y un grupo no polar, dichas moléculas pertenecen a la familia de sustancias anfífilas, es decir, una sustancia química cuya molécula posee una parte de su estructura que es muy afín por un tipo de solvente (parte liofílica) junto con otra parte que no es afín o posee poca atracción por dicho solvente (parte liofóbica). Si el solvente es agua estos grupos se conocen como parte hidrofílica y parte hidrofóbica, respectivamente.

Los surfactantes son los productos más versátiles de la industria química, estos se encuentran presentes en una variedad significativa de productos, tales como: aceites lubricantes y combustibles empleados en vehículos, productos farmacéuticos, detergentes utilizados en la limpieza del hogar y la ropa, así como en múltiples productos de aseo y cuidado personal, en fluidos de perforación y otras operaciones relacionadas con la industria petrolera.

El grupo polar es en general un grupo funcional que contiene heteroátomos como O, S, N o P; los grupos polares más comunes son: carboxilato, sulfonato, sulfato, amonio y fosfato. Los grupos hidroxilo y éter deben tener un cierto orden de multiplicidad dentro de la molécula para producir un efecto como grupo polar apropiado (poliol, poliéter). El grupo apolar es una cadena hidrocarbonada de tipo alquilo o alquil-arilo con típicamente 12 a 20 átomos de carbonos. En la figura 2.9 se muestra la estructura molecular de algunos surfactantes comunes.

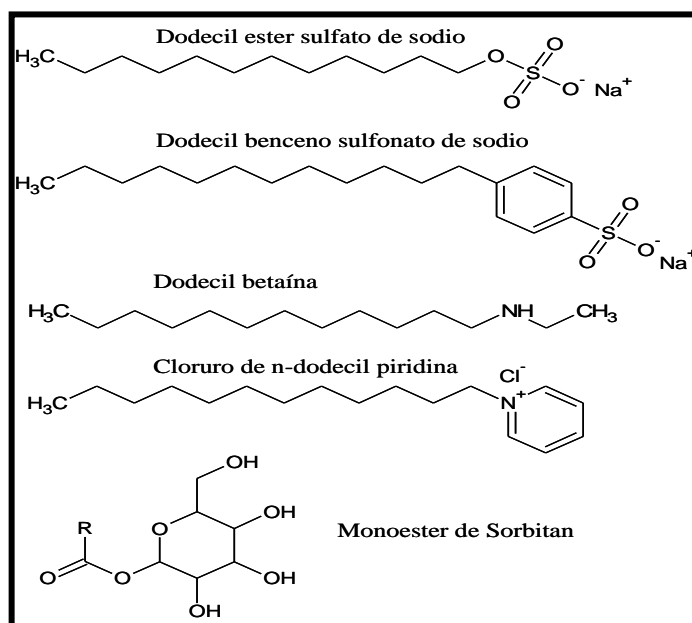


Figura 2.4: Estructura química de algunos surfactantes comunes

2.5.1 Clasificación de los Surfactantes

Para Salager (2002), los surfactantes se clasifican de acuerdo a su ionización en medio acuoso y se pueden dividir en cuatro grandes grupos.

Surfactantes aniónicos

Son aquellos que disocian en un ión surfactante cargado negativamente (anión) y un catión metálico.

Surfactantes catiónicos

Son aquellos que disocian en un ión surfactante cargado positivamente (catión).

Surfactantes no-iónicos

Estos surfactantes no producen iones cuando se encuentran en solución acuosa. Los grupos polares que lo conforman son del tipo polialcohol o poliéter (poli-óxido de etileno o de propileno).

Surfactantes anfóteros

Estos surfactantes poseen en su estructura disociada en agua tanto carga positiva como carga negativa.

2.5.2 Aplicaciones de los Surfactantes en los Procesos Industriales

Las propiedades de los surfactantes los convierten, tal vez, en las sustancias químicas más versátiles que existen en la industria química, ellos son parte fundamental de los detergentes y la mayoría de los productos de higiene personal; productos que son de alto consumo mundial, por otra parte constituyen el componente esencial de un gran número de productos farmacéuticos y son los aditivos estabilizantes de numerosos productos alimenticios de consumo masivo. Sus aplicaciones también tienen cabida en la industria petrolera, Rivas y Gutiérrez (1999), dicen que los surfactantes son parte fundamental en las operaciones de perforación, completación y estimulación de pozos. En la siguiente lista se muestran algunas aplicaciones de los surfactantes:

- a) Los surfactantes se usan en la limpieza y desinfección.
- b) En la formación de dispersiones (pinturas, lodos de perforación, emulsiones, microemulsiones y espumas).
- c) En la producción y uso de pesticidas importantes en la agroindustria.

- d) En la industria petrolera (perforación, recuperación mejorada, daños a la formación, deshidratación y desalación de crudos, transporte de crudos pesados, operaciones de refinación, entre otras.
- e) En procesos de polimerización en solución.
- f) En el tratamiento de aguas residuales.
- g) Como aditivos para lubricantes e inhibidores de corrosión.
- h) En la separación de minerales por flotación.
- i) En la producción de pulpa, papel y tintas.

2.5.3 Propiedades de las Soluciones Acuosas de Surfactantes

Entre las características físico-químicas de los surfactantes resaltan dos propiedades fundamentales:

- a) Los surfactantes son capaces de ubicarse en una interfase debido a un fenómeno de adsorción.
- b) Son capaces de formar en solución estructuras moleculares de asociación llamadas micelas.

Adsorción de surfactantes en interfases

Una característica fundamental de los surfactantes es su tendencia a adsorberse en interfases con una orientación definida. Este fenómeno ha sido estudiado con el fin de determinar la concentración de surfactante en la interfase, debido a que su medición permite saber qué tanto ha sido cubierta la misma por el surfactante; la eficiencia de los surfactantes en muchos procesos interfaciales tales como espumabilidad, detergencia, emulsificación depende en gran medida de su concentración interfacial, por otra parte se estudia la orientación y el empaquetamiento del surfactante en la superficie, ya que esto determina qué tanto será afectada la misma por la adsorción e indica si se volverá más hidrofílica o más hidrofóbica, Rosen (2004).

Cuando una molécula de surfactante se ubica de forma orientada en una interfase o superficie, se dice que se adsorbe. Este es un fenómeno espontáneo impulsado por la disminución de la energía libre del surfactante al ubicarse en la superficie y

satisfacer parcial o totalmente su doble afinidad. Cuando un surfactante se disuelve en agua, se produce una adsorción de las moléculas de surfactante en la superficie del agua, obteniendo como resultado una disminución de la tensión superficial del sistema que implica una disminución de la energía libre superficial.

En presencia de una interfase entre un sólido y un líquido, la polaridad relativa del sólido y del líquido puede inducir al surfactante a adsorberse por la parte polar o por la parte apolar. Existen casos donde dos fases inmiscibles, tales como aceite y agua se encuentra en contacto con un sólido, en este caso la presencia de un surfactante en el sistema puede modificar las energías interfaciales; líquido-líquido o líquido-sólido provocando un fenómeno que se manifiesta como un cambio en los ángulos de contacto o en la mojabilidad de un líquido u otro por el sólido, Rosen (2004).

Asociación de moléculas de surfactantes en solución. Concentración micelar crítica

Otra propiedad de los surfactantes en solución acuosa es su capacidad de auto asociación. A partir de cierta concentración, conocida como concentración micelar crítica (CMC), los surfactantes son capaces de formar agregados moleculares de tamaño coloidal.

Para quintero (2011), este fenómeno es conocido como micelización, el cual es responsable de fenómenos interfaciales tales como la detergencia y la solubilización micelar. La concentración micelar crítica es la concentración de surfactante en medio acuoso a partir de la cual se forman los agregados moleculares conocidos como micelas. Las micelas generalmente presentan forma esférica y contienen varias decenas de moléculas orientadas de tal forma que sus cabezas polares estén hacia la fase acuosa mientras que las cadenas hidrofóbicas se ubican en el interior de la estructura, alejadas del agua. En esta concentración se presentan cambios bruscos en todas las propiedades de la solución, tales como: detergencia, conductividad, presión Osmótica, tensión interfacial.

Las características relacionadas con la concentración micelar crítica se mencionan a continuación:

- a) Una vez alcanzada la CMC, toda cantidad adicional de surfactante se incorporará dentro de las micelas, manteniendo la concentración de surfactante no-asociado en la interfase prácticamente constante; hay que destacar que el equilibrio que se establece entre las moléculas de surfactantes no asociado y las micelas es de tipo dinámico, es decir, existe un intercambio permanente de moléculas entre las micelas y la fase continua con una frecuencia del orden de 10^{-6} seg⁻¹.
- b) La dimensión de las micelas y el número de moléculas por micelas o número de agregación, depende del tipo de surfactante y del ambiente físico-químico (concentración de electrolito, alcohol, temperatura).
- c) Concentraciones de un surfactante puro superiores a la CMC, no cambian la actividad superficial o interfacial. Sin embargo, la magnitud de los fenómenos de solubilización micelar varían considerablemente con la cantidad de micelas.
- d) A concentraciones menores que la CMC las propiedades termodinámicas de las soluciones de surfactante (presión osmótica, descenso crioscópico, etc.) siguen leyes ideales o regulares del mismo tipo que aquellas de las soluciones que contienen un soluto de gran dimensión molecular. En contra parte, por encima de la CMC las soluciones presentan un comportamiento fuertemente no-ideal.

2.5.4 Adsorción de surfactantes sobre superficies sólidas

La adsorción de surfactantes es un proceso de transferencia de moléculas de surfactantes de la fase de la solución a la superficie/ interface. La adsorción de estos compuestos en la interfase sólido-líquido juega un papel importante en muchas aplicaciones tecnológicas e industriales, tales como la detergencia, flotación de minerales, la dispersión de los sólidos y la recuperación de petróleo. Se ha avanzado mucho en la comprensión del comportamiento de adsorción / desorción de los surfactantes individuales en los sólidos. Muchos estudios cubren

el comportamiento interfacial sólido / líquido de surfactantes, porque es importante para la comprensión teórica y aplicaciones prácticas de los mismos. La adsorción de surfactante en una interfase sólido-líquido está fuertemente influenciada por varios factores:

- a) La naturaleza y la estructura de los grupos en la superficie sólida, tales como: la densidad y la carga de adsorción en la superficie heterogénea del sólido.
- b) La estructura molecular de la cabeza de los surfactantes hidrófilos (iónico, no iónico) y el grupo hidrófobico (longitud de la cadena alifática o aromática).
- c) Las características de la solución acuosa (pH, temperatura, presencia de electrolitos, entre otras.)

Todos estos factores determinan el mecanismo por el cual se produce la adsorción y de su eficacia. Los mecanismos que promueven la adsorción del surfactante en solución en una interfase líquido-sólido o líquido-líquido incluido:

El intercambio iónico: el desplazamiento de los iones en la superficie por los iones del surfactantes. Esto se aplica, por ejemplo, para la adsorción de iones de amonio cuaternario que desplazan los iones de hidrógeno en la superficie en el proceso de protección contra la corrosión.

El enlace de hidrógeno: Es el proceso de enlace polar entre el átomo de hidrógeno en los surfactantes y un átomo cargado negativamente (O, N) en la superficie. Los enlaces de hidrógeno entre los surfactantes y la superficie de las especies minerales han sido propuestos para un número de sistemas, con especial participación de surfactantes que contienen grupos hidroxilo, fenólicos, carboxílicos y aminas.

Apareamiento iónico: La adsorción de los surfactantes iónicos en los sitios no cargadas. Un ejemplo es la adsorción de los surfactantes catiónicos o anfóteros en los sitios de carga negativa.

Fuerzas de adsorción (Londres - Van der Waals): Estas fuerzas se producen entre los sustratos y las moléculas no polares, y también las fuerzas de cohesión de los líquidos, a menudo llamada fuerzas de dispersión. La frecuencia de oscilación de los electrones, que es responsable de estas fuerzas, está relacionada con el índice de refracción del medio.

Interacción lateral hidrofóbica: Se produce cuando el empaquetamiento de las moléculas de surfactante en la interfase provoca una interacción entre las moléculas vecinas cola lipófilos, permitiendo que las moléculas de migrar fuera del ambiente acuoso.

Debido a la polarización de electrones π : Esto ocurre cuando hay una atracción entre un núcleo aromático y el sitio positivo sobre la superficie del sustrato.

En conclusión, la atracción o interacción mutua entre adsorbato y adsorbente, que es responsable de adsorción depende, de la naturaleza de las fuerzas implicadas, esto puede ser fuerzas químicas (covalentes o electrovalente) llamado quimisorción, o físico (Van der Waals), conocidas como adsorción física o fisorción. Esta última está controlada por el pH de la solución con la adsorción de iones inorgánicos.

2.5.5 Adsorción y mojabilidad en superficies sólidas

La mojabilidad se define como el desplazamiento de un fluido (gas o líquido) en una superficie por otro fluido. Los fenómenos de la humectabilidad son muy importantes, por ejemplo, la adsorción de surfactante sobre un sólido es responsable de los cambios en la mojabilidad de la superficie sólida. La superficie sólida puede ser hidrófilo (alta energía) o hidrófobico (de baja energía), y también puede haber grupos cargados, (sitio positivo o negativo), además, las condiciones del surfactante se puede cambiar variando la pH o la temperatura.

La caracterización de la adsorción de surfactante en una interfase sólido-líquido es más difícil que en la interfase aire-agua por dos razones: primero, la tensión interfacial sólido-líquido no puede medirse directamente y, segundo, la relación entre la tensión interfacial y la concentración de exceso superficial no es simple.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

En éste capítulo se presentan los aspectos relacionados a la metodología utilizada durante la elaboración de este trabajo, como lo son el tipo y diseño de investigación, variables, característica de la población y muestra, técnicas e instrumentos de la investigación, técnicas para el análisis de datos y finalizando con la operacionalización de los objetivos. Como resultado, este capítulo se destinará a establecer de manera concreta la manera como se va a desarrollar el presente trabajo.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se plantea en este trabajo es de tipo proyectiva, ya que propone describir y comprender las relaciones significativas entre las variables (Balestrini, 2006). Esta investigación se dirige a estudiar las propiedades interfaciales de las soluciones acuosas de surfactantes a distintas concentraciones, para continuar su evaluación en presencia de cemento, así como realizar los distintos ensayos del sistema LITECEM[®], y verificar si los surfactantes pueden mejorar la dispersión de las esferas de poliestireno.

3.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Balestrini (2006), reseña que el diseño de investigación es un plan global que integra de modo coherente las técnicas de análisis previstos y objetivos. El diseño alude a las decisiones que se toman en cuanto al proceso de recolección de datos, que permite al investigador la validación interna del trabajo realizado.

La investigación propuesta es de tipo experimental, ya que en esencia, un experimento consiste en someter el objeto de estudio a la influencia de ciertas

variables, en condiciones controladas y conocidas por el investigador, para observar los resultados que cada variable produce en el objeto (Sabino, 2007). En esta investigación se manipuló las concentraciones de los surfactantes A, B y C, evaluando el efecto de la dispersión de las esferas poliméricas en los sistemas LITECEM[®].

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

Se entiende por población cualquier conjunto de elementos de los que se quiere conocer o investigar alguna o algunas de sus características (Inchausti, 1979), y la muestra es, en esencia, un subgrupo de la población, digamos que es un subconjunto de elementos que pertenecen a ese conjunto definido en sus características al que llamamos población (Hernández, 1994).

Se tiene que la población para esta investigación son todos aquellos sistemas cementantes y surfactantes en general, teniendo como muestra lechadas de baja densidad de tipo sistema LITECEM[®] y tres surfactantes de diferentes estructuras químicas: aniónico/no-iónico basado en sulfato; aniónico/no-iónico basado en fosfato y un catiónico basado en aminas.

3.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Con la intención de dar respuestas a los objetivos planteados en esta investigación se utilizan técnicas experimentales que emplean una serie de instrumentos de laboratorio para alcanzar las mediciones de tensión superficial, mojabilidad, densidad, reología, pérdida de filtrado, fluido libre, estabilidad, permeabilidad al agua, tiempo de bombeabilidad y resistencia a la compresión.

3.4.1 Revisión Bibliográfica

Se fundamenta en realizar un estudio documental en informes, trabajos de investigación, libros, artículos, cuadernos técnicos y manuales enfocándose en cementación, sistemas cementantes de baja densidad, surfactantes, bases, polímeros y fenómenos interfaciales, con la finalidad de reforzar los conocimientos relacionados con el trabajo especial de grado..

3.4.2 Observación

La observación directa es una técnica que consiste en el uso sistemático de nuestros sentidos orientados a la captación de la realidad que queremos estudiar (Sabino, 2007). Esta puede ser científica cuando el uso de nuestros sentidos se enfoca en la búsqueda de datos que se necesitan para resolver un problema de investigación, por lo que inicialmente se analizan los datos que se puedan recolectar efectuando observaciones directas de tipo científica a los experimentos realizados de manera cualitativa y cuantitativa con el propósito de captar los aspectos más significativos ocurridos durante los ensayos para evaluar los efectos de las variables en estudio.

3.4.3 Gráficas

Es un agregado de datos numéricos que se plasma para representar el comportamiento de un proceso y facilitar su análisis; se realizan utilizando recursos como puntos, líneas, vectores, superficies; para dicha investigación se emplean gráficos lineales, donde se representan los valores en dos ejes cartesianos, ortogonales entre sí. Este tipo de gráficas nos permite representar distintas evaluaciones de ensayos en un mismo diagrama, permitiendo observar diferentes tendencias que puedan existir.

3.4.4 Ensayos de Laboratorio

Se define como una serie de procedimientos sistemáticos que arrojan resultados cuantitativos. Para esta investigación se realizaron diez ensayos, los dos primeros en el laboratorio de fenómenos interfaciales y el resto en el laboratorio de cementación, los cuales son:

- Ensayo de tensión interfacial.
- Ensayo de acenso capilar.
- Ensayo de densidad.
- Ensayo de reología.
- Ensayo fluido libre.
- Ensayo de pérdida de filtrado.
- Ensayo de permeabilidad al agua.

- Ensayo de resistencia a la compresión.
- Ensayo de estabilidad.
- Ensayo de tiempo de bombeabilidad.

3.4.5 Instrumentos recolección de información

Son aquellos que suministran la información necesaria para sustentar los resultados obtenidos. Entre ellos podemos encontrar:

Instrumentos de medición

Para alcanzar los objetivos planteados se utilizó una serie de equipos e instrumentos, entre los cuales se encuentran:

Balanza electrónica

Utilizada para pesar los aditivos del cemento según su formulación. La carga indicada en las balanzas debe ser precisa con un error de ± 0.1 por ciento de la carga indicada.

Mezcladora

La mezcladora utilizada para la preparación de las lechadas de cemento posee un volumen aproximado de un cuarto de galón, consta de una cuchilla tipo mezclador y una unidad inferior. El recipiente para el mezclado y la cuchilla son de un material resistente a la corrosión. El ensamblaje del mezclador está diseñado para que la cuchilla pueda separarse de la unidad del mecanismo mezclador.

Este equipo posee dos modalidades de velocidad: la primera es automática, la cual opera a dos velocidades que simulan el mezclado y homogenización de la lechada de cemento, 4000 ± 200 rpm y 12000 ± 500 rpm respectivamente, y la segunda es una perilla que regula la velocidad para el mezclado de las lechada que requieran velocidades menores debido a que pueden contener aditivos que colapsen durante el mezclado de la misma, como se observa en la figura 3.1.

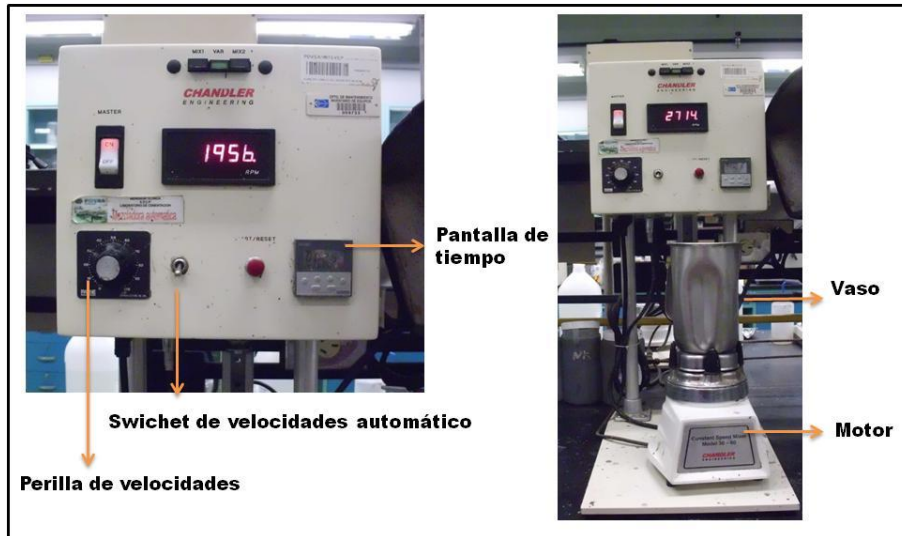


Figura 3.1: Equipo para el mezclado de los sistemas cementantes, [Hernández, 2012]

Balanza para densidad de fluidos presurizada

Este equipo consta de una copa de volumen fijo, en el cual se introduce la muestra de lechada de cemento y se estima la densidad que posee, hasta equilibrar la copa. En ese instante se lee directamente el valor de la densidad en [lb/gal].

En esta balanza la muestra de la lechada de cemento es colocada bajo presión en una copa de volumen fijo, con la finalidad de minimizar el efecto del aire entrampado en las mediciones de la densidad como se observa en la figura 3.2, de manera tal que es posible obtener una medición de la densidad igual a la que se obtendría bajo las condiciones de fondo de pozo.

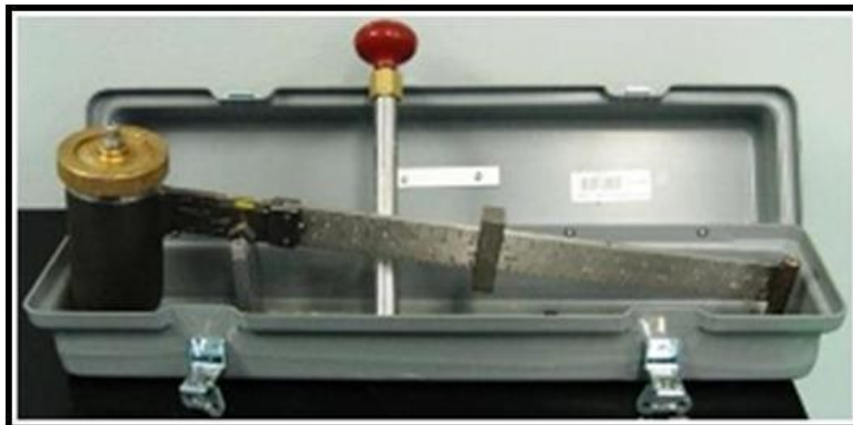


Figura 3.2: Equipo para medir la densidad, balanza presurizada, [Hernández, 2012]

Consistómetro presurizado

Utilizado para predecir el tiempo en que la lechada de cemento es bombeable dentro del pozo a presión y temperaturas simuladas como se observa en la figura 3.3, según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B.

El equipo consiste básicamente en un recipiente cilíndrico rotatorio para la lechada de cemento, el cual posee un ensamblaje de paleta fija. Todos los elementos están contenidos en un recipiente capaz de resistir las presiones y temperaturas del pozo. El espacio entre el recipiente de la lechada de cemento y las paredes del recipiente de presión es llenado con un aceite de hidrocarburo. El aceite seleccionado debe tener las siguientes propiedades físicas:

Viscosidad: 49-350 SSU @ 100 °F

Calor específico: 0.5-0.58 Btu/lb \times °F

Conductividad térmica: 0.0685-0.0770 Btu/h \times ft² \times (°F/ft)

Gravedad específica: 0.85-0.91

También se cuenta con un elemento de calentamiento capaz de elevar la temperatura de baño de aceite a la tasa de al menos 5°F por minuto. El recipiente para la lechada de cemento gira a una velocidad de 150 \pm 15 rpm. La paleta y todas las partes del recipiente de la lechada de cemento, expuestas a la misma, son fabricadas con materiales anti-corrosivos.



Figura 3.3: Equipo Consistómetro presurizado, [Hernández, 2012]

Cámara de curado presurizada

Utilizada para llevar la lechada a condiciones del pozo, presión y temperatura, con la finalidad de determinar posteriormente la resistencia a la compresión, la permeabilidad y la sedimentación así como la estabilidad de la muestra estudiada. El equipo se puede observar en la figura 3.4.

La lechada de cemento es colocada en moldes ya preparados, los cuales se introducirán en el recipiente de curado presurizado a la temperatura deseada para iniciar la prueba. Se aplica calor y presión (3000psi máximo) de acuerdo al programa de la prueba y se deja la muestra por un lapso de veinticuatro horas.



Figura 3.4: Equipo cámara de curado, [Hernández, 2012]

Prensa mecánica

Utilizada para determinar la resistencia a la compresión de la muestra de cemento. El ensayo realizado en el equipo es destructivo, como se observa en la figura 3.5. En el equipo se puede desarrollar pruebas de tensión, compresión e inflexión sobre materiales metálicos.

El sistema de carga hidráulica de la máquina posee un amplio rango de control el cual permite ajustar la velocidad y la carga aplicada a la misma. La carga aplicada a un espécimen es detectada como un cambio en la presión de aceite dentro del cilindro, y es convertida en una señal de voltaje por una celda de presión de alta precisión y un amplificador de alto desempeño. Esta señal analógica es convertida luego en una señal digital, la cual es mostrada en pantalla en unidades de toneladas-fuerza. El método de evaluación se denomina Tensite and compresion a una velocidad de viaje del bloque para la carga es de 1mm/min y la velocidad de carga es de 2,8 kgf/mm²/s a presión atmosférica.



Figura 3.5: Equipo prensa mecánica, [Hernández, 2012]

Consistómetro atmosférico

Empleado para acondicionar la lechada a la temperatura circulante de pozo, a la cual se le determinará posteriormente la reología, pérdida de fluido y el fluido libre.

Este equipo consiste en un baño de agua, en el cual se pueden introducir dos contenedores con lechada de cemento, como se puede observar en la figura 3.6. Así mismo posee un controlador de temperatura el cual funciona también como un

indicador de temperatura digital. La velocidad del motor viene colocada de fábrica a 150 rpm pero posee un control de velocidad variable el cual permite ajustar el valor de la misma. Las unidades de consistencia de la lechada del cemento son indicadas directamente sobre el marcador que se encuentra en la tapa del tope de cada uno de los contenedores.



Figura 3.6: Equipo para acondicionar los sistemas cementante, [Hernández, 2012]

Viscosímetro

Con este tipo de viscosímetro la lechada de cemento es confinada entre dos cilindros concéntricos de radio R_1 y R_2 ($R_1 > R_2$), en uno de los cuales, el rotor, está rotando a una velocidad rotacional constante. La rotación del rotor en presencia de la muestra produce un torque, el cual es generalmente medido en el interior del cilindro. El radio del cilindro debe ser tal que la muestra esté homogénea y que el esfuerzo de corte sea tan uniforme como sea posible. Los valores obtenidos de velocidad rotacional y torque son convertidos a tasa de corte y esfuerzo de corte empleando correlaciones adecuadas, con la finalidad de seleccionar el modelo reológico más adecuado (plástico de Bingham o Ley de Potencia). Esto se logra graficando la tasa de corte vs. el esfuerzo de corte y se

elige el modelo con el mejor coeficiente de ajuste. El equipo se observa en la figura 3.7.



Figura 3.7: Equipo para medir la reología, Viscosímetro, [Hernández, 2012]

a) Modelo reológico Plástico de Bingham

Este modelo describe un fluido en el cual se requiere una fuerza finita para iniciar el flujo (punto cedente) y que luego demuestra una viscosidad constante cuando la velocidad de corte aumenta (viscosidad plástica). La ecuación para el modelo de Flujo Plástico de Bingham es la siguiente:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \gamma \quad 3.1$$

Donde:

τ = esfuerzo de corte [$\text{lb}/100\text{ft}^2$]

τ_0 = esfuerzo de corte a una velocidad de cero [$\text{lb}/100\text{ft}^2$]

μ_p = viscosidad plástica [cp]

γ = velocidad de corte [$1/\text{s}$]

$$\mu_p = C \frac{\tau_2 - \tau_1}{\gamma_2 - \gamma_1} \quad 3.2$$

Donde:

μ_p = viscosidad plástica [cp]

C = factor de conversión [c= 478,8]

τ_2 = esfuerzo de corte a una velocidad 300 rpm[lb/100ft²]

τ_1 = esfuerzo de corte a una velocidad 1 rpm [lb/100ft²]

γ_2 = velocidad de corte mayor [1/s]

γ_1 = velocidad de corte menor [1/s]

b) Modelo reológico ley de potencia

Este modelo describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte aumenta según la velocidad de corte elevada matemáticamente a una potencia determinada. Matemáticamente, el modelo de Ley de potencia se expresa en la ecuación 3.3:

$$\tau = k \gamma^n \quad 3.3$$

Donde:

τ = esfuerzo de corte [lb/100ft²]

k = índice de consistencia [lb s/ ft²]

γ = velocidad de corte [1/s]

n = índice de ley de potencia [adimensional]

$$n = \frac{\log_{10} \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)}{\log_{10} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)} \quad 3.4$$

Donde:

n = índice de ley de potencia [adimensional]

τ_2 = esfuerzo de corte a una velocidad 300 rpm [lb/100ft²]

τ_1 = esfuerzo de corte a una velocidad 1 rpm [lb/100ft²]

γ_2 = velocidad de corte mayor [1/s]

γ_1 = velocidad de corte menor [1/s]

$$k = C \frac{\tau_1}{\gamma_1^n} \quad 3.5$$

Donde:

k = índice de consistencia [lb s/ ft²]

C = factor de conversión [$c = 0,01$]

τ_1 = esfuerzo de corte a una velocidad 1 rpm [lb/100ft²]

n = índice de ley de potencia [adimensional]

γ_1 = velocidad de corte menor [1/s]

Cámara de filtrado

Esta cámara es utilizada para medir la pérdida de filtrado en la lechada de cemento según su formulación y la misma consiste en una celda de filtrado de 250 ml, la cual está diseñada para operar a altas presiones y temperaturas. La misma es presurizada con nitrógeno debido al gran volumen de gas requerido para conducir la prueba.

La temperatura se ajusta por medio de una perilla anexa al termostato. La temperatura de la chaqueta de calentamiento o de la pared se mide insertando una termocupla dentro de la celda como se observa en la figura 3.8. Esta prueba se lleva a cabo introduciendo en la celda la muestra de lechada de cemento, a la cual se le aplica una presión de 1000 psi. En un cilindro graduado se recoge filtrado hasta cumplir 30 min o hasta que la lechada se deshidrate en un tiempo menor al mismo, la cantidad de filtrado se puede calcular mediante la ecuación 3.6.



Figura 3.8: Equipo para la medición de la pérdida de filtrado [Hernández, 2012]

$$P_f = 2 Q \frac{c}{\sqrt{t}} \quad 3.6$$

Donde:

P_f = pérdida de filtrado [cc/min]

Q = volumen del filtrado [cc]

t = tiempo [min]

c = factor de conversión [$c = 5,477$]

Cilindro graduado de 250 ml

Utilizado para estimar el fluido libre en la lechada de cemento según procedimiento descrito en la norma API Spec. 10B. El equipo se puede observar en la figura 3.9.

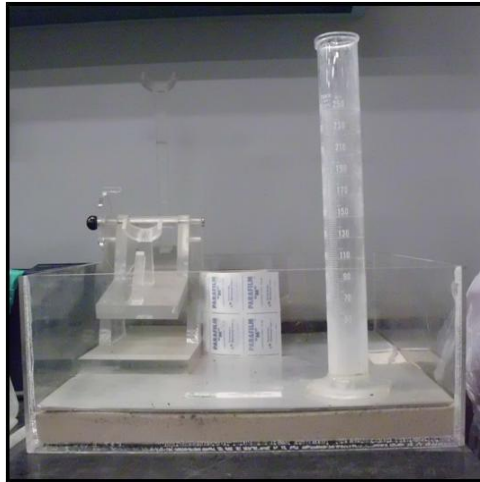


Figura 3.9: Equipo para el montaje del ensayo de fluido libre [Hernández, 2012]

Permeámetro

Este equipo permite medir la permeabilidad de las muestras de cemento que se encuentran confinadas en un anillo de metal que se han curado previamente a la temperatura de fondo de pozo y presión del 3000 psi, donde el mismo hace pasar una presión de agua contante de 60 psi por la muestra. El permeámetro es un aparato que sirve para medir la permeabilidad de los materiales ante el paso de fluidos a través de ellos. Es un método directo de medir el coeficiente de permeabilidad. El equipo se observa en la figura 3.10. La permeabilidad de las muestras se calcula por medio de la ecuación 3.7 denominada ecuación de Darcy.



Figura 3.10: Equipo permeámetro al agua, [Hernández, 2012]

$$k = 14700 \frac{Q \mu L}{A \Delta P} \quad 3.7$$

Donde:

K = permeabilidad [md]

Q = tasa de flujo [ml/s]

μ = viscosidad del fluido [cp]

L = longitud de la muestra [cm]

A = área transversal de la muestra [cm²]

ΔP = diferencial de presión [psi]

Equipo DCAT11

El equipo emplea la técnica del plato de Wilhelmy para determinar la tensión superficial de una solución de surfactante, se emplea para medir el ascenso capilar sobre partículas de materiales sólidos, las tensiones interfaciales. El DCAT11 de DataPhysics posee una balanza electromagnética con una sensibilidad de 10^{-5} g, el software realiza el cálculo de tres mediciones de tensión por segundo, lo que permite obtener la variación de la tensión superficial con el tiempo, después de un

período de tiempo que depende de la concentración de la solución, se obtiene el valor de tensión superficial en equilibrio. La temperatura de la celda es controlada por un baño térmico, que emplea agua como fluido de calentamiento, la temperatura es controlada con una precisión de 0,1 °C.



Figura 3.11: DCAT11 de DataPhysics, método de la Placa de Wilhelmy para la determinación de tensiones superficiales en medio acuoso.

La técnica del Plato de Wilhelmy ver figura 3.11, es un método muy usado para la medición de tensiones superficiales e interfaciales, es muy simple tanto teóricamente como experimentalmente. El método se basa en la medición de la fuerza que ejerce la superficie del líquido sobre una placa de platino-iridio de geometría rectangular conocida, parcialmente sumergida en el líquido, que se encuentra suspendida en una balanza electrónica de precisión.

La balanza mide el peso del menisco que se forma a lo largo del perímetro de la línea de contacto del plato con la solución cuando su lado inferior se encuentra al mismo nivel de la superficie de líquido, el valor de tensión se obtiene a través de la ecuación 3.8.

$$\sigma = \frac{F}{L \cos \theta} \quad 3.8$$

Donde:

σ = Tensión superficial [mN/m]

F = Fuerza [mN]

L = Longitud de la placa [m]

θ = ángulo del menisco, [adimensional]

3.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para lograr la realización de los objetivos planteados en la investigación, la misma fue dividida en distintas fases las cuales se exponen a continuación en la figura 3.12.

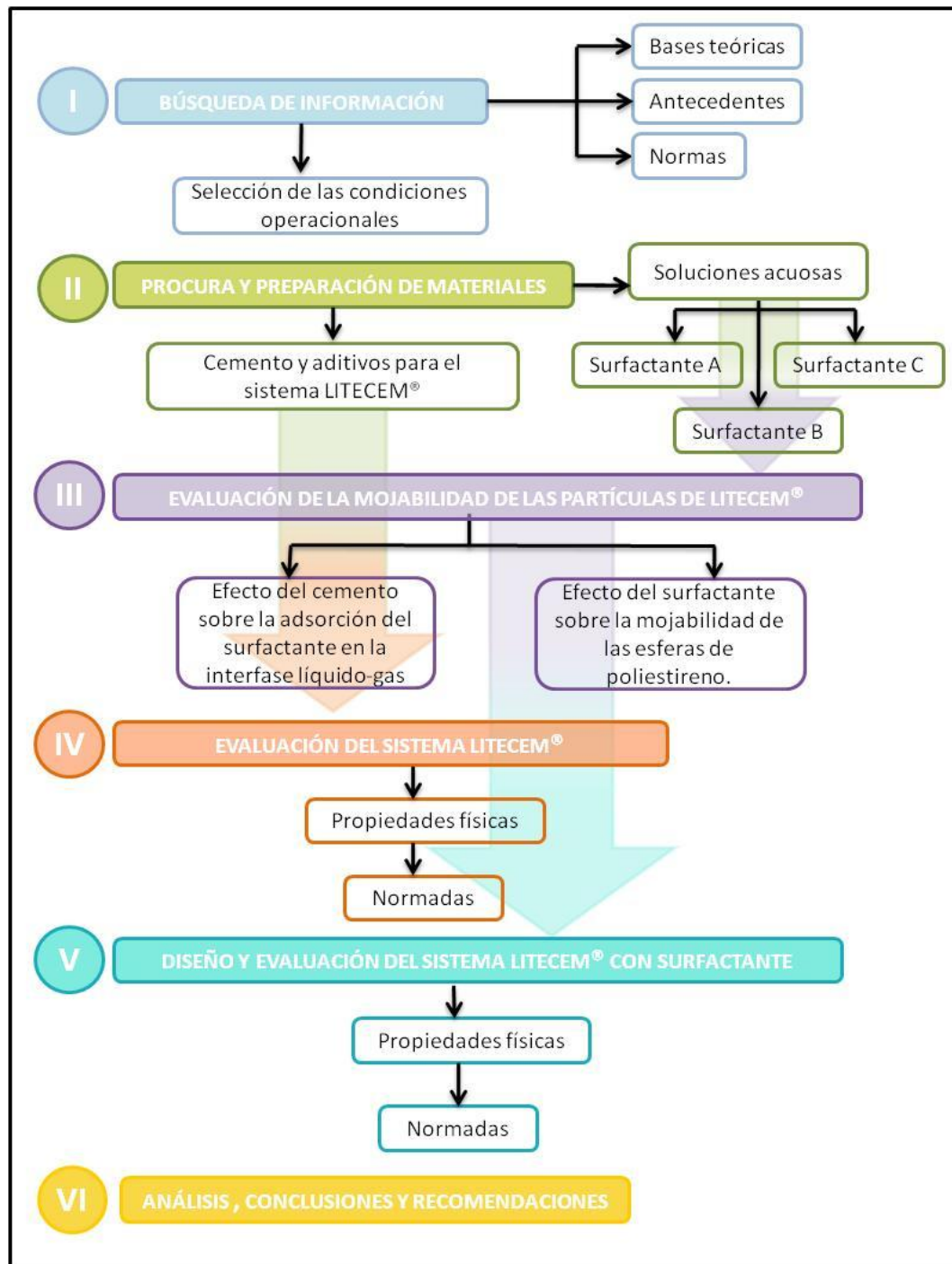


Figura 3.12: Proceso metodológico de la investigación [Hernández, 2012]

Fase I. Búsqueda de información

El desarrollo del objetivo 1 se lleva a cabo en esta fase, para esto se realiza un sumario bibliográfico con la información referente al tema del cual se esta investigando. La revisión bibliográfica, entrevistas y observaciones se utilizan como técnicas de recolección de datos.

En primera instancia se realiza la búsqueda de información requerida para el desarrollo del trabajo, sobre tópicos referentes a la cementación de pozos y surfactantes esto con el fin de familiarizarse con el tema y adquirir los conocimientos necesarios; también es importante la información geológica del área de estudio, esta deberá ser la mas relevante, como: las propiedades de la roca, características litológicas, estratigráficas, ubicación del campo Tía Juana entre otras.

Luego la búsqueda de los antecedentes que mantengan relación entre cementos y surfactantes que sirven como base al estudio que se esta realizando, lo cual permite tomar decisiones en función a trabajos ya realizados. Por último la revisión de las normas que permiten la evaluación de los sistemas cementantes.

Fase II. Procura y preparación de materiales

En primicia se realiza la procura de los aditivos y surfactantes en los distintos laboratorios para la realización de los ensayos, lo cual permite evaluar las distintas propiedades de la lechada, como lo son: densidad, reología, pérdida de filtrado, fluido libre, estabilidad, permeabilidad al agua, tiempo de bombeabilidad, resistencia a la compresión y en el laboratorio de fenómenos interfaciales los ensayos para evaluar: la mojabilidad de las partículas de poliestireno y cemento, efecto del cemento sobre la adsorción del surfactante.

Seguido a esto se realiza el control de calidad del cemento, para saber si el mismo cumple con los requerimientos de la norma para poder realizar los distintos ensayos antes mencionados, los ensayos de control de calidad son: tiempo de bombeabilidad o tiempo de espesamiento, fluido libre y resistencia a la compresión destructivo.

Se tiene que la preparación de la lechada para las distintas clases de cemento, cada una de ellas tiene su requerimiento, en este caso se realizó para cemento clase H lote 174.

Tabla 3.1: Requerimientos para la preparación de la lechada, fuente [FONDONORMA 3866:2005]

Componentes	Masa [g]
Agua de mezcla	$327 \pm 0,5$
Cemento H	$860 \pm 0,5$

Luego de pesar cada uno de los componentes, se procede a realizar la lechada de la siguiente manera:

- ▶ Primero se vierte la cantidad especificada en la tabla 3.1 de agua de mezcla en la mezcladora.
- ▶ Se coloca la mezcladora en la base del motor, la cual se enciende y se coloca a 4000 ± 200 rpm.
- ▶ Se coloca el material seco en la mezcladora en un lapso de 15 segundos, a la velocidad mencionada.
- ▶ Luego de pasados los 15 segundos, se aumenta la velocidad a 12000 ± 500 rpm durante 35 segundos.
- ▶ Se apaga el motor de la mezcladora, donde la lechada ya se encuentra lista para realizar los ensayos pertinentes.

Evaluación del tiempo de espesamiento, de igual manera esta clase de cemento petrolero tiene sus especificaciones para dicho ensayo:

Tabla 3.2: Requerimientos de aceptación en el tiempo de espesamiento, fuente [FONDONORMA 3866:2005]

Clase	Tiempo de espesamiento mínimo [min]	Tiempo de espesamiento máximo [min]
H	90	120

Al tener preparada la mezcla, se procede a verter el fluido en el vaso del consistómetro presurizado previamente engrasado, se le saca el aire entrampado por medio de golpeteos al vaso, se tapa y se coloca en la tabla movable del equipo, se enciende la rotación para así colocar el potenciómetro y se acople con la paleta, para llenar el cilindro del consistómetro, este fluido permite el calentamiento de la lechada. Continuando con el ensamblaje del equipo, el cabezal del cilindro se enrosca al mismo y se coloca la termocupla a través del eje del vaso enroscándolo parcialmente, cuando de llene completamente del fluido de ajusta la misma.

Se sigue con programa del ensayo, el cual debe alcanzar una temperatura de 125 °F en los primeros 30 minutos de la prueba a una presión de 100 psi, durante este tiempo se reporta la mayor consistencia que tiene la lechada la cual no debe ser mayor a 30 Bc, se continua con el ensayo hasta que se alcance una consistencia de de 100 Bc en un lapso de 90 a 120 minutos, donde la prueba ha culminado.

Evaluación del fluido libre, las especificaciones para este ensayo se puede observar en la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Requerimientos de aceptación para porcentaje de fluido libre, fuente [FONDONORMA 3866:2005]

Clase	% Fluido libre
H	$\leq 5,9$

Seguido de tener la mezcla lista, se procede a acondicionar el fluido a una temperatura de 80 °F en el consistómetro atmosférico, en un tiempo de 20 minutos, cuando la lechada se encuentra acondicionada de vierte una masa de 790 ± 5 gramos en un matraz cónico de 500 ml y se sella la boca del mismo con papel parafinado para prevenir la evaporación. Se coloca el matraz en una superficie a nivel y libre de vibraciones, durante 2 horas, luego del transcurrir el tiempo del ensayo se procede a retirar el fluido libre con una pipeta o inyectadora, donde se mide el volumen del mismo y se reporta como ml de fluido libre.

Para obtener el porcentaje de fluido libre se convierte los ml por medio de la ecuación 3.9.

$$\% FL = \frac{FL * dl}{Mi} * 100 \quad 3.9$$

Donde:

%FL = porcentaje de fluido libre [porcentaje]

FL= volumen de fluido libre [ml]

dl= densidad de la lechada [g/cc]

Mi = masa inicial registrada [g]

Al tener el porcentaje de fluido libre se compara con los requerimientos de aceptación.

Evaluación de la resistencia a la compresión destructiva, para los cementos clase H se tiene requerimientos de aceptación para este ensayo que se describe en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Requerimientos de aceptación para la resistencia a la compresión, tiempo de curado 8 horas, fuente [FONDONORMA 3866:2005]

Clase	Resistencia a la compresión [psi], temperatura 100 °F	Resistencia a la compresión [psi], temperatura 140 °F
H	≥ 300	≥ 1500

Luego de tener preparada la mezcla y los moldes previamente engrasados, se vierte el fluido dentro de los mismos, la cual se agita mediante 27 movimientos a lo largo del perímetro de cada compartimiento en forma de cubo utilizando una varilla de agitación, luego se termina de llenar los moldes y se tapan con una placa previamente engrasada, la determinación de este ensayo lo da el montaje de no menos de 3 cubos. Luego de tener listos los cubos se colocan en un baño a una temperatura de 100 °F, el tiempo del ensayo tiene una duración de 8 horas, el cual

comienza a transcurrir al colocarlos en el baño. Este mismo procedimiento se repite para una temperatura de 140 °F.

Luego de transcurrido el tiempo del ensayo, se enfrían y se hace el desmontaje de los cubos, se miden las aristas del cubo donde las caras sean paralelas, esta medición se realiza con un vernier electrónico, para obtener el área de dicha cara, ya que es un dato que requiere el software de la prensa. Para tener el valor de la resistencia a la compresión se enciende el computador y la prensa, para el computador se abre el software y se llenan los datos de entrada, se elige el método y colocamos los datos del cubo, el mismo cubo se coloca en la prensa y se empieza el ensayo, así sucesivamente para cada cubo luego se imprimen los valores para culminar con el ensayo.

Luego de terminar con los ensayos de control de calidad del cemento clase H, se procede a realizar las soluciones acuosas de los surfactantes A, B y C, a las concentraciones de 2, 3 y 4% que equivalen a 0,8; 1,2 y 1,6 gal/sx en el balance de masa que se realiza para obtener el diseño de la lechada.

Preparación de las soluciones acuosas:

La elaboración de las soluciones se describe en el siguiente procedimiento:

Haciendo uso de la ecuación 3.10 se realiza el cálculo correspondiente de la masa de soluto que se agregara a las distintas soluciones.

$$\% \left(\frac{p}{p} \right) = \frac{g \text{ sto.}}{g \text{ sol.}} * 100 \quad 3.10$$

Donde:

% (p/p)= Concentración de la solución [% peso/peso]

g sto= Masa del soluto [gramos]

g sol = Masa de la solución [gramos]

En la tabla 3.5 se observa las masas de soluto para cada una de las concentraciones de las soluciones acuosas de los distintos surfactantes a evaluar.

Tabla 3.5: Propiedades de las soluciones acuosas de surfactantes

Surfactantes	A			B			C		
% Solución	2%	3%	4%	2%	3%	4%	2%	3%	4%
Peso [g]	10	15	20	10	15	20	10	15	20
Volumen [ml]	500			500			500		

Luego de obtener estos valores se procede a pesar los gramos para cada una de las concentraciones de los distintos surfactantes, se procede a disolverlos en un volumen de agua destilada menor al volumen de la solución en un balón aforado de 500 ml, como se puede observar en la figura 3.13.

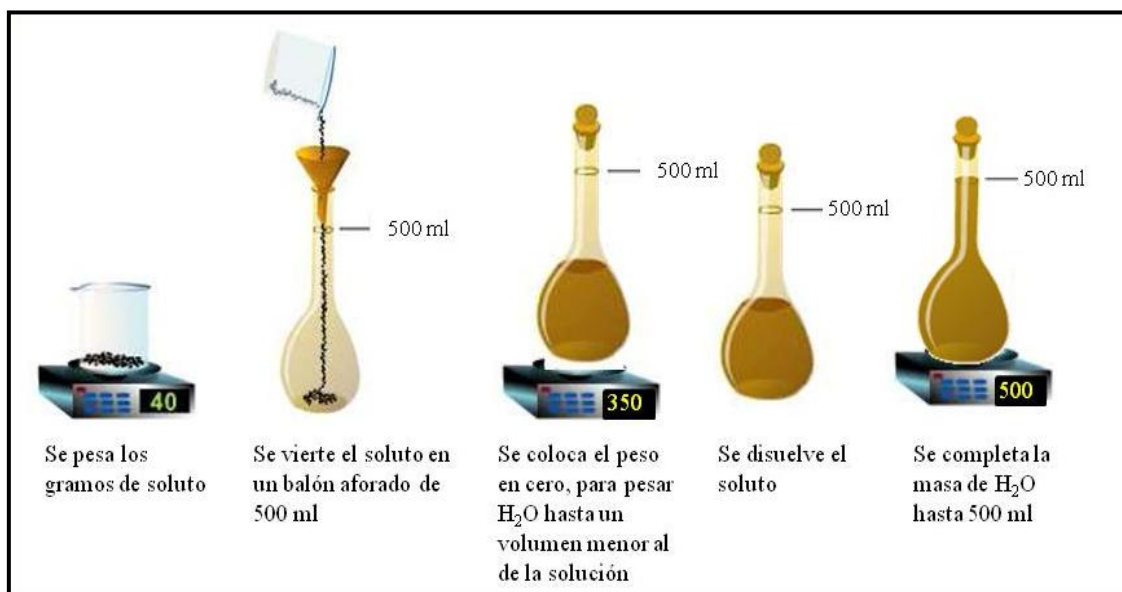


Figura 3.13: Pasos a seguir para la preparación de soluciones, [Hernández, 2012]

Fase III: Evaluación de la mojabilidad de las partículas de LITECEM®

En esta fase se realizan los objetivos 2, 3 y 4, que se llevan acabo en el laboratorio de fenómenos interfaciales, con el fin de obtener él o los surfactantes que

mantengan sus propiedades para su utilización en la lechada de cemento como agente dispersante del LITECEM®.

La evaluación de la adsorción en las interfase líquido-sólido y líquido-gas se realiza por el método de la placa de Wihelmy, donde luego de haber preparado las soluciones acuosas de surfactantes se mide la tensión superficial de las mismas. Para la interfase líquido-gas, se vierte aproximadamente 50 g de la solución en estudio en el recipiente ajustando el pH a 12, luego en el Equipo DCAT11 colocamos el recipiente y se eleva la base del mismo hasta que se encuentre cerca de la placa la cual esta colgada de una balanza electrónica como se observa en la figura 3.14, se inicia el ensayo por medio del computador y una vez finalizado el valor de la tensión que se obtiene se utiliza como dato para calcular el ángulo de contacto. La matriz de ensayo se observa en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Matriz de ensayos para evaluar la adsorción del surfactante en la fase líquido-gas.

Solución acuosa	Concentraciones		
Surfactante A	2%	3%	4%
Surfactante B	2%	3%	4%
Surfactante C	2%	3%	4%
Hexano (líquido de referencia)			



Figura 3.14: Montaje del ensayo de de tensión superficial por el método de la placa de Wihelmy, [Hernández, 2012]

En la interfase líquido-sólido la adsorción se evalúa al igual que el procedimiento anterior, a diferencia que la solución a la cual se le mide la tensión interfacial es a la mezcla de 70 g de la solución acuosa de surfactante a evaluar y 17,5 g de cemento, se colocan en un beaker y se agita durante 30 minutos a 1000 rpm, luego se filtra para que las partículas de cemento no interfieran en la medición de la tensión interfacial como se observa en la figura 3.15, de igual manera este valor se utiliza para comparar la diferencia de la tensión interfacial entre sólido-líquido y líquido-gas; la matriz de ensayos para este procedimiento se observa en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Matriz de ensayos para evaluar la adsorción del surfactante en la fase líquido-sólido.

Solución acuosa	Concentraciones			Mezcla [g]
Surfactante A	2%	3%	4%	70 g de la SAS a las distintas concentraciones + 17,5 g de cemento
Surfactante B	2%	3%	4%	
Surfactante C	2%	3%	4%	



Figura 3.15: Montaje del ensayo para medir la tensión interfacial sólido-líquido, [Hernández, 2012]

Para calcular el ángulo de contacto de las esferas poliméricas y del cemento se requiere emplear la técnica de ascenso capilar para la determinación del mismo haciendo uso de la ecuación de Washburn, Ecuación 3.11, sin embargo, el empleo de esta ecuación requiere que los datos de volumen de líquido penetrado (V_{imb}^2) en función del tiempo muestren una relación lineal. El valor de C se determina como la constante del material el cual se obtiene por la utilización de Hexano como líquido mojante asumiendo un ángulo de contacto igual a cero (0).

$$\frac{V_{imb}^2}{t} = \frac{C\gamma \cos \theta}{2\eta} \quad 3.11$$

Donde:

V_{imb}^2 = volumen de líquido penetrado [ml^2]

t = tiempo [s]

C = constante del material [cm^5]

γ = tensión superficial [mN/m]

θ = ángulo de contacto [$^\circ$]

η = viscosidad [Poise]

Una vez realizado el procedimiento anterior de obtener el valor de la tensión interfacial, se procede a construir los lechos en un contenedor con base porosa, lo que permite que el líquido penetre al lecho, para los ensayos con la esferas poliméricas se vierte en el contenedor una masa de $1,19 \text{ g} \pm 0,01$ de las mismas, esta masa debe ser constante para reproducir lo más real posible los distintos lechos para las soluciones a evaluar.

En principio, se busca calcular el ángulo de contacto con las soluciones acuosas de surfactantes por medio de la técnica de ascenso capilar, primero en el recipiente en el cual se agregó 50 g de solución acuosa como se indicó en el procedimiento anterior para calcular la tensión interfacial, se coloca en la base del equipo y el lecho de las esferas poliméricas se coloca en el lugar de la placa de Wihelmy que se encuentra colgada de la balanza electrónica que posee el equipo DCAT11, se procede a subir la base del equipo hace que se encuentre cerca del lecho, como se observa en la figura 3.16, se inicia la prueba, la misma tiene una duración de 300 s, los resultados que se obtienen en este ensayo es la cantidad de masa de líquido por medio del acenso capilar el cual se debe a la adsorción del surfactante sobre la superficie del sólido, al obtener este valor, la constante del material, la tensión interfacial y la viscosidad se puede calcular el ángulo de contacto del surfactante sobre la superficie de las esferas de poliestireno.



Figura 3.16: Montaje del ensayo para calcular el ángulo de contacto sobre las partículas de LITECEM[®], [Hernández, 2012]

El cálculo del ángulo de contacto de las partículas de cemento se realiza por medio del procedimiento que a continuación se describe, el lecho de cemento se construye con una masa de 4 g en cual debe ser constante para reproducir de la manera más real los lechos, se compactan con pequeños golpes, en el recipiente se agrega una masa de 50 g de solución en estudio, se coloca en la base del equipo y el lecho de cemento se coloca en lugar de la placa de Wihelmy que se encuentra suspendida en la balanza electrónica del equipo DCAT11.

Se sube la base del equipo hasta que se encuentre cerca del lecho de cemento, como se observa en la figura 3.17, se inicia la prueba, la misma tiene una duración de 300 seg, los resultados que se obtienen en este ensayo es la cantidad de masa de líquido por medio del ascenso capilar el cual se debe a la adsorción del surfactante sobre la superficie del sólido, al obtener este valor, la constante del material, la tensión interfacial y la viscosidad se puede calcular el ángulo de contacto sobre las partículas de cemento.



Figura 3.17: Montaje del ensayo para calcular el ángulo de contacto sobre as partículas de cemento, [Hernández, 2012]

Fase IV: Evaluación del Sistema LITECEM®

En la fase IV, se realiza la evaluación del sistema original (blanco), con una serie de ensayo que nos permite saber la integridad del sistema, entre los cuales encontramos: densidad, reología, pérdida de filtrado, fluido libre, tiempo de bombeabilidad o tiempo de espesamiento, sedimentación, permeabilidad al agua y resistencia a la compresión por método destructivo. El diseño del sistema a evaluar se puede observar en la tabla 3.8, y en la tabla 3.9 se observa el diseño del sistema sin el aditivo acelerador (Celt), el cual le da propiedades tixotrópicas permitiendo que el aditivo extendedor se integre al sistema, de esta manera se puede comparar ambos diseños.

Tabla 3.8: Diseño del sistema cementante a evaluar (blanco), para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	394,63
LITECEM®	Extendedor	22	86,82
CG-400	Control de gas	0,85	3,35
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,35
CELT	Acelerador	0,30	1,18
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,70
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,17
ADL	Fase continua	66,67	263,11

Tabla 3.9: Diseño del sistema cementante a evaluar (blanco) sin el aditivo acelerador, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	395,95
LITECEM®	Extendedor	22	87,11
CG-400	Control de gas	0,85	3,37
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,37
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,70
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,30
ADL	Fase continua	66,67	262,53

En principio, se realiza la preparación de los aditivos secos y de los aditivos líquidos para continuar con la mezcla de los mismos en el vaso de la mezcladora a una velocidad máxima de 4000 rpm, para evitar el colapso del aditivo extendedor (esferas poliméricas), se verifica la mezclabilidad de los aditivos en el tiempo que sea necesario (aproximadamente 4min).

Se continúa con la medida de la densidad la cual debe coincidir con la densidad de la mezcla teórica, se vierte la lechada en el contenedor de la balanza se tapa y se presuriza la misma, la cual se coloca en la base de la balanza y se mide la densidad con el juego de pesas, dando el resultado en libras por galón [lpg]. Luego de medir la densidad la lechada se acondiciona por 20 min en el consistómetro atmosférico, a la temperatura circulante 125 °F, para evaluar la reología, fluido libre y pérdida de filtrado.

El ensayo de la reología, la mezcla ya acondicionada se vierte en el vaso del viscosímetro donde se mide los esfuerzos de cortes a las velocidades de cortes de 1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200 y 300 rpm y los geles a los 10 segundos y 10 minutos, para contar con los datos suficientes para saber el modelo reológico que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

En la pérdida de filtrado se procede a realizar el montaje del equipo, donde se vierte la lechada ya acondicionada en la celda, se tapa y se coloca en la chaqueta calefactora del equipo, donde se hace pasar una presión de 1000 psi en la parte superior de la celda, el filtrado se recolecta en un cilindro graduado, en una duración de 30 min para el ensayo, este valor de mililitros recolectados y junto con la ecuación 3.6, se obtiene el la cantidad de filtrado que pierde la lechada hacia la formación, este valor debe ser menor igual a 30 ml en 30 min.

El fluido libre se evalúa en un cilindro graduado, donde se vierte la mezcla en un cilindro de capacidad de 250 ml hasta alcanzar la misma, se coloca en una superficie a nivel y libre de vibraciones durante 2 horas, luego de transcurrir el tiempo del ensayo se procede a retirar el fluido libre con una pipeta o inyectora, donde se mide el volumen del mismo y se reporta como ml de fluido libre, en este ensayo se debe tener como resultado de cero ml de fluido libre.

Estabilidad

Este ensayo permite verificar que en el sistema no haya una segregación de las partículas y una flotación de las esferas poliméricas, esto con el fin de medir la densidad de la lechada ya fraguada, en el cámara de curado presurizada a una presión de 3000 psi y una temperatura de 150 °F que equivalen a las condiciones del pozo, la densidad se mide por el principio de Arquímedes.

Luego de tener preparada la mezcla, se procede a llenar las celdas bp que simulan el núcleo de la cementación del diseño, mientras se llenan se le saca el aire que pueda estar atrapado en la lechada con un alambre, se hace una serie de movimientos continuos hasta que se observe que el aire atrapado salga, se continua llenando hasta el tope de la celda, se tapa la misma y se colocan en la cámara de curado, durante 24 hr a una presión de 3000 psi y la temperatura estática del pozo.

Al pasar del tiempo de prueba, se desmontan las celdas y el núcleo se corta en tres secciones iguales (tope, medio y base), para continuar con la medida de la masa de cada una de las secciones en seco y en agua, en un beaker se llena de agua aproximadamente 500 ml, se coloca en la balanza y se tara la misma, se pesa cada una de las secciones en seco y luego con una guaya se sujetan cada una de las secciones y se mide la masa en el agua, entonces se tiene que la densidad relativa se obtiene por medio de la ecuación 3.12

$$dr = \frac{ms}{ma} \rho_a \quad 3.12$$

Donde:

dr = densidad relativa [lpg]

ms = masa de la sección en seco [g]

ma = masa de la sección en el agua [g]

ρ_a = densidad del agua [lpg]

Luego de tener cada una de las densidades relativa de las secciones, la cual no debe ser mayor a 0,3 lpg la diferencia entre el tope y la base del núcleo. La densidad del núcleo es el promedio de las tres secciones medidas.

Tiempo de bombeabilidad

Este ensayo permite evaluar el tiempo en el cual la lechada puede ser bombeada antes de que fragüe; al tener preparado el diseño, se procede a verter el fluido en el vaso del consistómetro presurizado previamente engrasado, se libera el aire entrampado por medio de golpeteos al vaso, se tapa y se coloca en la tabla movable del equipo, se enciende la rotación para así colocar el potenciómetro y se acople con la paleta, para así llenar el cilindro del consistómetro, éste fluido permite el calentamiento de la lechada. Continuando con el ensamblaje del equipo, el cabezal del cilindro se enrosca al mismo y se coloca la termocupla a través del eje del vaso enroscándolo parcialmente, cuando de llene completamente del fluido de ajusta la misma.

Permeabilidad al agua

Este ensayo permite determinar cuan permeable es el sistema cementante una vez fraguado, se realiza la preparación del sistema, luego se vierte en los anillos, que se colocan dentro del molde de los cubos para ser curados previamente en la cámara de curado presurizada, la temperatura estática se alcanza en un lapso de 240 min llegando a 150 °F, donde permanece constante hasta que el ensayo culmine, a una presión de 3000 psi, la determinación de este ensayo lo da el montaje de cuatro muestras. Una vez terminado el ensayo se desmontan y los anillos se llevan al permeámetro, donde se colocan en la base del permeámetro, por donde sale la presión del fluido en este caso la del agua, con un aro de goma que permite sellar la muestra, para que el líquido pase solamente por la muestra, se tapa con el cuerpo F, el cual posee una válvula que permite llenar la parte superior de la muestra y a la vez desahogar el fluido que pasa a través de la misma, el cual se observa en la pipeta que se encuentra conectado en la parte superior del cuerpo F, la presión con la que se trabaja es de 60 psi.

Resistencia a la compresión

Luego de tener preparado el diseño y los moldes previamente engrasados, se vierte el fluido dentro de los mismos, este se agita mediante 27 movimientos a lo largo del perímetro de cada compartimiento en forma de cubo utilizando una varilla de agitación, luego se termina de llenar los moldes y se tapan con una placa previamente engrasada, se procede a colocar los moldes en la cámara de curado presurizada, la misma se tapa y se coloca la termocupla, luego se inicia el ensayo, la temperatura estática se alcanza en un lapso de 240 min llegando a 150 °F, donde permanece constante hasta que el ensayo culmine, a una presión de 3000 psi la determinación de este ensayo lo da el montaje de 4 cubos.

Luego de transcurrido el tiempo del ensayo, se enfrían y se hace el desmontaje de los cubos, se miden las aristas del cubo donde las caras sean paralelas, esta medición se realiza con un vernier electrónico, para obtener el área de dicha cara, ya que es un dato que requiere el software de la prensa. Para tener el valor de la resistencia a la compresión se enciende el computador y la prensa, para el computador se abre el software y se llenan los datos de entrada, se elige el método y colocamos los datos del cubo, el mismo cubo se coloca en la prensa y se empieza el ensayo, así sucesivamente para cada cubo luego se imprimen los valores para culminar con el ensayo. Estos valores de resistencia a la compresión permiten tener una idea de saber si cumplen con los requerimientos del campo a perforar.

Fase V: Diseño y evaluación del sistema LITECEM[®] con surfactante

En esta fase se realiza el diseño del sistema cementante con él o los surfactantes que no pierden sus propiedades en presencia del cemento, para continuar, se evalúa él o los sistemas a las tres concentraciones estudiadas para así determinar el surfactante y la concentración que mejor de resultados con los distintos ensayos en el laboratorio de cementación, en las tablas 3.10, 3.11 y 3.12, se tiene el diseño de él o los surfactantes a las tres concentraciones, y en las tablas 3.13, 3.14 y 3.15 se tiene el diseño de él o los surfactantes a las tres concentraciones sin el aditivo

acelerador que proporciona propiedades tixotrópicas que permite que las esferas de poliestireno se mantengan integrada a la lechada.

Tabla 3.10: Diseño del sistema cementante + 0,8 gal/sx del surfactante X, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	394,06
LITECEM [®]	Extendedor	22	86,69
CG-400	Control de gas	0,85	3,35
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,35
CELT	Acelerador	0,30	1,18
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,69
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,11
SURFACTANTE X	Dispersante del aditivo extendedor	7,16	28,22
ADL	Fase continua	66,67	235,66

Tabla 3.11: Diseño del sistema cementante + 1,2 gal/sx del surfactante X, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	393,77
LITECEM [®]	Extendedor	22	86,63
CG-400	Control de gas	0,85	3,35
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,35
CELT	Acelerador	0,30	1,18
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,69
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,08
SURFACTANTE X	Dispersante del aditivo extendedor	10,74	42,29
ADL	Fase continua	66,67	221,97

Tabla 3.12: Diseño del sistema cementante + 1,6 gal/sx del surfactante X, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	393,49
LITECEM®	Extendedor	22	86,57
CG-400	Control de gas	0,85	3,34
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,34
CELT	Acelerador	0,30	1,18
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,69
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,05
SURFACTANTE X	Dispersante del aditivo extendedor	14,32	56,35
ADL	Fase continua	66,67	208,29

Tabla 3.13: Diseño del sistema cementante sin el aditivo acelerador + 0,8 gal/sx de surfactante X, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	395,38
LITECEM®	Extendedor	22	86,98
CG-400	Control de gas	0,85	3,36
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,36
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,70
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,24
SURFACTANTE X	Dispersante del aditivo extendedor	14,32	28,31
ADL	Fase continua	66,67	234,99

Tabla 3.14: Diseño del sistema cementante sin el aditivo acelerador + 1,2 gal/sx de surfactante X, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	395,09
LITECEM®	Extendedor	22	86,92
CG-400	Control de gas	0,85	3,36
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,36
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,70
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,21
SURFACTANTE X	Dispersante del aditivo extendedor	10,74	42,43
ADL	Fase continua	66,67	221,25

Tabla 3.15: Diseño del sistema cementante sin el aditivo acelerador + 1,6 gal/sx de surfactante X, para un volumen de 600 cc

Componentes	Función	% Componentes BWOC	Masa [g]
Cemento H		100	394,80
LITECEM®	Extendedor	22	86,86
CG-400	Control de gas	0,85	3,36
CF-43	Controlador de filtrado	0,85	3,36
CA-91L	Anti- espumante	0,18	0,70
NANOSEAL	Mejorador de las propiedades mecánicas	9,93	39,18
SURFACTANTE X	Dispersante del aditivo extendedor	14,32	56,54
ADL	Fase continua	66,67	207,53

En principio, se realiza la preparación de los aditivos secos y de los aditivos líquidos para continuar con la mezcla de los mismos en el vaso de la mezcladora a una velocidad máxima de 4000 rpm, para evitar el colapso del aditivo extendedor (esferas poliméricas), se verifica la mezclabilidad de los aditivos en el tiempo que sea necesario (aproximadamente 4min).

Se continúa con la medida de la densidad la cual debe coincidir con la densidad de la mezcla teórica, se vierte la lechada en el contenedor de la balanza se tapa y se

presuriza la misma, la cual se coloca en la base de la balanza y se mide la densidad con el juego de pesas, dando el resultado en libras por galón [lpg]. Luego de medir la densidad la lechada se acondiciona por 20 min en el consistómetro atmosférico, a la temperatura circulante 125 °F, para evaluar la reología, fluido libre y pérdida de filtrado.

El ensayo de la reología, la mezcla ya acondicionada se vierte en el vaso del viscosímetro donde se mide los esfuerzos de cortes a las velocidades de cortes de 1, 2, 3, 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200 y 300 rpm y los geles a los 10 segundos y 10 minutos, para contar con los datos suficientes para saber el modelo reológico que mejor se ajusta a los datos obtenidos.

En la pérdida de filtrado se procede a realizar el montaje del equipo, donde se vierte la lechada ya acondicionada en la celda, se tapa y se coloca en la chaqueta calefactora del equipo, donde se hace pasar una presión de 1000 psi en la parte superior de la celda, el filtrado se recolecta en un cilindro graduado, en una duración de 30 min para el ensayo, este valor de mililitros recolectados y junto con la ecuación 3.6, se obtiene el la cantidad de filtrado que pierde la lechada hacia la formación, este valor debe ser menor igual a 30 ml en 30 min.

El fluido libre se evalúa en un cilindro graduado, donde se vierte la mezcla en un cilindro de capacidad de 250 ml hasta alcanzar la misma, se coloca en una superficie a nivel y libre de vibraciones durante 2 horas, luego de transcurrir el tiempo del ensayo se procede a retirar el fluido libre con una pipeta o inyectora, donde se mide el volumen del mismo y se reporta como ml de fluido libre, en este ensayo se debe tener como resultado de cero ml de fluido libre.

Estabilidad

Este ensayo permite verificar que en el sistema no haya una segregación de las partículas y una flotación de las esferas poliméricas, esto con el fin de medir la densidad de la lechada ya fraguada, en el cámara de curado presurizada a una presión de 3000 psi y una temperatura de 150 °F que equivalen a las condiciones del pozo, la densidad se mide por el principio de Arquímedes.

Luego de tener preparada la mezcla, se procede a llenar las celdas bp que simulan el núcleo de la cementación del diseño, mientras se llenan se le retira el aire que pueda estar atrapado en la lechada con un alambre, se hace una serie de movimientos continuos hasta que se observe que el aire atrapado salga, se continua llenando hasta el tope de la celda, se tapa la misma y se colocan en la cámara de curado, durante 24 hr a una presión de 3000 psi y la temperatura estática del pozo.

Al pasar del tiempo de prueba, se desmontan las celdas y el núcleo se corta en tres secciones iguales (tope, medio y base), para continuar con la medida de la masa de cada una de las secciones en seco y en agua, en un beaker se llena de agua aproximadamente 500 ml, se coloca en la balanza y se tara la misma, se pesa cada una de las secciones en seco y luego con una guaya se sujetan cada una de las secciones y se mide la masa en el agua, entonces se tiene que la densidad relativa se obtiene por medio de la ecuación 3.12

Luego de tener cada una de las densidades relativas de las secciones, la cual no debe ser mayor a 0,3 lpg la diferencia entre el tope y la base del núcleo. La densidad del núcleo es el promedio de las tres secciones medidas.

Tiempo de bombeabilidad

Este ensayo nos permite evaluar el tiempo en el cual la lechada puede ser bombeada antes de que frague; al tener preparado el diseño, se procede a verter el fluido en el vaso del consistómetro presurizado previamente engrasado, se le retira el aire atrapado por medio de golpeteos al vaso, se tapa y se coloca en la tabla móvil del equipo, se enciende la rotación para así colocar el potenciómetro y se acople con la paleta, para así llenar el cilindro del consistómetro, éste fluido permite el calentamiento de la lechada. Continuando con el ensamblaje del equipo, el cabezal del cilindro se enrosca al mismo y se coloca la termocupla a través del eje del vaso enroscándolo parcialmente, cuando se llene completamente del fluido se ajusta la misma.

Permeabilidad

Este ensayo permite saber cuan permeable es el sistema cementante una vez fraguado, se realiza la preparación del sistema, luego se vierte en los anillos, que se colocan dentro del molde de los cubos para ser curados previamente en la cámara de curado presurizada, la temperatura estática se alcanza en un lapso de 240 min llegando a 150 °F, donde permanece constante hasta que el ensayo culmine, a una presión de 3000 psi, la determinación de este ensayo lo da el montaje de cuatro anillos. Una vez terminado el ensayo se desmontan y los anillos se llevan al permeámetro, donde se colocan en la base por donde sale la presión de agua, con un anillo de goma que permite sellar la muestra, para que el líquido pase solamente por la muestra, se tapa con el cuerpo F, el cual posee una válvula que permite llenar la parte superior de la muestra y a la vez desahogar el fluido que pasa a través de la misma, donde se observa en la pipeta que se encuentra conectado en la parte superior del cuerpo F, la presión con la que se trabaja es de 60 psi.

Resistencia a la compresión

Luego de tener preparado el diseño y los moldes previamente engrasados, se vierte el fluido dentro de los mismos, este se agita mediante 27 movimientos a lo largo del perímetro de cada compartimiento en forma de cubo utilizando una varilla de agitación, luego se termina de llenar los moldes y se tapan con una placa previamente engrasada, se procede a colocar los moldes en la cámara de curado presurizada, la misma se tapa y se coloca la termocupla, luego se inicia el ensayo, la temperatura estática se alcanza en un lapso de 240 min llegando a 150 °F, donde permanece constante hasta que el ensayo culmine, a una presión de 3000 psi la determinación de este ensayo lo da el montaje de 4 cubos.

Luego de transcurrido el tiempo del ensayo, se enfrían y se hace el desmontaje de los cubos, se miden las aristas del cubo donde las caras sean paralelas, esta medición se realiza con un vernier electrónico, para obtener el área de dicha cara, ya que es un dato que requiere el software de la prensa. Para tener el valor de la resistencia a la compresión se enciende el computador y la prensa, para el

computador se abre el software y se llenan los datos de entrada, se elige el método y colocamos los datos del cubo, el mismo cubo se coloca en la prensa y se empieza el ensayo, así sucesivamente para cada cubo luego se imprimen los valores para culminar con el ensayo. Estos valores de resistencia a la compresión permiten tener una idea de saber si cumplen con los requerimientos del campo a perforar.

Fase VI: análisis, conclusiones y recomendaciones.

En esta última fase se ejecuta la recopilación de los resultados de los distintos ensayos realizados en los laboratorios de Cementación y de Fenómenos interfaciales para continuar con los análisis de los mismos, con la finalidad de establecer el surfactante y concentración óptima que tenga potencial aplicación en los sistemas cementantes LITECEM[®], luego se realizan las conclusiones y recomendaciones que se presentan en el trabajo especial de grado.

3.6 OPERACIONALIZACIÓN DE OBJETIVOS

Según Sabino (2007), la operacionalización de los objetivos tiene como finalidad la búsqueda de elementos precisos que permitan traducir y medir en la práctica los conceptos que se han definido teóricamente. En tal sentido, la operacionalización de los objetivos del presente trabajo de investigación se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 3.16: Matriz de operacionalización de objetivos 1y 2

Objetivos Específicos	Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Fuente	Instrumentos
Recopilar información bibliográfica y geológica del área de Tía Juana.	Información bibliográfica y geológica del área de Tía Juana.	Información: adquisición de conocimientos que permiten ampliar o precisar los que se poseen sobre una materia determinada.	En esta etapa se contempla la documentación respecto a las características geológicas de mayor importancia y bases teóricas para el desarrollo de la investigación.	<ul style="list-style-type: none"> - Litología. - Estratigrafía. - Ubicación. - Condiciones del yacimiento. - Conceptos relacionados a la cementación. 	www.rae.com	<ul style="list-style-type: none"> - Revisión Bibliográfica. - Entrevistas. - Observación estructurada.
Evaluar el efecto del surfactante sobre la mojabilidad de las esferas poliméricas.	Mojabilidad de las esferas poliméricas	La mojabilidad es la tendencia de un fluido a adherirse a una superficie sólida, en presencia de otro fluido inmisible.	En esta etapa se procede a la evaluación de las soluciones acuosas de surfactantes, para la escogencia del surfactante que moje más la superficie del LITECEM®	<ul style="list-style-type: none"> - Tensión interfacial. - Ángulo de contacto. - Constante del material. 	Rivera, (2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo DCAT11. - Ecuación de Washburn. - Método de ascenso capilar.

Tabla 3.17: Matriz de operacionalización de objetivos 3 y 4

Objetivos Específicos	Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Fuente	Instrumentos
Evaluar el efecto del cemento sobre la adsorción del surfactante en interfases liquido-sólido y liquido-gas	Adsorción del surfactante en interfases liquido-sólido y liquido-gas.	Adsorción: es la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias disueltas o dispersas en un fluido	Para este objetivo se evalúa la tensión interfacial en las interfases líquido-sólido y líquido-gas.	<ul style="list-style-type: none"> - Tensión interfacial. - Valores de pH. 	www.rae.com	<ul style="list-style-type: none"> - Método de la placa de wihelmy. - Equipo DCAT11. - Medidor de pH.
Evaluar el efecto del surfactante sobre la mojabilidad de las partículas de cemento.	Mojabilidad de las partículas de cemento	La mojabilidad es la tendencia de un fluido a adherirse a una superficie sólida, en presencia de otro fluido inmisible.	En esta etapa se procede a la evaluación de las soluciones acuosas de surfactantes, para la escogencia del surfactante que moje menos la superficie del cemento.	<ul style="list-style-type: none"> - Tensión interfacial. - Ángulo de contacto. - Constante del material 	Rivera, (2004)	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo DCAT11. - Ecuación de Washburn. - Método de ascenso capilar.

Tabla 3.18: Matriz de operacionalización de objetivos 5 y 6

Objetivos Específicos	Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Fuente	Instrumentos
Evaluar las propiedades de control de calidad del cemento petrolero bajo la norma ISO 10426-2.	Propiedades de control de calidad del cemento	Propiedades: son aquellas que son medidas sin cambiar la composición de las sustancia.	Evaluar estas propiedades nos permite verificar si el lote del cemento tiene las mínimas características para ser usado.	<ul style="list-style-type: none"> - Norma ISO 10426-2. - Ensayos: Tiempo de bombeabilidad, Resistencia a la compresión y Fluido libre. 	www.rae.com	<ul style="list-style-type: none"> - Consistómetro presurizado. - Prensa. - Mezcladora. - Matraz cónico.
Evaluar las propiedades físicas del sistema LITECEM® con surfactante y del sistema LITECEM® de acuerdo a las normas ISO 10426-2, ISO/FDIS 10426-6.	Propiedades físicas del sistema	Propiedades: son aquellas que son medidas sin cambiar la composición de las sustancia.	En esta fase permite la comparación del sistema original con el sistema + surfactante, y el sistema original sin A/A con el sistema sin A/A + surfactante, para las distintas concentraciones a usar.	<ul style="list-style-type: none"> - Norma ISO 10426-2. - Propiedades físicas (densidad, reología, pérdida de filtrado, fluido libre, tiempo de bombeabilidad, sedimentación, permeabilidad al agua) 	www.rae.com	<ul style="list-style-type: none"> - Consistómetro presurizado. - Balanza. - Mezcladora. - Cilindro graduado 250 ml. - Viscosímetro. - Cámara de curado presurizada. - Celdas bp. - Permeámetro. - Cámara de filtrado.

Tabla 3.19: Matriz de operacionalización del objetivo 7

Objetivos Específicos	Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores	Fuente	Instrumentos
Evaluar la resistencia a la compresión para ambos sistemas	Resistencia a la compresión para ambos sistemas	Es una medida de la dureza del cemento.	En esta etapa se evalúa la resistencia a la compresión de los sistemas, a las distintas concentraciones de surfactantes.	<ul style="list-style-type: none"> - Norma ISO 10426-2. - Propiedades mecánicas (Resistencia a la compresión). 	Blanco, (s.f.)	<ul style="list-style-type: none"> - Prensa. - Cámara de curado presurizada.

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Este capítulo está orientado a ofrecer una descripción geológica del área de estudio, donde se ha aplicado la cementación de pozos con el sistema LITECEM®. En tal sentido, se presenta una descripción general de los aspectos geográficos, estructurales y estratigráficos de la Cuenca del Lago de Maracaibo, así como el Área de Tía Juana.

4.1 UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO

La Cuenca del Lago de Maracaibo está situada al Noroeste de Venezuela, cubriendo un área total de 52.000 km², correspondiente en su mayor parte al estado Zulia y extensiones menores de los estados Trujillo, Táchira y Mérida. Según Zapata (2011), la estructura de la cuenca se encuentra limitada por la falla de Oca al Norte, la Sierra de Perijá al Oeste, el flanco occidental de los Andes Venezolanos al Este, y la falla de Boconó al Sureste. Topológicamente se extiende sobre toda el área ocupada por las aguas del Lago de Maracaibo y los terrenos planos suavemente ondulados que la circundan.

La cuenca se puede dividir en la Costa oriental del lago, Centro del Lago y Costa Occidental del Lago, para este Trabajo especial de grado, se enfoca en la Costa Oriental del Lago.

En la zona terrestre de Costa Oriental se encuentran los campos de Cabimas, Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero como se observa en la figura 4.1, los cuales producen crudo pesado proveniente de las formaciones Lagunillas y La Rosa de edad Mioceno por encima de la discordancia del Eoceno.

Para Bernys (1997), los yacimientos de esta zona se extienden en una franja en el Lago a mayores profundidades afectando las propiedades de los fluidos, que resultan crudos pesados y medianos.

Las areniscas de la formación Misoa constituyen el principal reservorio de hidrocarburos del Eoceno. Los crudos son de medianos a livianos según la profundidad. Las arenas "B", subdivididas en nueve miembros, producen crudos medianos especialmente de la B-7 a la B-5 y en menor escala, petróleo liviano. Las arenas "C" contienen acumulaciones de crudos livianos y los miembros C-7 al C-4 son los principales productores.

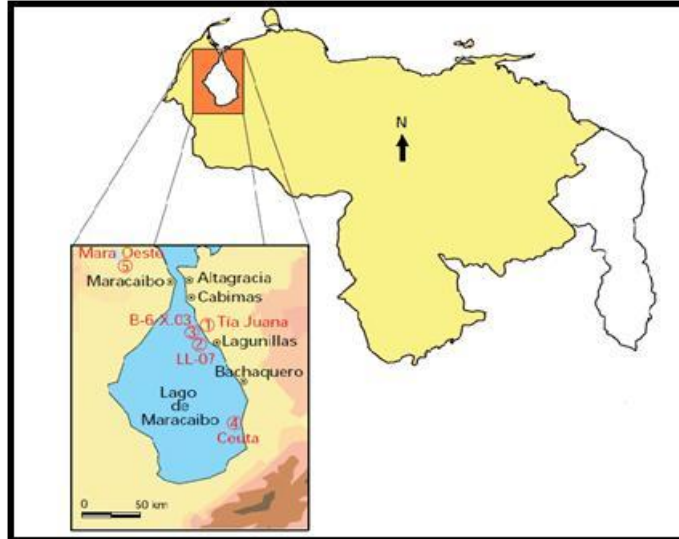


Figura 4.1: Ubicación Geográfica de la Costa Oriental del Lago, [Henández, 2012]

4.1.1 Descripción del Campo Tía Juana

Este campo se sitúa tanto en tierra como en el lago (Bernys, 1997), el campo Tía Juana tierra está ubicado entre las ciudades de Cabimas y Lagunillas en la parte septentrional de la costa oriental del Lago de Maracaibo. Se encuentra dividido en dos campos: Tía Juana Principal y Tía Juana Este. Desde el punto de vista del yacimiento, el campo es una acumulación de petróleo pesado que cubre una superficie de más de 39.000 acres.

La geología de dicho campo está constituido por un monoclinal de rumbo noroeste-sureste con un buzamiento promedio suave de 4 a 6 grados hacia el suroeste. Las fallas que lo cruzan son de direcciones normales y desplazamientos variables (entre 20 y 250 pies). Las principales tienen una dirección preferencial noroeste-sureste; la secuencia estratigráfica del Post-Eoceno en el campo Tía Juana está constituida, de base a tope por la Formación La Rosa del Mioceno, que yace discordantemente sobre la Formación Misoa de edad Eoceno, a continuación

se encuentra la Formación Lagunillas del Mioceno subdividida en cuatro Miembros (Lagunillas Inferior, el más productivo, Ojeda, el más lutítico, Laguna y Bachaquero) y, por último, la Formación La Puerta de edad Mio- Plioceno. Los contactos entre estas tres principales formaciones son concordantes.

La Formación La Rosa (70 pies de espesor) está constituida por lutitas laminares de color gris verdoso, que se presentan en intercalaciones de capas de areniscas de poco espesor. La Formación Lagunillas (1260 pies de espesor) contiene lutitas, arcillas y arenas con algunas capas de lignito. La Formación La Puerta es una secuencia de arcillas blancas y grises, arenas arcillosas y arenas grises.



Figura 4.2: Ubicación del Campo Tía Juana, [WEC, 1997]

Tía Juana lago se encuentra en el Lago de Maracaibo cerca de su costa oriental, en el área Eoceno Norte del campo Tía Juana, en esta área el yacimiento típico es B-6-X.03, donde la estructura del yacimiento está conformada por dos anticlinales asimétricos, el primero, en el área de Punta Benitez, al norte del bloque norte presenta en el flanco norte-noroeste un buzamiento que varía entre 10 y 15 grados. El flanco sursureste tiene una inclinación suave con un buzamiento de entre 2 y 4 grados. La segunda estructura se ubica en el norte del bloque sur, en el extremo norte-noroeste del yacimiento en el sector Tía Juana,

alargándose también hacia el sur-sureste formando un monoclinial de buzamiento suave que varía entre 2 y 4 grados.

4.2 ÁREA DE ESTUDIO, FORMACIONES GEOLÓGICAS

En la perforación de los pozos para dicha locación, se atraviesan formaciones que a continuación se describen. En el área de Tía Juana Lago, la prognosis geológica de la misma se observa en la figura 4.3.

► Formación Isnotu: (mioceno medio) predominantemente arcillas 65%. Con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar. Carbón y conglomerado. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro, corrientemente abagarradas en rojo, púrpura y amarillo y localmente carbonáceas.

► Formación Lagunillas(mioceno medio): la misma se encuentra subdividida en tres miembros que de base a tope son: Bachaquero, laguna y Lagunillas Inferior.

El Miembro Bachaquero está formado por areniscas arcillosas de colores gris a marrón, con algunas alternancias de lutitas y lignitos, su contacto en el tope es de carácter concordante con la formación Isnotu y en la base su contacto es concordante con el miembro laguna.

El Miembro Laguna consiste esencialmente en arenas, que se distinguen por la presencia de capas glauconíticas y lutitas fosilíferas. Es importante productora de petróleo en la cuenca del Lago de Maracaibo. Oficialmente está subdividido en dos unidades: Laguna Superior y Laguna Inferior, la primera unidad se caracteriza por poseer areniscas pobremente consolidadas con intercalaciones de lutitas carbonáceas; y la segunda está caracterizada por areniscas no consolidadas, intercaladas con limolitas.

El miembro lagunillas inferior se compone esencialmente de areniscas friables, de grano fino, de color variable de marrón a gris claro y a blanco, intercaladas con lutitas gris claro, gris verdoso o gris oscuro. Localmente se encuentran lignitos. La

unidad es importante productora de petróleo en el Campo Costanero Bolívar, Lago de Maracaibo.

► La Formación La Rosa: yace con una fuerte discordancia angular sobre la Formación Misoa, del Eoceno, o sobre la Formación Icotea, en las aéreas donde ésta se depositó, en cuyo caso el contacto es paraconcordante. Hacia arriba, la formación pasa transicionalmente a la Formación Lagunillas.

EDAD GEOLÓGICA	FORMACIÓN/ MIEMBRO	YACIMIENTO	ANP	PROFUNDIDAD [PIES]			PRESIÓN [LPC]
				BNL (TVDSS)	BMR (TVD)	BMR (MD)	
MIOCENO	ISNOTU		SD	SD	SD	SD	SD
MIOCENO	(Miembro Bacha. Sup.)	---	0'	-1424	1466	1468	
MIOCENO	(Miembro Bacha. Inf.)	---	0'	-1841	1883	1904	
MIOCENO	Lagunillas (Lag. Sup)	LGINF-04	0'	-2099	2141	2197	
MIOCENO	Lagunillas (Lag. Inf.)	LGINF-04	0'	-2253	2295	2371	
MIOCENO	LLA	LGINF-04	50'-70'	-2376	2418	2513	800
MIOCENO	LLB	LGINF-04	30'-50'	-2537	2579	2698	842
MIOCENO	LLC	LGINF-04	50' -0'	-2601	2643	2771	898
MIOCENO	LLD (Lginf)	LGINF-04	40'-60'	-2659	2701	2837	921
MIOCENO	LA ROSA	LGINF-04	30'-43'	-2719	2761	2907	944
EVENTO	DISCORDANCIA	---		-2758	2800	3000	---
EOCENO	B-1	B-2-X.82	20'-30'	-2758	2800	3000	658
EOCENO	B-2	B-2-X.82	150'-200'	-2941	2993	3162	645
EOCENO	B-3	B-2-X.82	PP	-3518	3558	3824	645
		PT	---	-3670	3712	4000	

Figura 4.3: Prognosis geológica de la localización del área de estudio, [Programa de Ingeniería de Perforación, 2010]

La localización a perforar tiene como objetivo desarrollar las reservas remanentes en el yacimiento B-2-X.82, donde el diagrama mecánico recomendado para la perforación de los pozos (ver Figura 4.4), es de un hoyo superficial de 17 ½" para un intervalo de 0 a 1000 pies con un revestidor de 13 3/8", para el hoyo intermedio de 12 ¼" en un intervalo de 1000 a 2991 pies con un revestidor de 9 5/8" y el hoyo productor de 8 ½" hasta la profundidad de 3986 pies con una camisa de 7".

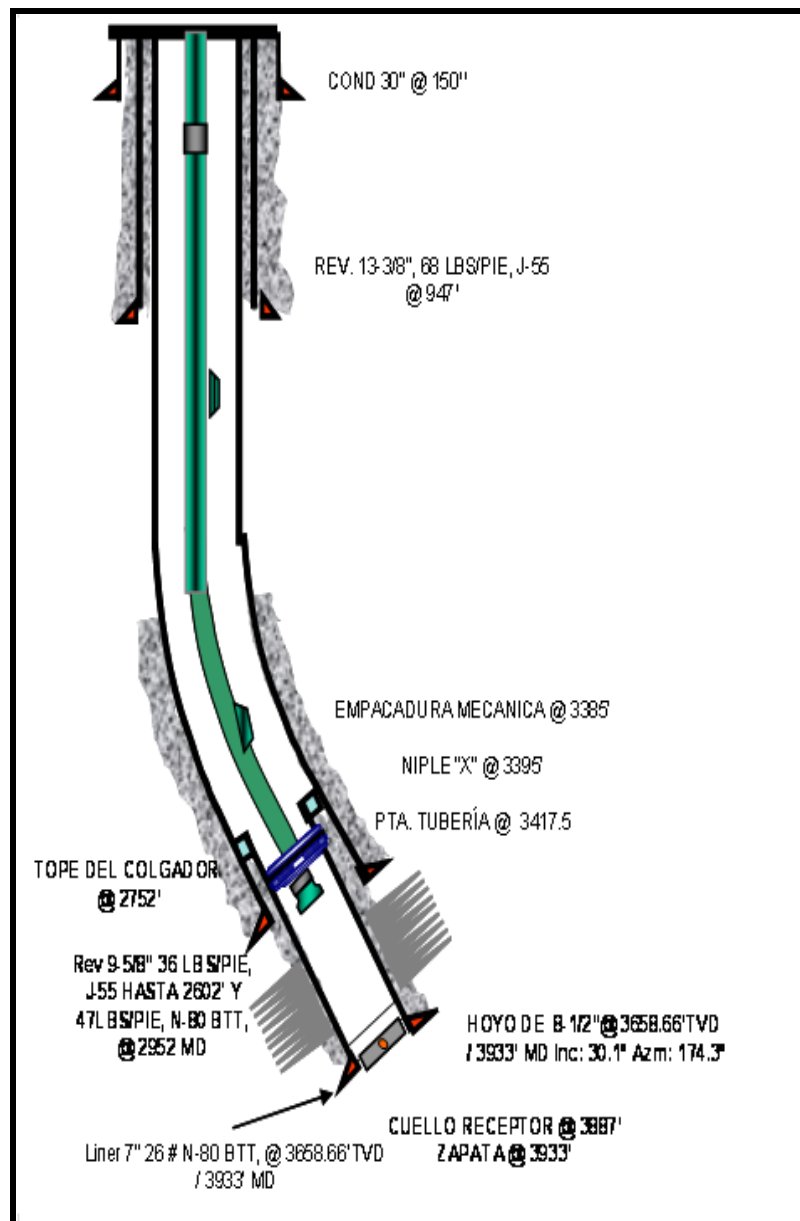


Figura 4.4: Diagrama Mecánico tipo para pozos del área en estudio, [Programa de Ingeniería de Perforación, 2010]

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio efectuados durante esta investigación, así como el razonamiento y comparación de los mismos.

Para facilitar la exposición de los resultados, los mismos se hacen por objetivo planteado, a diferencia de los objetivos 6 y 7, que se unen para facilitar la comprensión de cada uno de los sistemas evaluados, y por último se realiza una comparación de las propiedades más críticas de los sistemas evaluados, para obtener un criterio de escogencia del surfactante y la concentración del mismo.

El criterio para la selección del surfactante va a ser el que mejor se desempeñe en la lechada sin perder la propiedad de dispersión de las partículas de LITECEM[®]. Para realizar esto, se muestran los resultados obtenidos a partir de las técnicas de recolección y análisis de datos, como lo son las gráficas, tablas, hojas de cálculo, entre otras. Finalmente, se presenta el sistema seleccionado para el campo, con su concerniente justificación.

5.1 EFECTO DEL SURFACTANTE SOBRE LA TENSIÓN SUPERFICIAL DE LAS SOLUCIONES

La tensión superficial es una propiedad de los líquidos y está relacionada con la fuerza de cohesión de las moléculas, los surfactantes tienen la capacidad de reducir la tensión superficial en sistemas acuosos, debido principalmente a su adsorción en la interfase agua-aire, donde las moléculas de surfactante se orientan de tal forma que retiran las cadenas hidrófobas del agua, manteniéndose en contacto con la solución a través de los grupos hidrofílicos. El objetivo de esta prueba es determinar si el cemento afecta las propiedades de los surfactantes estudiados, de igual forma permite saber si los surfactantes son químicamente

compatibles con el cemento al observar el comportamiento de la solución cuando se mezclan; ciertas familias de surfactantes precipitan en función del pH de la solución y de la existencia de cationes y aniones en el medio acuoso.

En la Tabla 5.1, se presentan los valores de tensión superficial registrados para cada solución preparada. En cuanto al surfactante A, se puede decir que es compatible con el cemento, no precipita y mantiene sus propiedades a elevados pH, las variaciones en tensión superficial son poco significativas. Para el surfactante B, se tiene que los valores de tensión superficial aumentan considerablemente cuando la solución está en contacto con partículas de cemento, sin embargo, no se observó precipitación en la solución. En este caso se cree que las moléculas de surfactante se adsorbieron sobre la interfase líquido-sólido, disminuyendo la concentración de surfactante en la solución lo que provocó el aumento de tensión superficial. Finalmente, para el surfactante C también se puede decir que es compatible con el cemento, no precipita y mantiene sus propiedades a elevados pH, las variaciones en tensión superficial son poco significativas.

Tabla 5.1. Propiedades de las soluciones de surfactantes

Concentración (%p/p)	Tensión superficial [± 0,1mN/m]	pH	Tensión superficial [± 0,1mN/m] Contacto con cemento	pH
Surfactante A				
2	29	11,8	28,1	12
3	28,2	11,9	27,9	12
4	28,1	11,8	28,2	12
Surfactante B				
2	31,5	11,9	45,2	12
3	31,8	11,9	42,3	12
4	33,7	11,8	44,2	12
Surfactante C				
2	37,3	11,9	38,2	12
3	36,8	11,8	38,1	12
4	37,1	11,9	38,8	12

5.2 EFECTO DEL SURFACTANTE SOBRE LA MOJABILIDAD DE LAS ESFERAS POLIMÉRICAS

Las características físicas de una superficie sólida pueden ser modificadas debido a la adsorción de moléculas de surfactantes. Este fenómeno de adsorción depende de la estructura química del surfactante y de las propiedades fisicoquímicas tanto de la superficie como del solvente, palabras de Rosen (2004).

El ascenso capilar de un líquido dentro de un medio poroso implica el desplazamiento de la interfase sólido-aire por una interfase sólido-líquido, siendo la fuerza motriz la adhesión del líquido sobre la superficie. Para que exista penetración espontánea de un líquido Newtoniano dentro de un lecho compacto de sólidos el ángulo de contacto (θ) debe estar comprendido en el siguiente intervalo: $0 \leq \theta < 90^\circ$, lo que quiere decir que el líquido debe mojar parcialmente la superficie, esto es según Rulison (s.f.).

A modo explicativo, cuando un líquido determinado moja o se esparce totalmente sobre una superficie se dice que el sólido es mojable por ese líquido, experimentalmente, se observa un ángulo de contacto cercano a cero y un máximo ascenso capilar. En el intervalo de ángulos de contacto entre 0° y 90° se dice que el líquido moja parcialmente la superficie, teniendo como resultado una variación en el fenómeno de ascenso capilar. Caso contrario se observa cuando el sólido no es mojado por el líquido, en este caso, se obtienen ángulos de contacto de avance entre 90° a 180° y no es posible el ascenso capilar.

En la Figura 5.1 se observan las diferentes pruebas de ascenso capilar realizadas para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de esferas. En primer lugar, es importante explicar el por qué se emplea hexano como líquido mojante; la superficie del polímero es no-polar y por ser el hexano un líquido no polar con baja tensión superficial, este tiene una gran afinidad por la superficie lo que le permite esparcirse fácilmente, es decir, mojar totalmente la misma. Adicionalmente, el polímero no es soluble en Hexano. Por lo expuesto previamente, la curva de ascenso capilar del hexano es tomada como referencia, mientras más cercanas estén las curvas de ascenso capilar de las soluciones

acuosas de surfactantes a la curva de referencia, se puede inferir que la mojabilidad al agua de la superficie se ha incrementado por la adsorción del surfactante y por la disminución de la tensión superficial. Por otra parte, para el agua no se observa penetración espontánea dentro del lecho de esferas, debido a que no moja esa superficie.

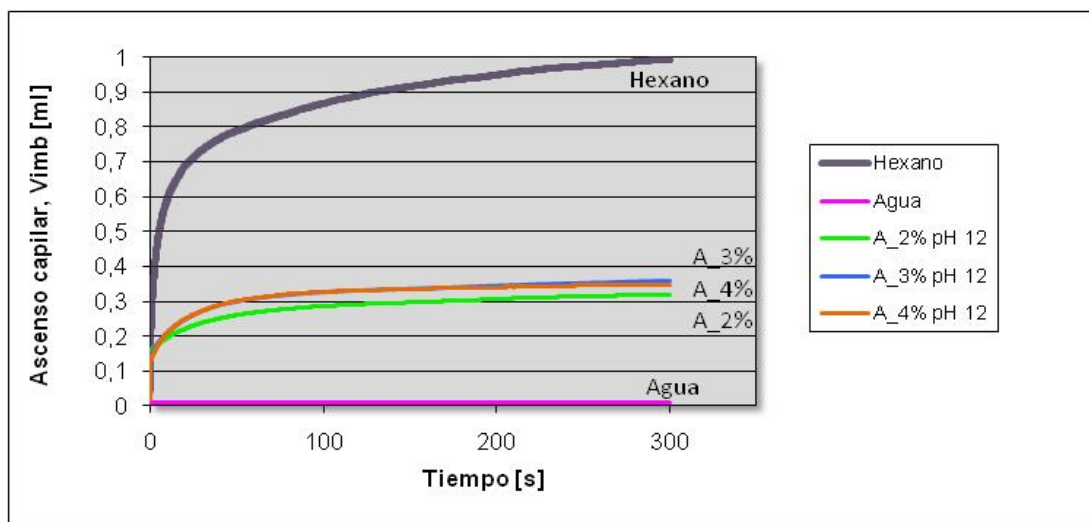


Figura 5.1. Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de esferas de poliestireno. V_{imb} en función del tiempo

Se observa en la Figura 5.1 que la mojabilidad al agua de la superficie de las esferas se incrementa con el aumento de la concentración de surfactante A en la solución acuosa, bajo las condiciones experimentales llevadas a cabo. Se observa que a concentraciones de 3 y 4% se obtienen los mismos resultados, indicando que a 3% se logra la máxima concentración de equilibrio, es decir, concentraciones superiores no tendrán efecto sobre la mojabilidad de las esferas.

Este cambio de mojabilidad se debe a la adsorción del surfactante sobre la superficie con el grupo polar orientado hacia el agua, se piensa que la cadena lipofílica del surfactante interacciona con los grupos no polares de la superficie mediante fuerzas de dispersión de London, esta distribución espacial hace que el grupo hidrofílico del surfactante quede orientado hacia el agua facilitando su hidratación, y por ende la mojabilidad de la superficie.

El incremento de mojabilidad en función de la concentración de surfactante puede ser explicado por un aumento en la cantidad de moléculas de surfactante adsorbidas en la superficie sólida, lo que crea una película más densa y compacta que interacciona aún más con el agua y facilita el ascenso capilar.

Uno de los objetivos de emplear la técnica de ascenso capilar fue determinar el ángulo de contacto del sistema haciendo uso de la ecuación de Washburn (Ecuación 3.11), sin embargo, el empleo de esta ecuación requiere que los datos de volumen de líquido penetrado (V_{imb}^2) en función del tiempo muestren una relación lineal, lo cual, no ocurre con los datos obtenidos (Figura 5.2). Se cree que la no-linealidad observada se debe al diámetro de las esferas poliméricas (promedio 0,48 mm), las cuales al ser empaquetadas en el lecho dejan canales muy grandes, donde el efecto capilar es afectado por las fuerzas viscosas y gravitacionales. Este comportamiento se observó en todos los lechos basados en esferas poliméricas.

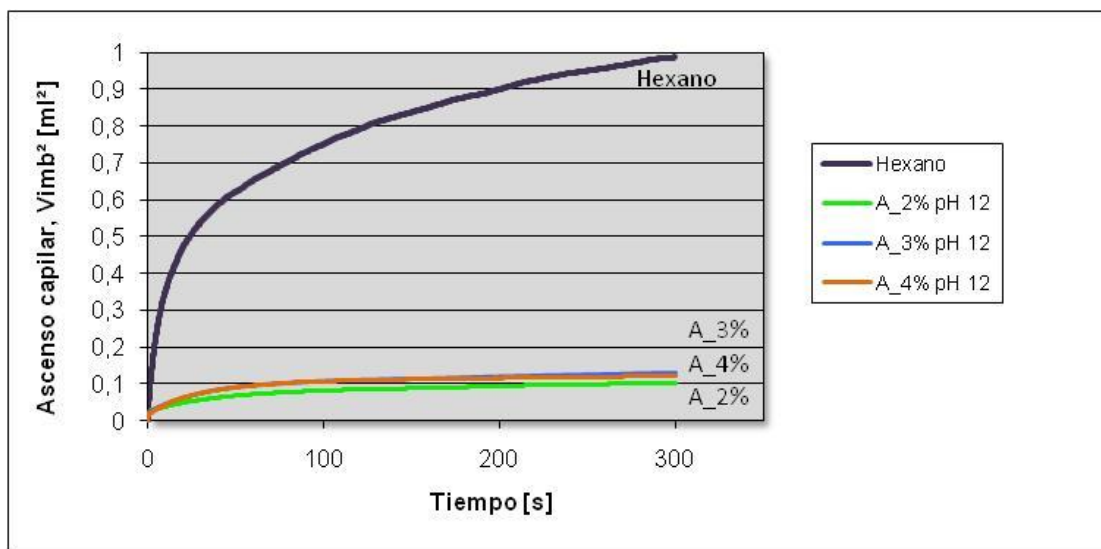


Figura 5.2: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de esferas de poliestireno. V_{imb}^2 en función del tiempo

En la Figura 5.3 se muestran las curvas de ascenso capilar para el surfactante B, no se observa un cambio significativo entre las tres concentraciones estudiadas y el ascenso capilar es menor respecto al surfactante A, lo que sugiere que el

surfactante B no genera un cambio significativo sobre la mojabilidad de las esferas de poliestireno.

Los datos de volumen de líquido penetrado (V_{imb}^2) en función del tiempo no muestran una relación lineal, por lo cual, no se puede aplicar la ecuación de Washburn para determinar los ángulos de contacto.

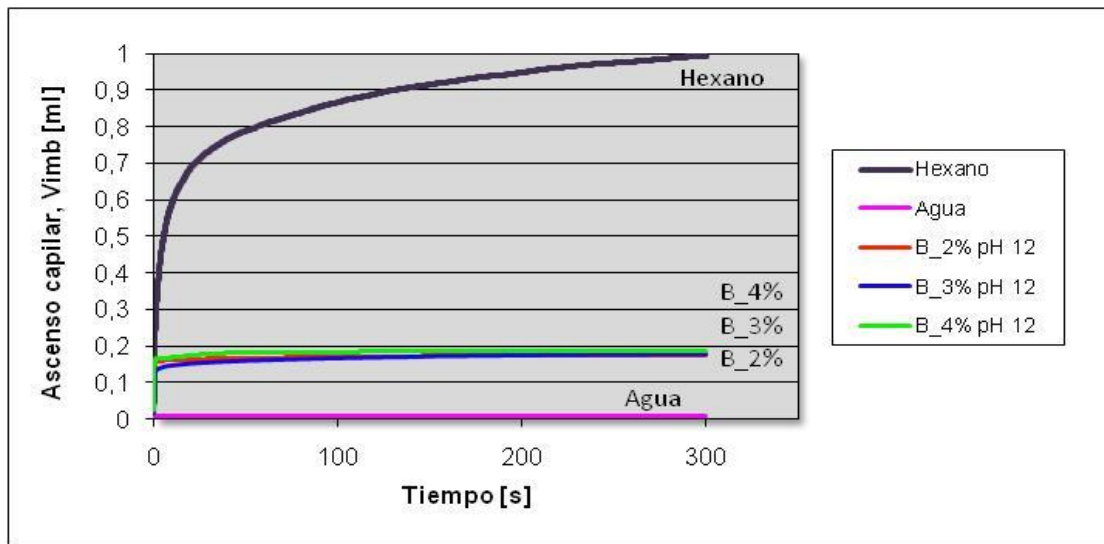


Figura 5.3: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante B en un empaque de esferas poliméricas. V_{imb} en función del tiempo

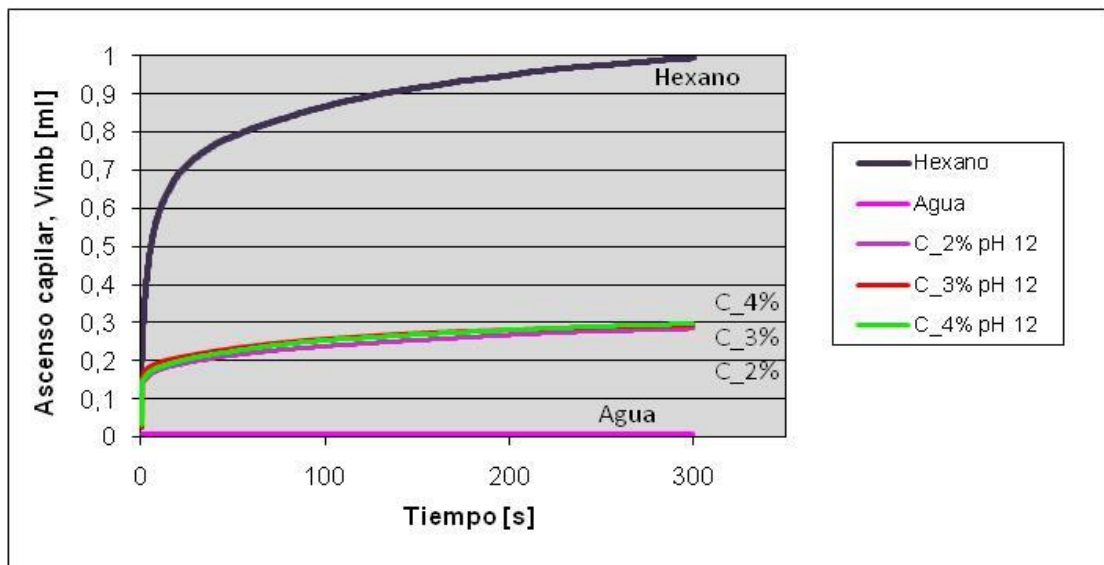


Figura 5.4: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante C en un empaque de esferas poliméricas. V_{imb} en función del tiempo

En la Figura 5.4 se muestran las curvas de ascenso capilar para el surfactante C, las tres concentraciones estudiadas muestran el mismo ascenso capilar; el cual es similar al registrado para el surfactante A. Este cambio de mojabilidad se debe a la adsorción del surfactante sobre la superficie con el grupo polar orientado hacia el agua, se piensa que la cadena lipofílica del surfactante interacciona con los grupos no polares de la superficie mediante fuerzas de dispersión de London, esta distribución espacial hace que el grupo hidrofílico del surfactante quede orientado hacia el agua facilitando su hidratación, y por ende la mojabilidad de la superficie. La máxima concentración de equilibrio se obtiene a concentraciones por debajo de 3%, lo cual sugiere que el surfactante puede ser usado a concentraciones inferiores.

Así mismo, los datos de volumen cuadrático de líquido penetrado (V_{imb}^2) en función del tiempo no muestran una relación lineal, por lo cual, no se puede aplicar la ecuación de Washburn para determinar los ángulos de contacto.

La Figura 5.5 presenta el volumen de líquido penetrado (V_{imb}) a un tiempo de 300 s para todas las formulaciones evaluadas. Con el fin de comparar el efecto de cada surfactante sobre la mojabilidad al agua de las esferas poliméricas, se tomó como base porcentual el ascenso capilar del hexano a 300 s, este se consideró como líquido 100% mojante a la superficie. Como el agua no penetra espontáneamente el lecho de esferas, lo que sugiere un ángulo de contacto de avance superior a los 90° , se considera como líquido 0% mojante de la superficie. Esto permite estimar de forma relativa el efecto del surfactante sobre la mojabilidad al agua de las esferas poliméricas, es decir, a mayor porcentaje mejor mojabilidad.

En la Figura 5.5 se observa que el mayor efecto sobre la mojabilidad de las esferas lo produce el surfactante A, observando variaciones porcentuales de 32%, 36% y 35% para concentraciones de surfactante de 2%, 3% y 4%, respectivamente. El surfactante C presentó variaciones porcentuales de 28%, 29% y 30% para concentraciones de surfactante de 2%, 3% y 4%, respectivamente. Del conjunto evaluado el surfactante B generó el menor efecto sobre la mojabilidad, todas sus formulaciones alcanzaron un porcentaje cercano al 19%.

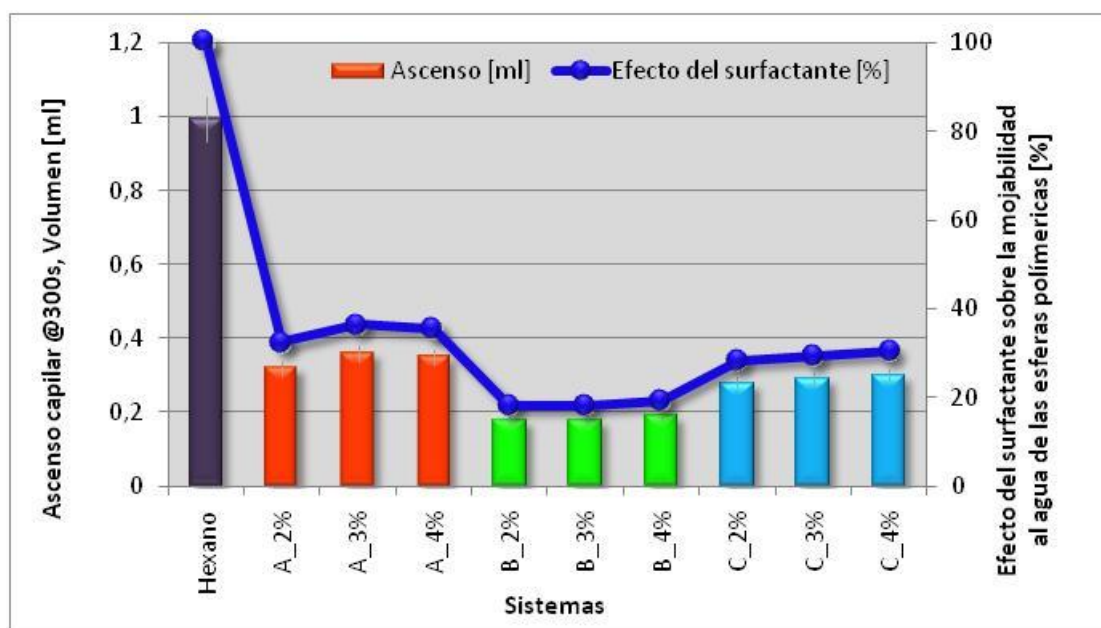


Figura 5.5: Máximo ascenso capilar para un tiempo de 300 s de las soluciones acuosas de surfactantes estudiadas junto al efecto porcentual sobre la mojabilidad al agua

5.3 EFECTO DEL SURFACTANTE SOBRE LA MOJABILIDAD DE PARTÍCULAS DE CEMENTO

Seguidamente se presentan los resultados relacionados al efecto del surfactante sobre la mojabilidad de partículas de cemento. Para medir este efecto, se utilizó la técnica de ascenso capilar descrita previamente. En esta oportunidad se colocó dentro del contenedor 4 g de cemento, y se tomó como líquido mojante el hexano, debido principalmente a su baja tensión superficial (18,4 mN/m). A diferencia del caso anterior, las partículas de cemento si son mojables al agua por lo cual se observa el fenómeno de ascenso capilar. Esta prueba nos permitirá conocer si existe alguna variación de la mojabilidad de las partículas de cemento por acción del surfactante.

El modelo de Washburn no es aplicable para partículas reactivas ni solubles en el líquido penetrante, inicialmente, se pensó que la hidratación del cemento no afectaría las pruebas por realizarse en tiempos cortos (300 s), sin embargo, el análisis de los resultados muestra que los datos obtenidos a partir de todas las

soluciones del surfactante no siguen el modelo de Washburn, se piensa que esto ocurre debido a la hidratación (reacción) de las partículas de cemento con el agua. Para el resto de las soluciones fue posible determinar el ángulo de contacto haciendo uso del modelo de Washburn.

En la Figura 5.6 se muestran las curvas de ascenso capilar para el surfactante A junto a los líquidos de referencia (agua y hexano). Aún cuando no se pudo determinar el ángulo de contacto, sigue siendo posible obtener información relevante de las pruebas, por ejemplo, el volumen de líquido penetrado es función de la mojabilidad de las partículas de esta forma variaciones en el comportamiento con respecto a la curva de referencia (agua) darán idea acerca del cambio de mojabilidad y permitirán inferir cambios en la velocidad de hidratación de las mismas.

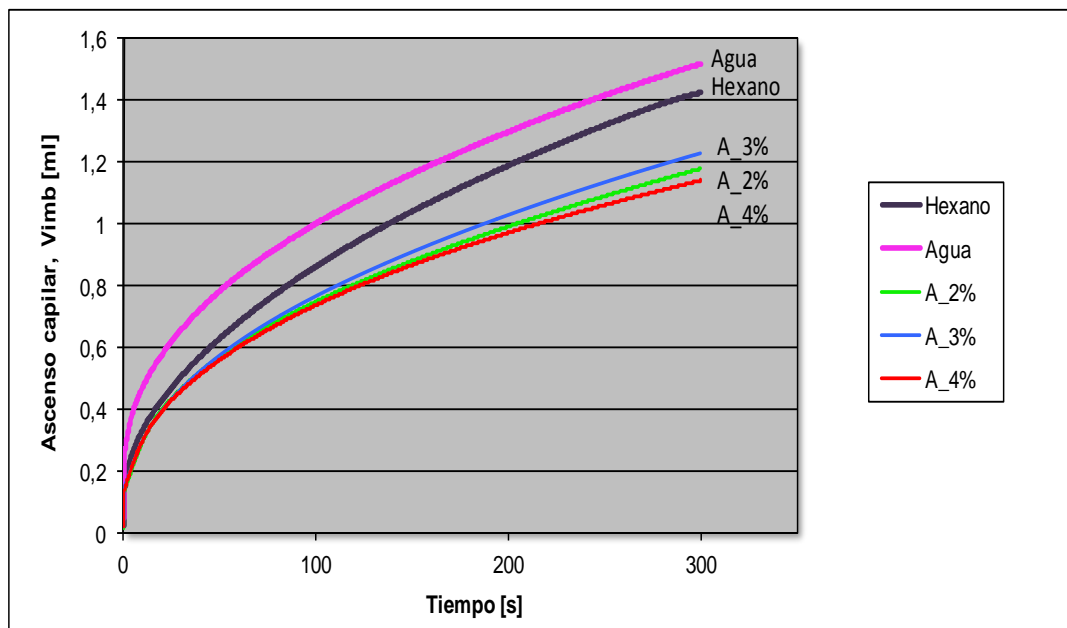


Figura 5.6: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de partículas de cemento. V_{imb} en función del tiempo

Por otra parte, las partículas de cemento no son reactivas al hexano por lo cual el volumen de líquido penetrado es sólo función de las fuerzas capilares, para estudios posteriores se recomienda utilizar líquidos orgánicos con tensiones

superficiales cercanas o iguales a las soluciones acuosas del surfactante A (28 mN/m) esto permitiría determinar que fracción del ascenso capilar se origina por efectos capilares y que parte corresponde a la hidratación.

En la Figura 5.7 se observa que el volumen de líquido penetrado para las soluciones de surfactante A es menor al obtenido para el agua, mostrando la misma tendencia para las tres concentraciones evaluadas, como se comentó previamente esto puede significar que la adsorción del surfactante sobre las partículas de cemento pueden estar provocando una variación en la mojabilidad de las mismas, haciéndolas menos mojables al agua o bien retardando el proceso de hidratación de las mismas. Esto hace necesario realizar más estudios para demostrar cual de estas hipótesis es la más acertada. Adicionalmente, se observa que el volumen de líquido penetrado es el mayor del conjunto de soluciones de surfactantes evaluadas.

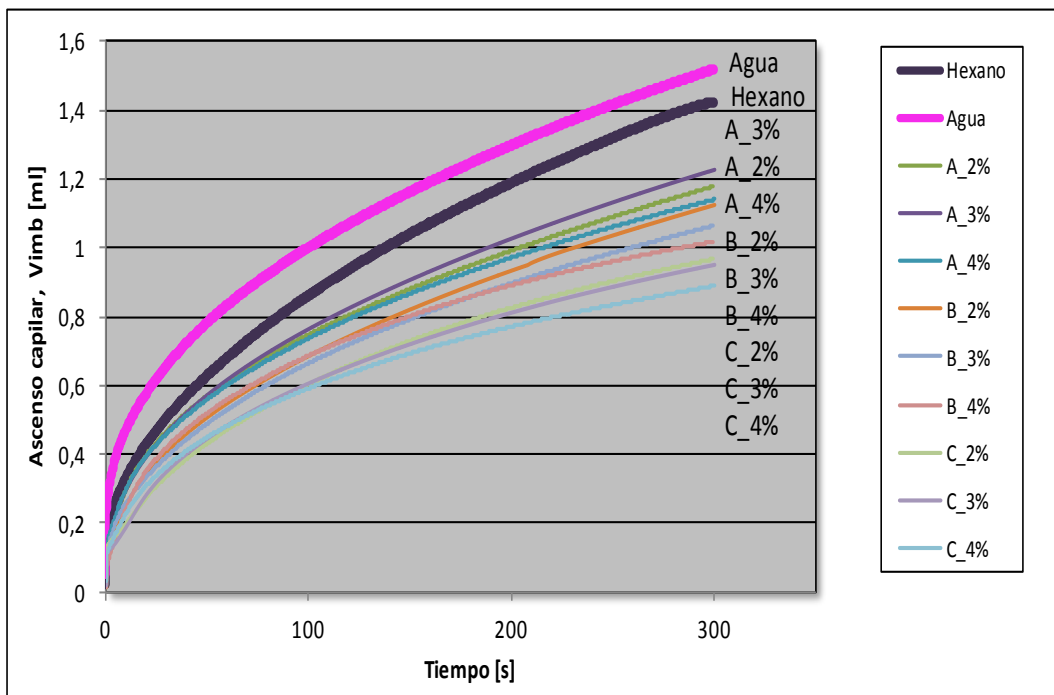


Figura 5.7: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas de los surfactantes en un empaque de partículas de cemento. V_{imb} en función del tiempo

Tal como se discutió anteriormente los datos de ascenso capilar no pueden ser correlacionados con la Ecuación de Washburn, aun cuando los datos muestren una

tendencia lineal al graficar volumen cuadrático penetrado en función del tiempo (Figura 5.8). El problema radica en lo siguiente: el procedimiento normal para determinar el ángulo de contacto es calcular la constante C , empleando la pendiente de la curva de referencia (hexano) tomando como suposición que este moja totalmente la superficie ($\theta = 0^\circ$; $\cos\theta = 1$). Una vez conocida la constante del lecho C , se procede a resolver la ecuación de Washburn para todas las demás soluciones acuosas, para ello, se determina la pendiente de cada conjunto de datos (V_{imb}^2/t es la pendiente del gráfico) y se despeja de la ecuación de Washburn el término $\cos\theta$, el cual sólo tiene valores entre 0 y 1. Ahora cuando se aplica este procedimiento al conjunto de datos obtenidos para el surfactante A se obtienen valores de $\cos\theta$ mayores a 1, lo cual no tiene sentido matemático indicando que el modelo no puede ser aplicado (Tabla 5.2).

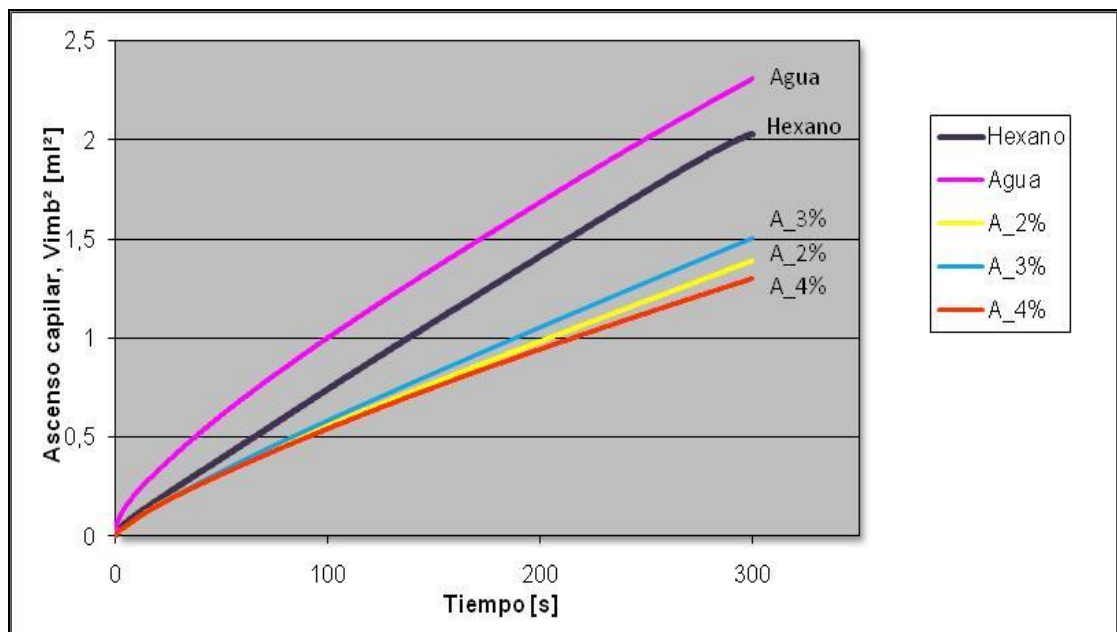


Figura 5.8: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante A en un empaque de partículas de cemento. V_{imb}^2 en función del tiempo

En resumen se puede decir que el surfactante A retrasa la penetración del agua dentro del lecho de partículas de cemento, así mismo, se piensa que puede retrasar la velocidad de hidratación, sin embargo, se requiere una prueba específica para

corroborar esto. Las pruebas funcionales sobre la lechada cementante permitirán clarificar estas hipótesis.

Tabla 5.2: Determinación ángulos de contacto sobre partículas de cemento

Líquido	Pendiente [ml ² /s]	R ²	C [cm ⁵]	Tensión superficial [±0,1 mN/m]	Viscosidad [Poise]	Cos θ	θ°
Hexano	0,0071	0,996	2,26E-06	18,5	0,00294	1	0
Agua	0,0072	0,994	2,26E-06	72	0,01002	0,89	28
A 2%	0,0045	0,996	2,26E-06	28,1	0,01002	1,41	-
A 3%	0,0049	0,997	2,26E-06	27,9	0,01002	1,55	-
A 4%	0,0042	0,994	2,26E-06	28,2	0,01002	1,32	-
B 2%	0,0042	0,998	2,26E-06	45,2	0,01002	0,82	35
B 3%	0,0037	0,997	2,26E-06	42,3	0,01002	0,77	39
B 4%	0,0034	0,984	2,26E-06	44,2	0,01002	0,68	47
C 2%	0,0032	0,995	2,26E-06	38,2	0,01002	0,74	42
C 3%	0,003	0,993	2,26E-06	38,1	0,01002	0,7	46
C 4%	0,0026	0,988	2,26E-06	38,8	0,01002	0,59	54

En la Tabla 5.2 se registran los resultados obtenidos de la determinación del ángulo de contacto para las distintas soluciones de surfactante, como se comentó previamente no fue posible aplicar el modelo para las soluciones de surfactante A. Respecto a las soluciones del surfactante B, los ángulos de contacto de las distintas soluciones son mayores que el obtenido con agua. Esto concuerda con lo observado en las curvas de ascenso capilar donde se evidencia que el volumen de líquido penetrado es menor al volumen registrado cuando se emplea sólo agua y también con respecto a la curva de referencia, se observa además que a mayor concentración de surfactante las partículas son menos mojables al agua (Figura 5.8 y 5.9). Esto es un resultado interesante, ya que puede significar que la adsorción del surfactante B disminuye la velocidad de hidratación del cemento.

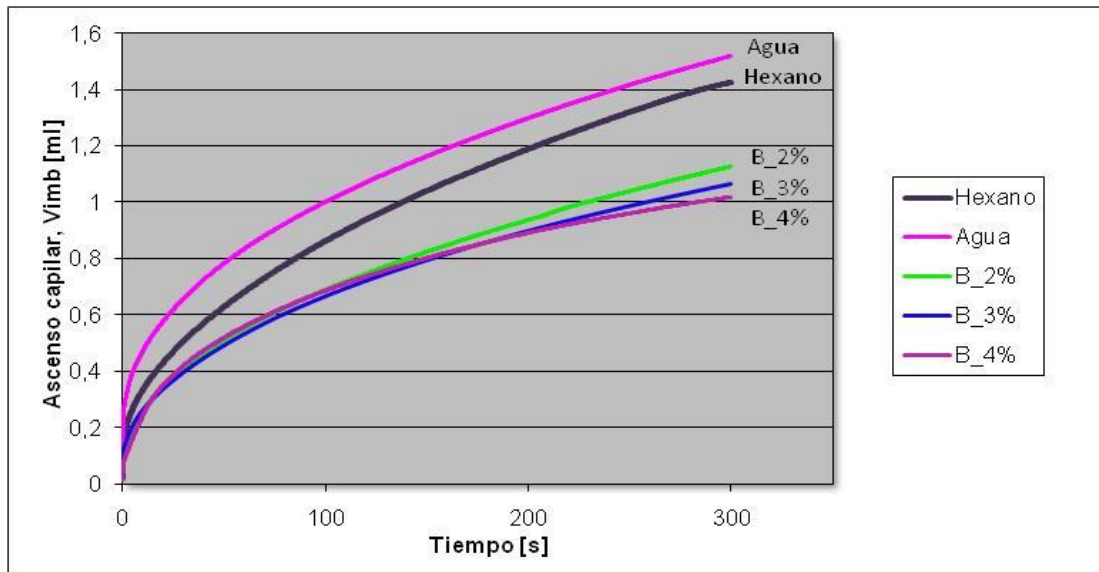


Figura 5.9. Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante B en un empaque de partículas de cemento. V_{imb} en función del tiempo

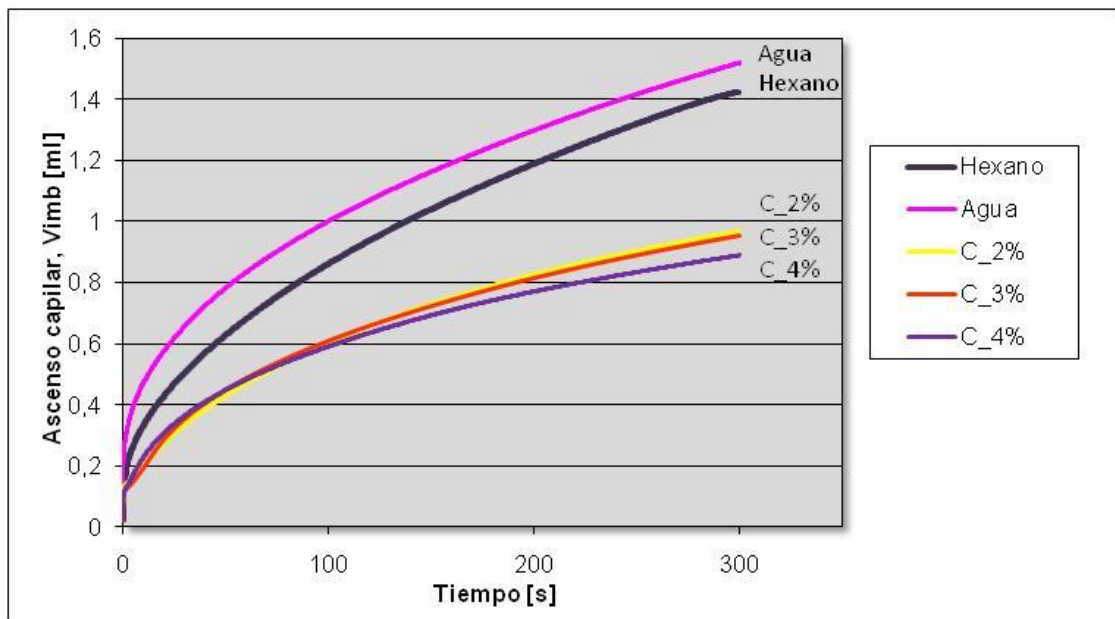


Figura 5.10: Curva de ascenso capilar para las soluciones acuosas del surfactante C en un empaque de partículas de cemento. V_{imb} en función del tiempo

Continuando con la discusión de resultados de la Tabla 5.2, respecto a las soluciones del surfactante C. Se tiene un resultado particular, cuando se compara

con el conjunto de soluciones evaluadas, en esta oportunidad los ángulos de contacto de las distintas soluciones son mayores que el obtenido con agua. Esto concuerda con lo observado en las curvas de ascenso capilar donde se evidencia que el volumen de líquido penetrado es menor al volumen registrado cuando se emplea sólo agua, también se observa que con respecto al conjunto evaluado las soluciones del surfactante C penetran menos el lecho de partículas (Figura 5.7 y 5.10). Esto puede ser debido a la adsorción del surfactante sobre las partículas de cemento evitando su hidratación, de esta forma las partículas se comportan como no-reactivas y el fenómeno de ascenso es debido principalmente por fuerzas capilares. Si esta hipótesis es correcta el surfactante C pudiera retardar el fraguado de la lechada cementante, las pruebas funcionales podrán verificar esto. Es posible que la adsorción del surfactante sobre las partículas de cemento ayude o fomente la adhesión de estas sobre las esferas poliméricas, permitiendo una mejor distribución en la matriz cementante y logre evitar problemas de segregación durante la etapa de mezclado y fraguado.

5.4 EVALUAR LAS PROPIEDADES DE CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO PETROLERO

El cemento, debe cumplir con unas condiciones llamadas control de calidad del cemento entre ellas se encuentra, fluido libre, tiempo de espesamiento y resistencia a la compresión destructivo, con el fin que el mismo sea apto para ser utilizado en los procesos de cementación.

En la norma API 10A / ISO 10426-1, se tiene que el fluido libre para el cemento clase H no puede ser mayor a 5,9 %. Para el lote 174 de cemento clase H, se obtuvo un volumen de fluido de 4,7 ml, para una masa de lechada de 790,65 g, utilizando la ecuación 3.9 se tiene que el porcentaje de fluido libre es de 1,18 %, por tal resultado esta propiedad se encuentra entre los límites recomendados.

Para el tiempo de bombeabilidad se tiene según la norma antes mencionada, que para los cementos clase G y H el tiempo debe estar entre 90 y 120 min, para

alcanzar una consistencia de 100 Bc, donde termina el ensayo, a su vez de esto en los primeros 30 min del ensayo la consistencia no debe ser mayor a 30 Bc, en la Figura 5.11 se puede observar que el tiempo de bombeabilidad de la lechada es de una hora con 54 minutos (1:54 hr:min), y la consistencia en los primeros 30 min no pasa de los 30 Bc, con los resultados obtenidos para este ensayo el sistema cumple con las condiciones antes descritas.

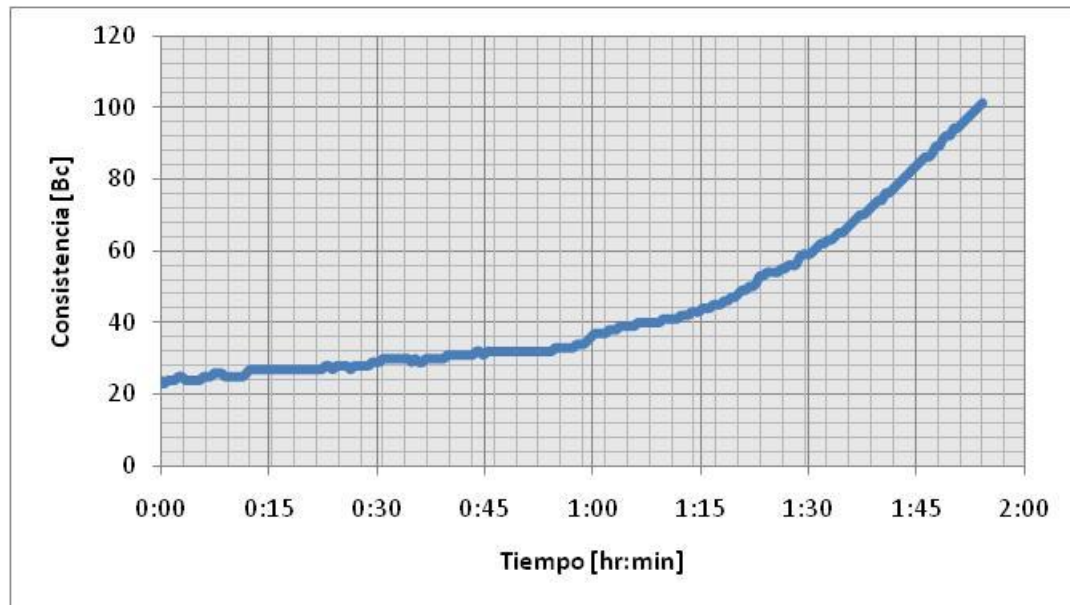


Figura 5.11: Tiempo de Bombeabilidad de la lechada agua/ cemento.

En el ensayo de resistencia a la compresión modo destructivo se debe curar los cubos de cemento durante ocho (8) horas a las temperaturas de 100 °F y 140 °F a presión atmosférica, para la temperatura de 100 °F la resistencia debe ser mayor e igual que 300 psi y para 140 °F de mayor e igual que 1500 psi.

Tabla 5.3: Resistencia a la compresión a temperatura de 100 °F, tiempo de curado 8 horas.

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,81	50,87	2585	530,346	561
Cubo 2	50,33	50,83	2558	564,854	
Cubo 3	51,12	50,86	2600	579,796	
Cubo 4	50,9	50,36	2563	568,191	

Tabla 5.4: Resistencia a la compresión a temperatura de 140 °F, tiempo de curado 8 horas.

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,67	50,93	2581	1830,43	1844
Cubo 2	50,79	50,85	2583	1969,96	
Cubo 3	50,94	50,83	2589	1925,85	
Cubo 4	50,87	51,04	2596	1648,94	

En las tablas 5.3 y 5.4, se observa el valor promedio de la resistencia a la compresión a las distintas temperaturas de curado, donde la lechada agua/cemento cumple con los valores establecidos por la norma.

5.5 EVALUAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL SISTEMA CEMENTANTE CON SURFACTANTE Y SISTEMA COMERCIAL

El lodo utilizado en el área de estudio para el hoyo productor es un fluido de tipo emulsión directa de 8 lb/gal de densidad, con propiedades que se muestran en la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Propiedades recomendadas del fluido de perforación, hoyo productor 8½", [Programa de ingeniería de perforación, 2010]

Propiedades	Rangos
Viscosidad [s/qt]	50 – 65
Punto cedente [lb/100 pies ²]	12 – 16
Viscosidad plástica [cP]	20 – 25
Gel 10" [s]	3 – 6
Gel 10' [min]	4 – 8
Filtrado API [cc/30 min]	< 5,0
Sólidos según Retorta [%]	< 6

Es importante conocer las propiedades requeridas del fluido de perforación y el rango en que se puede manejar el mismo ya que se tiene la jerarquización de fluidos, el cual consiste en el desplazamiento de los fluidos que se encuentran en el pozo, donde el fluido que desplaza debe tener mayor viscosidad y punto cedente que el anterior a él.

La lechada a utilizar en el área de Tía Juana debe tener propiedades características para evitar daños posteriores, dicha propiedades se observan en la tabla 5.6, el sistema cementante debe ser lechada única y antimigratoria.

Tabla 5.6: Propiedades del sistema cementante a utilizar en el área de estudio, hoyo productor 8½", [Programa de ingeniería de perforación, 2010]

Propiedades	
Densidad [lb/gal]	13,6
Punto cedente [lb/100 pies ²]	24,44
Viscosidad plástica [cP]	153,59
Tiempo de fraguado [hr:min]	3:36
Temperatura Estática [°F]	150
Temperatura Circulante [°F]	125
Filtrado API [ml/30 min]	34
Resistencia a la compresión 24 hr [Lppc]	1200

El estudio de las propiedades de un sistema cementante, es de gran importancia ya que se debe conocer el comportamiento de la lechada a condiciones de pozo, para saber si el sistema es recomendable usarlo, debido a que el mismo es quien le puede dar mayor vida productiva al pozo.

5.5.1 Sistema Blanco

En el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica fue de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 10,9 lb/gal el cual es aceptable ya que la balanza tiene un error de $\pm 0,1$ lb/gal. Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema.

Para el sistema Blanco, se realizaron una serie de ensayos que se describen en el marco metodológico, la estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cementación estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, después de las consideraciones anteriores en la tabla 5.7 se puede observar que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 11,64 y 11,69 lb/gal con una desviación estándar de 0,04.

Abundando al respecto, Pardey (1997) precisa que, el colapso de las esferas puede estar asociado a varios factores en conjunto: el desalojo de aire en la mezcla, el colapso de las partículas de poliestireno y el deterioro de las partículas durante el proceso de mezclado. Los ensayos realizados por dichos autores demuestran que hay cierta cantidad de partículas que colapsan en un rango de presiones de 1000 y 2000 psi y otra cantidad de partículas a presiones menores de 1000 psi, esto se debe a que hay esferas de poliestireno con mayor grado de expansión donde las mismas son más delgadas que otras. De acuerdo con ello el aumento de densidad

de los resultados expuestos se debe a que el aditivo extendedor (LITECEM®) colapsa ya que la presión utilizada para este ensayo es de 3000 psi siendo mayor a la del colapso del mismo.

Tabla 5.7: Ensayo de estabilidad del sistema Blanco

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	39,53	28,80	11,43	11,64
	Medio	34,84	24,44	11,87	
	Base	37,67	27,05	11,60	
Muestra 2	Tope	40,35	28,99	11,59	11,69
	Medio	35,95	25,19	11,89	
	Base	39,42	28,36	11,58	

Con respecto a la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.8 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.9 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9931.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.8: Datos de reología del sistema Blanco

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	17,5	1,71	18,64	0,232	1,270
2	22	3,41	23,43	0,533	1,370
3	26	5,12	27,69	0,709	1,442
6	34,5	10,23	36,74	1,010	1,565
10	46,5	17,05	49,52	1,232	1,695
20	65,5	34,10	69,76	1,533	1,844
30	78	51,15	83,07	1,709	1,919
60	114	102,30	121,41	2,010	2,084
100	136	170,50	144,84	2,232	2,161
200	211	341,00	224,72	2,533	2,352
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.9: Modelos reológicos del sistema Blanco

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	270,59	37,64	----	----	0,9761
Ley de Potencia	----	----	12,62	0,4924	0,9931

En la Figura 5.12 se observa tres líneas que representan gráficamente los resultados obtenidos del sistema Blanco, el modelo Plástico de Bingham y el modelo Ley de Potencia, donde se puede apreciar que los resultados obtenidos en el tabla 5.9 coinciden con dicha figura.

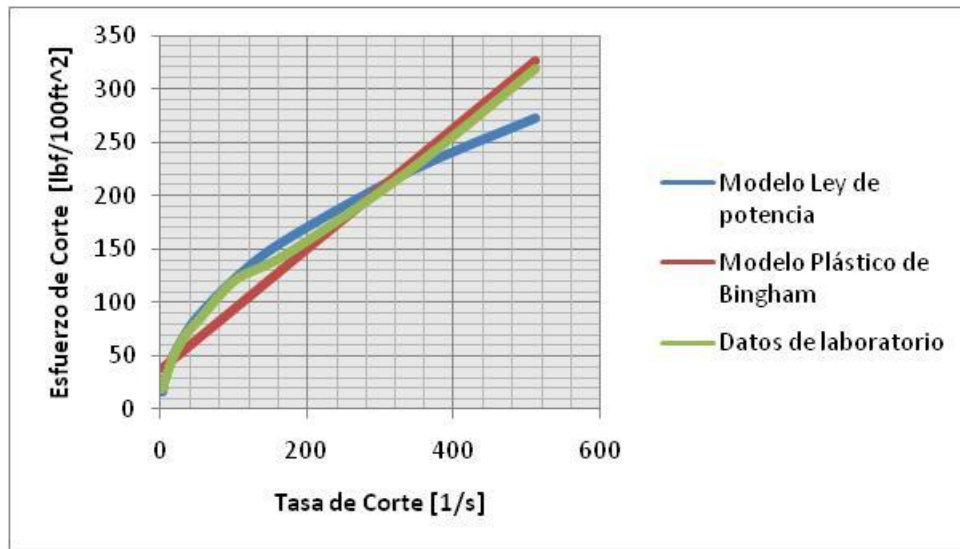


Figura 5.12: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco.

En el ensayo de pérdida de filtrado los sistemas cementantes se diseñan para que el mismo no se deshidrate, esto se logra agregándole un aditivo controlador de filtrado, donde el valor promedio no debe ser mayor a 30 ml. Con respecto al sistema Blanco, en la figura 5.13 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 11,2 ml para el sistema.

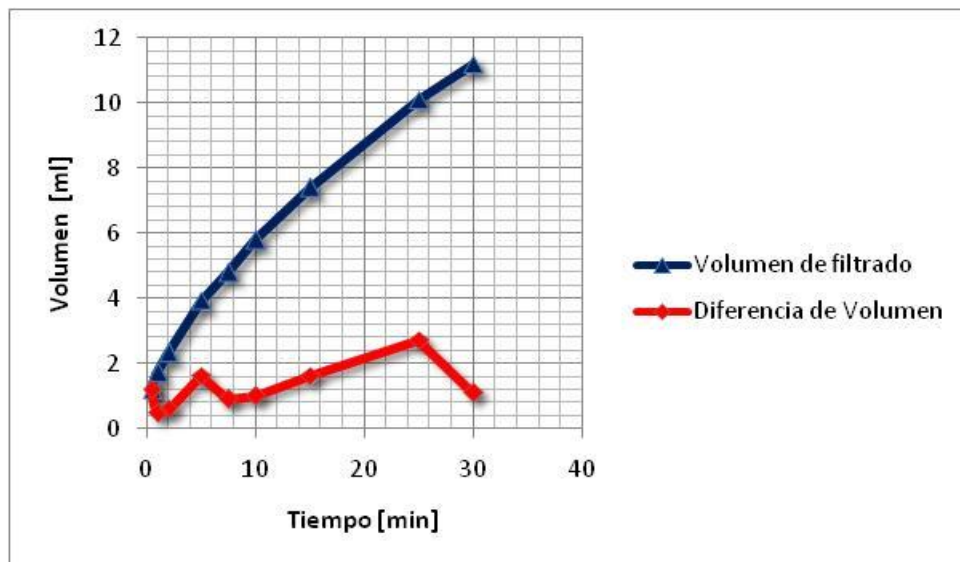


Figura 5.13: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie, el promedio de la permeabilidad para un sistema cementante (agua y cemento) es de 0,001 mD. El sistema Blanco tiene una permeabilidad promedio para las muestras 2 y 4 de 0,004 mD como se observa en la tabla 5.10, donde este valor tiene una desviación estándar de 0,001, las muestras 1 y 3 no son representativas porque las mismas se separaron del anillo permitiendo el paso del fluido por el espacio existente entre el anillo y la muestra.

Tabla 5.10: Permeabilidad del sistema Blanco

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	3:35	1	0,470	0,004
2		15	0,04	0,004	
3		2:20	1	0,722	
4		15	0,03	0,003	

El tiempo de bombeabilidad para este sistema se observa en la figura 5.14 el cual corresponde de 2 horas con 6 minutos aproximadamente incluyendo el tiempo de premezclado de 30 minutos, en dicha figura se puede observar el comportamiento de la lechada en cuanto a la disminución de la viscosidad por el aumento de la temperatura, cuando se simulan las condiciones del pozo la temperatura circulante y la presión de la columna hidrostática, en el transcurso del ensayo la consistencia va aumentando hasta que es sistema deje de ser bombeable.

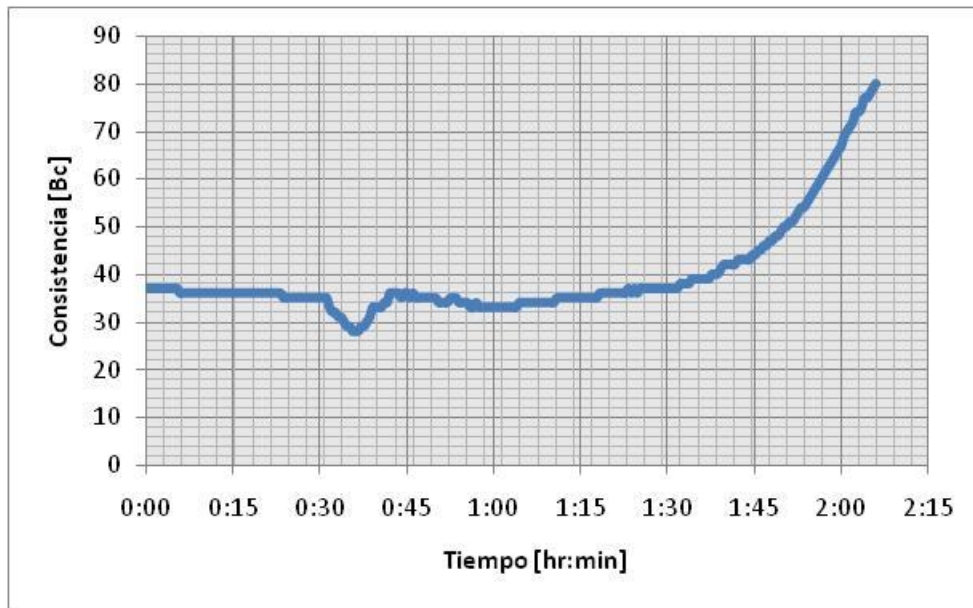


Figura 5.14: Grafica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco

Para realizar la prueba de resistencia a la compresión, los cubos deben estar curados a las condiciones del pozo durante veinticuatro horas, los mismos son ensayados para obtener el valor de la resistencia a la compresión, para el sistema Blanco se obtiene una resistencia promedio de 1179 psi con una desviación estándar de 115, este valor promedio se observa en la tabla 5.11, el aumento de resistencia del cubo numero 1 al cubo numero 4 puede ser que el cubo 1 tenga mayor cantidad de del aditivo extendedor que el resto, esto se debe a como se vierte la mezcla.

Tabla 5.11: Resistencia a la compresión del sistema Blanco

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,81	46,45	2360	1043,52	1179
Cubo 2	50,96	44,92	2289	1124,54	
Cubo 3	50,89	45,52	2317	1253,73	
Cubo 4	50,9	45,26	2304	1293,08	

5.5.2 Sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Para el sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11 lb/gal el cual corrobora el valor teórico calculado. Los sistemas cementantes se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para dicho sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia de densidad entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiada no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.12 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 11,23 y 11,37 lb/gal con una desviación estándar de 0,10. Resulta oportuno que para las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe a que puede haber aire entrampado en el sistema cementante, ya que el surfactante A genera mucha espuma cuando se procede a la mezcla de la lechada.

Tabla 5.12: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	29,36	22,47	10,88	11,23
	Medio	31,85	23,1	11,49	
	Base	33,18	24,42	11,32	
Muestra 2	Tope	30,05	22,91	10,93	11,37
	Medio	33,22	23,67	11,69	
	Base	33,72	24,45	11,49	

Con respecto a la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.13 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.14 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9972.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.13: Datos de reología sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	20	1,71	21,30	0,232	1,328
2	28,5	3,41	30,35	0,533	1,482
3	33	5,12	35,15	0,709	1,546
6	48	10,23	51,12	1,010	1,709
10	63	17,05	67,10	1,232	1,827
20	91	34,10	96,92	1,533	1,986
30	109	51,15	116,09	1,709	2,065
60	150	102,30	159,75	2,010	2,203
100	200	170,50	213,00	2,232	2,328
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.14: Modelos reológicos para el sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	297,55	59,47	----	----	0,8880
Ley de Potencia	----	----	16,38	0,4944	0,9972

En función a lo antes expuesto, en la figura 5.15 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco + Surfactante A 0,8 gal/sx donde el modelo reológico Ley de Potencia se solapa con los datos de laboratorio corroborando lo antes dicho.

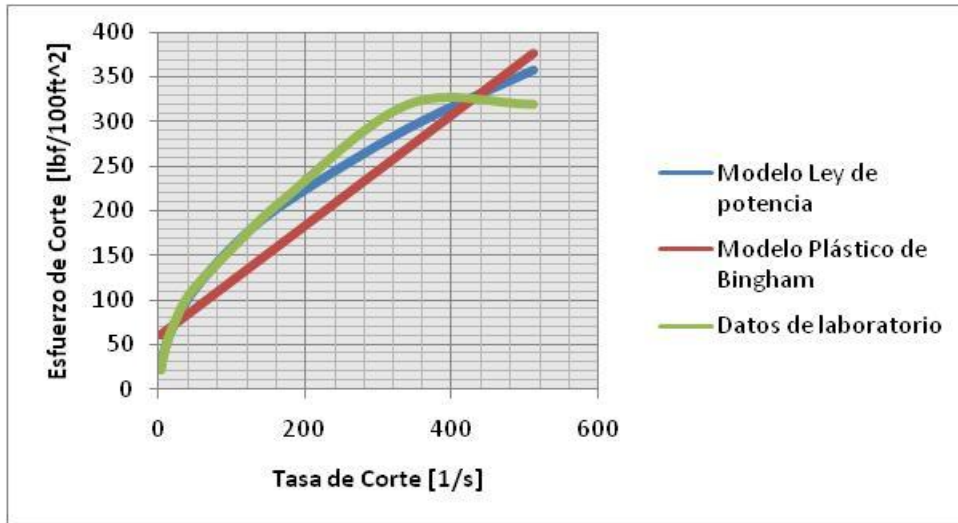


Figura 5.15: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

El volumen de filtrado para este sistema disminuye en comparación del sistema Blanco, esto se debe a la incorporación del surfactante. El volumen de filtrado para este sistema se observa en la figura 5.16, el cual es de 8 ml, donde se nota una diferencia de 3,2 ml con respecto al sistema anterior; continuando, también se puede observar que en los primeros 30 s es el momento crítico del sistema al filtrar la mayor cantidad de volumen acumulado.

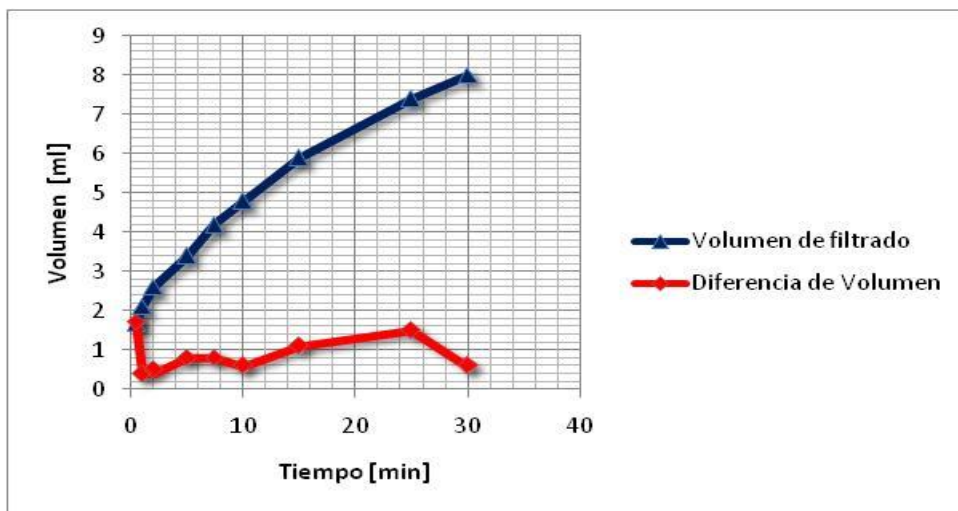


Figura 5.16: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. Para este sistema tiene una permeabilidad promedio para las muestras 2 y 4 de 0,003 mD como se observa en la tabla 5.15, donde este valor tiene una desviación estándar de 0,000, las muestras 1 y 3 no son representativas porque las mismas se separaron del anillo permitiendo el paso del fluido por el espacio existente entre el anillo y la muestra.

Tabla 5.15: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	10:42	0,7	0,110	0,003
2		15	0,03	0,003	
3		1:37	1	1,042	
4		15	0,03	0,003	

El tiempo de bombeabilidad para este sistema es de dos horas con seis minutos aproximadamente como se observa en la figura 5.17, a pesar de que este sistema tiene una concentración de 0,8 gal/sx el tiempo no se ve afectado, ya que se espera que aumente el mismo por el uso de surfactantes ya que retardan la hidratación de las partículas de cemento.

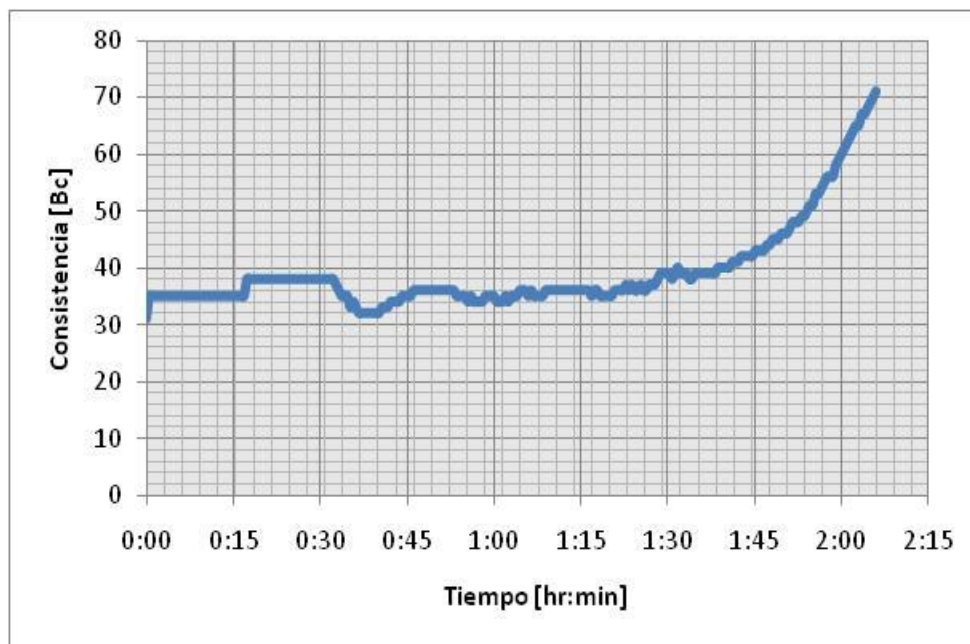


Figura 5.17: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Continuando con la evaluación del sistema, en la tabla 5.16 se observa el valor promedio de la resistencia a la compresión, donde el mismo es de 1537 psi con una desviación estándar de 65 psi, de igual manera se observa que los cubos presentan una disminución en su volumen por el colapso de las esferas poliméricas.

Tala 5.16: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 0,8 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,96	36,93	1882	1444,81	1537
Cubo 2	51,16	37,25	1906	1554,95	
Cubo 3	50,95	37,92	1932	1551,69	
Cubo 4	51,14	39,85	2038	1595,98	

5.5.3 Sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Para el sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx, el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11,1 lb/gal el cual es aceptable ya que la balanza tiene un error de $\pm 0,1$ lb/gal. Los sistemas cementantes se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiada no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.17 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 11,59 y 11,43 lb/gal con una desviación estándar de 0,12. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe a que puede haber aire entrampado en el sistema cementante, ya que el surfactante A genera mucha espuma cuando se procede a la mezcla de la lechada, teniendo en cuenta que la concentración del mismo aumenta a 1,2 gal/sx.

Tabla 5.17: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	36,52	26,01	11,70	11,59
	Medio	35,47	25,82	11,44	
	Base	35,58	25,45	11,65	
Muestra 2	Tope	35,81	25,99	11,48	11,43
	Medio	36,71	27,19	11,25	
	Base	38	27,36	11,57	

Con respecto a la reología de los sistemas cementantes, para Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.18 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.19 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9956.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.18: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	22	1,71	23,43	0,232	1,370
2	28,5	3,41	30,35	0,533	1,482
3	32,5	5,12	34,61	0,709	1,539
6	45,5	10,23	48,46	1,010	1,685
10	62	17,05	66,03	1,232	1,820
20	90	34,10	95,85	1,533	1,982
30	110,5	51,15	117,68	1,709	2,071
60	155	102,30	165,08	2,010	2,218
100	198,5	170,50	211,40	2,232	2,325
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.19: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	297,60	59,65	----	----	0,8860
Ley de Potencia	----	----	16,67	0,4903	0,9956

Por lo antes expuesto, en la figura 5.18 se observa la gráfica de los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco + Surfactante A 1,2 gal/sx donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado.

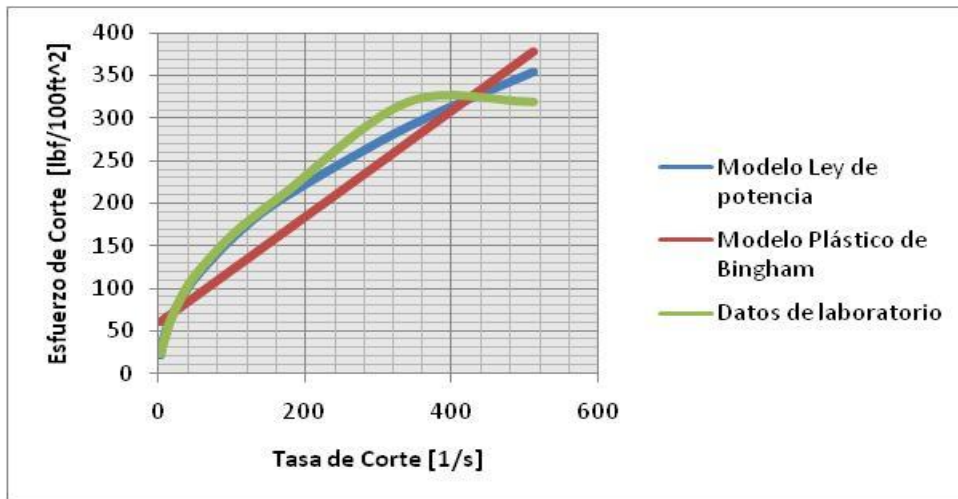


Figura 5.18: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

El volumen de filtrado para este sistema disminuye en comparación del sistema Blanco, esto se debe a la incorporación del surfactante. El volumen de filtrado para este sistema se observa en la figura 5.19, el cual es de 9,5 ml, donde se nota una diferencia de 1,7 ml con respecto al sistema base (Blanco); continuando, también se puede observar que en la diferencia de tiempo de 10 min (del minuto 15 al 25) es el momento crítico del sistema al filtrar la mayor cantidad de volumen acumulado.

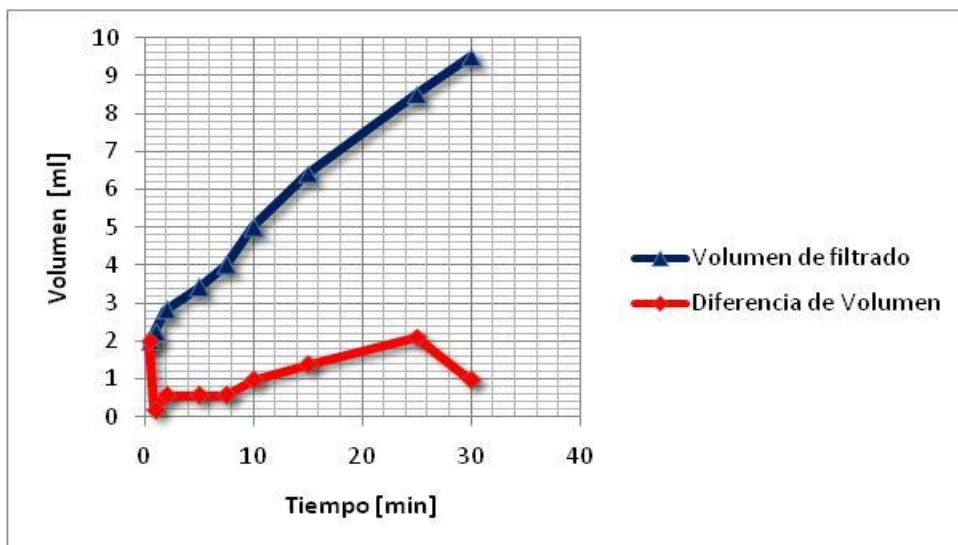


Figura 5.19: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. Para este sistema tiene una permeabilidad promedio de las muestras de 0,016 mD como se observa en la tabla 5.20, donde este valor tiene una desviación estándar de 0,013.

Tabla 5.20: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,02	0,002	0,016
2		15:00	0,11	0,012	
3		15:00	0,29	0,033	
4		15:00	0,18	0,020	

El tiempo de bombeabilidad se observa en la figura 5.20, obteniendo un valor de 2 horas con 50 minutos aproximadamente, así como se ve que la lechada tiene un comportamiento adecuado cuando esta a las condiciones del pozo en la cual disminuye la viscosidad al aumentar la temperatura. Al utilizar mayor concentración de surfactante el tiempo es mayor, como se puede notar en comparación del sistema Blanco.

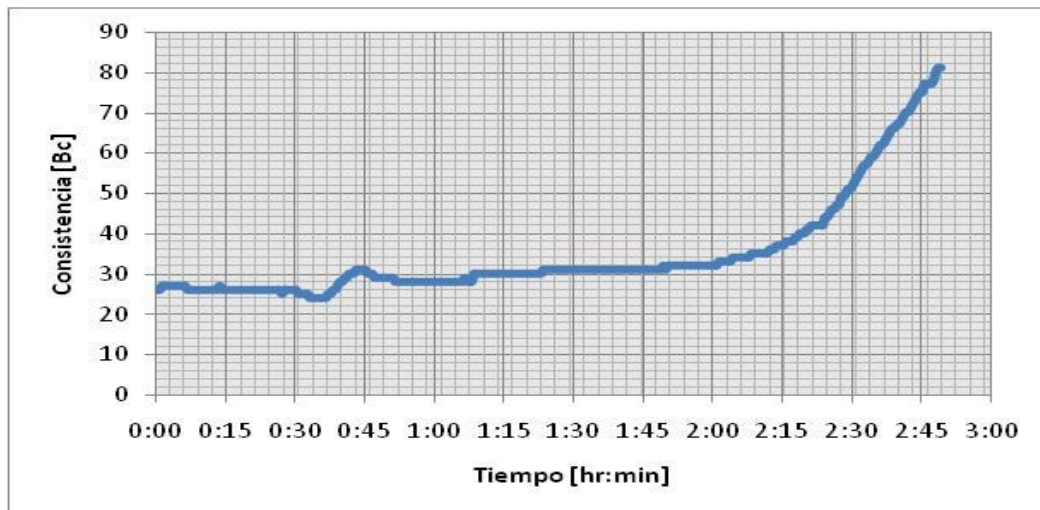


Figura 5.20: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Continuando con la evaluación del sistema, en la tabla 5.21 se observa el valor promedio de la resistencia a la compresión, donde el mismo es de 1587 psi con una desviación estándar de 32 psi, de igual manera se observa que los cubos presentan una disminución en su volumen por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.21: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 1,2 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	51,96	40,58	2109	1557,07	1587
Cubo 2	51,2	41,12	2105	1595,77	
Cubo 3	51,02	40	2041	1564,98	
Cubo 4	50,97	40,34	2056	1628,27	

5.5.4 Sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

El sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx, el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11,1 lb/gal el cual es aceptable ya que la balanza utilizada tiene un error de 0,1 lb/gal. Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para el sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiada no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.22 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,93 lb/gal

con una desviación estándar de 0,00. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que por las características propias del aditivo polimérico utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero se tiene una diferencia de 2 lb/gal, esto puede deberse a la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.22: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	38,32	25,22	12,66	12,93
	Medio	37,4	23,81	13,08	
	Base	37,62	24,02	13,05	
Muestra 2	Tope	45,12	29,72	12,65	12,93
	Medio	43,82	27,92	13,07	
	Base	41,98	26,77	13,06	

Con respecto a la reología de los sistemas cementantes, en otras páginas del trabajo, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.23 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades

de 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.24 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9867.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.23: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	17	1,71	18,11	0,232	1,258
2	26,5	3,41	28,22	0,533	1,451
3	32	5,12	34,08	0,709	1,532
6	48,5	10,23	51,65	1,010	1,713
10	62,5	17,05	66,56	1,232	1,823
20	95	34,10	101,18	1,533	2,005
30	123	51,15	131,00	1,709	2,117
60	188	102,30	200,22	2,010	2,302
100	262,5	170,50	279,56	2,232	2,446
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.24: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	302,30	69,23	----	----	0,7924
Ley de Potencia	----	----	14,76	0,5350	0,9867

Por lo antes expuesto, en la figura 5.21 se observa la gráfica de los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco + Surfactante A 1,6 gal/sx donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

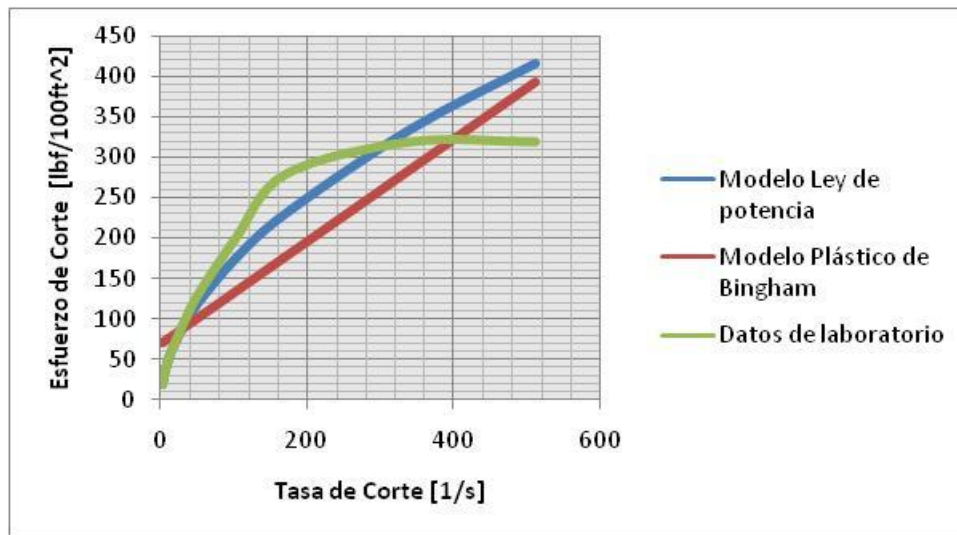


Figura 5.21: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

El volumen de filtrado para este sistema disminuye en comparación del sistema Blanco, esto se debe a la incorporación del surfactante. El volumen de filtrado para este sistema se observa en la figura 5.22, el cual es de 6,5 ml, donde se nota una diferencia de 4,7 ml con respecto al sistema base (Blanco); continuando, también se puede observar que en los primeros 30 s es el momento crítico del sistema al filtrar 1,5 ml, siendo la mayor cantidad de volumen acumulado.

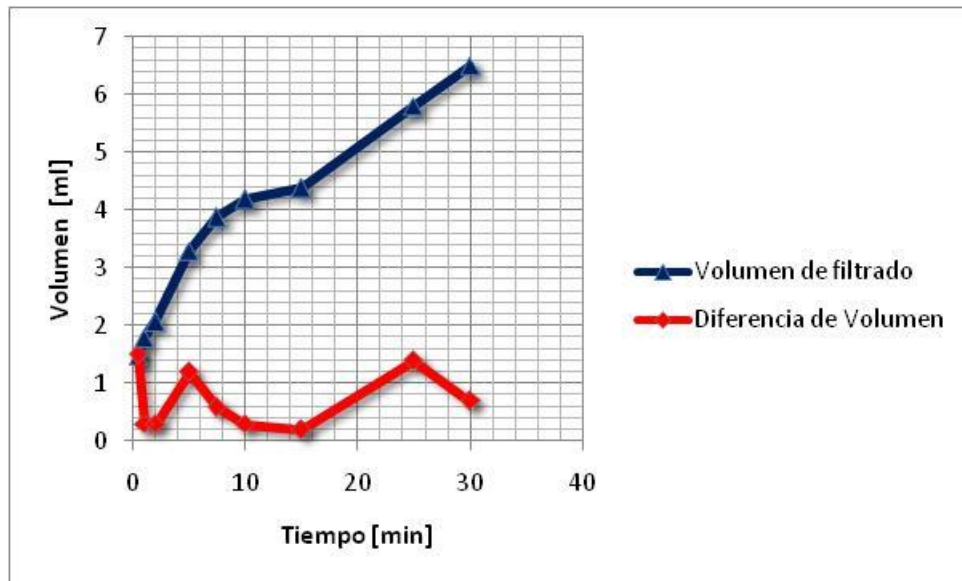


Figura 5.22: Grafica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. Para este sistema tiene una permeabilidad promedio de las muestras de 0,019 mD como se observa en la tabla 5.25, donde este valor tiene una desviación estándar de 0,018.

Tabla 5.25: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,32	0,036	0,019
2		15:00	0	0,000	
3		15:00	0	0,000	
4		15:00	0,01	0,001	

El tiempo de bombeabilidad es de 3 horas con 20 minutos aproximadamente (ver figura 5.23), la lechada de este sistema tiene un comportamiento de disminución de viscosidad cuando aumenta la temperatura esto ocurre después de 30 minutos de premezclado a condiciones de superficie presión atmosférica y 80° F. En

comparación al sistema base, se observa un incremento en el tiempo esto de debe a la concentración de surfactante utilizada ya que retrasa la hidratación de las partículas.

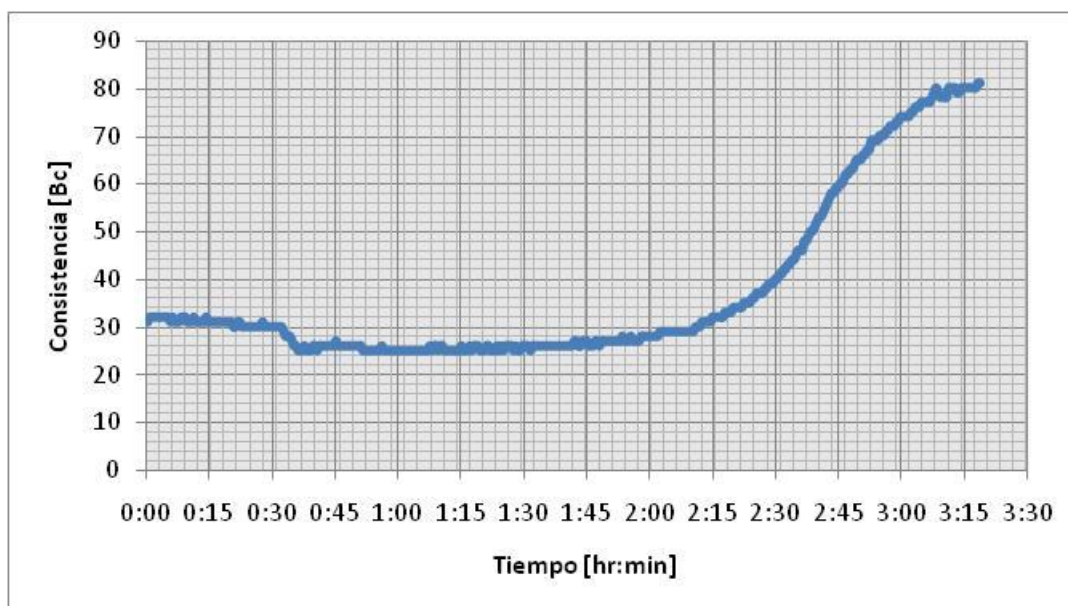


Figura 5.23: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

La resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx tiene un valor promedio de 1559 psi con una desviación estándar de 79 psi, donde el valor promedio se observa en la tabla 5.26, de igual manera los cubos tienen una reducción de tamaño considerable por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.26: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante A, 1,6 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	51,4	35,59	1829	1607,97	1559
Cubo 2	51,05	33,25	1697	1624,1	
Cubo 3	51,39	35,64	1832	1553,4	
Cubo 4	51,07	37,7	1925	1449,47	

5.5.5 Sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

El sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx, el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 10,9 lb/gal el cual es aceptable ya que la balanza utilizada tiene un error de 0,1 lb/gal. Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.27 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 13,06 y 13,08 lb/gal con una desviación estándar de 0,01. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo polimérico utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero se tiene una diferencia de aproximada 2 lb/gal, esto puede deberse a la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.27: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	40,53	26,04	12,97	13,06
	Medio	40,18	25,48	13,14	
	Base	39,41	25,08	13,09	
Muestra 2	Tope	36,43	23,21	13,07	13,08
	Medio	40,07	25,5	13,09	
	Base	37,52	23,91	13,07	

Con respecto a la reología de los sistemas cementantes, en otras paginas del trabajo, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta ultima tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.28 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.29 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9783. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.24, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste ente las curvas que en las tasas de cortes mas altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.28: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	28	1,71	29,82	0,232	1,475
2	42,5	3,41	45,26	0,533	1,656
3	50,5	5,12	53,78	0,709	1,731
6	73	10,23	77,75	1,010	1,891
10	87,5	17,05	93,19	1,232	1,969
20	123,5	34,10	131,53	1,533	2,119
30	151,5	51,15	161,35	1,709	2,208
60	208	102,30	221,52	2,010	2,345
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.29: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	280,35	94,72	----	----	0,7191
Ley de Potencia	----	----	26,75	0,4384	0,9783

En lo expresado anteriormente, la figura 5.24 se observa la gráfica de los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco + Surfactante C 0,8 gal/sx donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

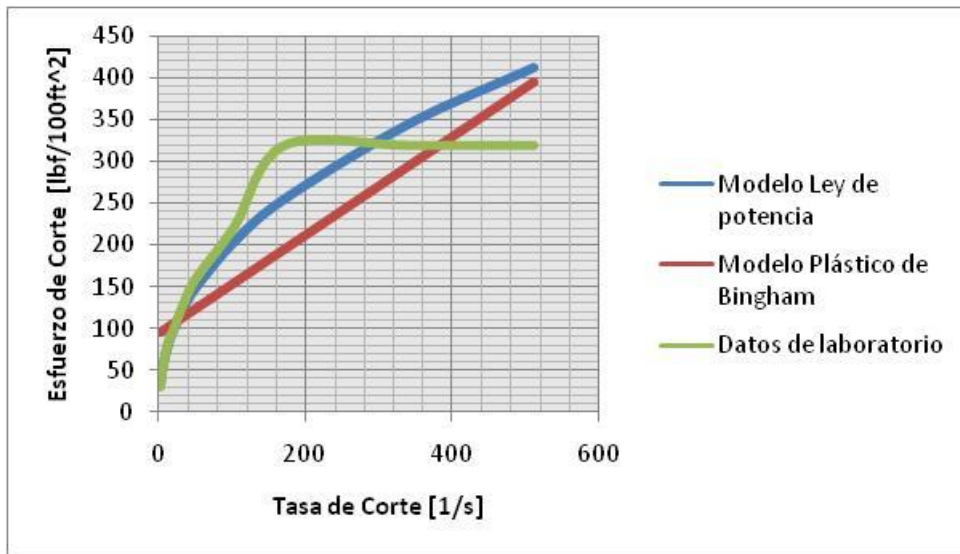


Figura 5.24: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

En la figura 5.25 se observa el volumen de filtrado y el volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx, donde el mismo tiene un valor máximo de 4,9 ml y una diferencia de volumen de 1,1 ml en la diferencia de tiempo de 10 min (entre el minuto 15 y 25). En comparación con el sistema base el sistema tiene una reducción en el volumen de filtrado, siendo la diferencia de 6,3 ml.

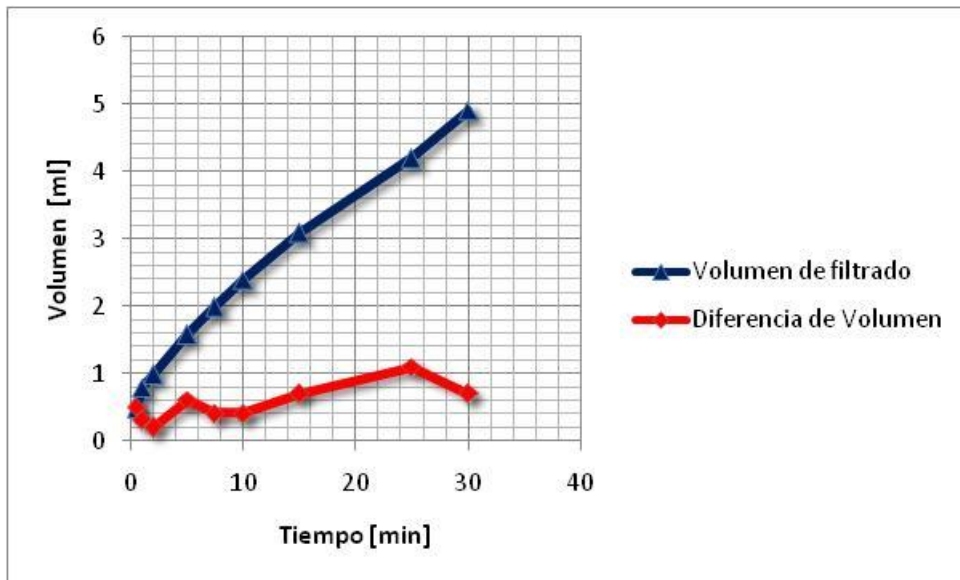


Figura 5.25: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. Para este sistema tiene una permeabilidad promedio de las muestras de 0,011 mD como se observa en la tabla 5.30, donde este valor tiene una desviación estándar de 0,010. Para este valor promedio no se tomo en cuenta la muestra 4, ya que la misma se despego de la pared del anillo permitiendo el paso del fluido en el espacio existente de ambos elementos.

Tabla 5.30: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0	0,000	0,011
2		15:00	0,08	0,009	
3		15:00	0,21	0,024	
4		3:22	1	0,500	

El tiempo de bombeabilidad es de 2 horas con 55 minutos aproximadamente para dicho sistema, como se observa en la figura 5.26; continuando con las observaciones, luego del tiempo de premezclado a condiciones de superficie, la viscosidad disminuye por efectos del aumento de la temperatura hasta llegar a las condiciones del pozo. En relación con este ultimo sistema, el tiempo se ve incrementado en comparación al sistema base, esto se debe por la interacción existente entre las partículas de cemento y el surfactante.

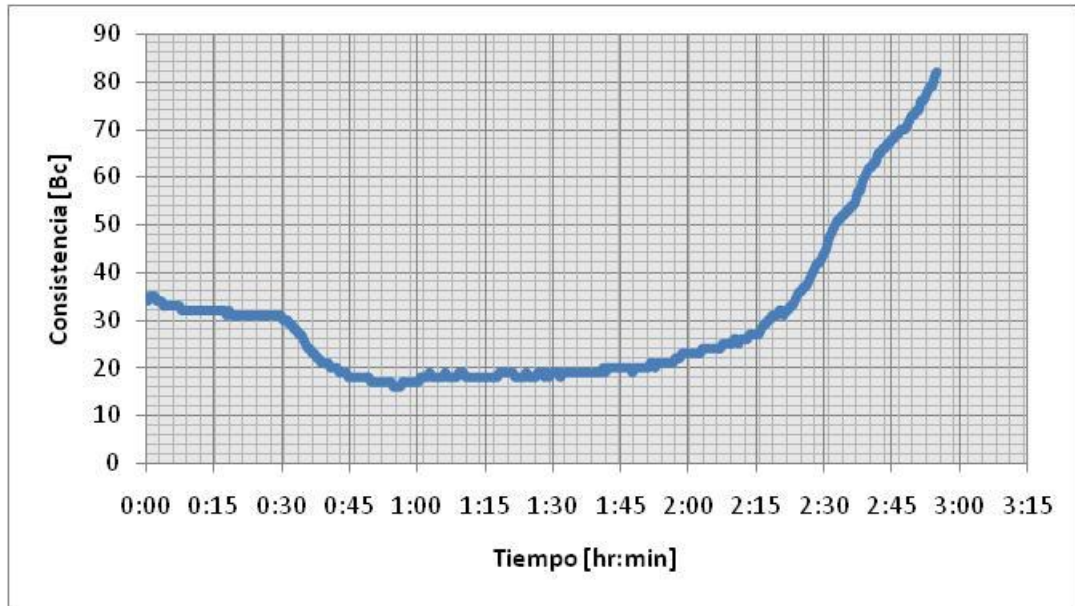


Figura 5.26: Grafica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

La resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx tiene un valor promedio de 1762 psi, el cual se puede observar en la tabla 5.31 con una desviación estándar de 90 psi, de igual manera, los cubos presentan una reducción de tamaño considerable, esto se debe al colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.31: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 0,8 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,93	39,09	1991	1872,85	1762
Cubo 2	50,87	37,89	1927	1784,5	
Cubo 3	50,91	38,55	1963	1659,89	
Cubo 4	50,91	37,44	1906	1731,04	

5.5.6 Sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx

El sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx, se utilizó un balance de masa para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando

como resultado en la práctica una densidad de 11,1 lb/gal el cual es aceptable ya que la balanza utilizada tiene un error de 0,1 lb/gal. Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el mismo puede afectar las propiedades del sistema en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; así mismo el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para dicho diseño.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.32 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 13,12 y 13,11 lb/gal con una desviación estándar de 0,01. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero se tiene una diferencia de aproximada 2 lb/gal, esto puede deberse a la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.32: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx,

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	37,58	23,83	13,14	13,12
	Medio	36,19	22,99	13,11	
	Base	39,54	25,11	13,12	
Muestra 2	Tope	33,46	21,29	13,09	13,11
	Medio	33,92	21,54	13,12	
	Base	37,83	24,02	13,12	

Continuando con los ensayos pertinentes al sistema, lo que respecta a la reología de los sistemas cementantes, para Bolívar (2003) señala que la reología permite

diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.33 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.34 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9629. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.27, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste entre las curvas que en las tasas de cortes más altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.33: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx,

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	38,5	1,71	41,00	0,232	1,613
2	50	3,41	53,25	0,533	1,726
3	40	5,12	42,60	0,709	1,629
6	69	10,23	73,49	1,010	1,866
10	84,5	17,05	89,99	1,232	1,954
20	115,5	34,10	123,01	1,533	2,090
30	140,5	51,15	149,63	1,709	2,175
60	215	102,30	228,98	2,010	2,360
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.34: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx,

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	282,32	93,14	----	----	0,7252
Ley de Potencia	----	----	28,93	0,4168	0,9629

En lo expresado anteriormente, la figura 5.27 se observa la gráfica de los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

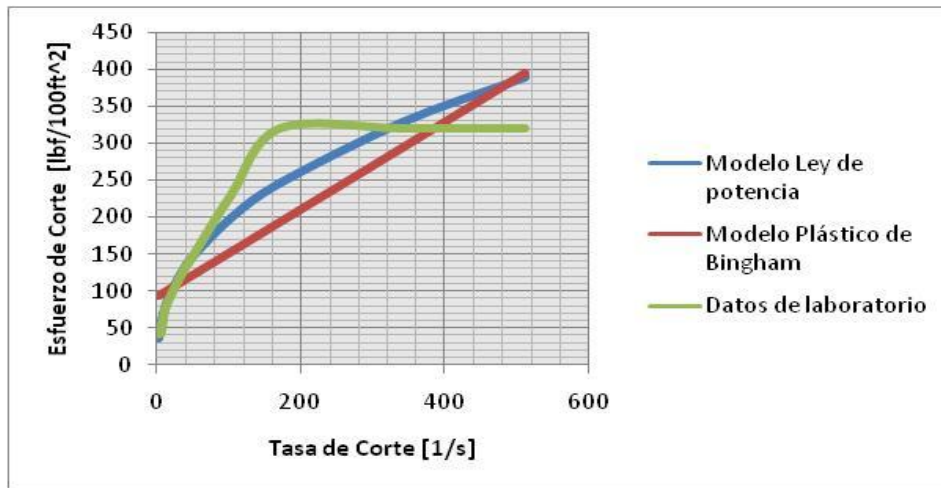


Figura 5.27: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx
 El volumen de filtrado para este sistema disminuye en comparación del sistema base (Blanco), esto se debe a la incorporación del surfactante. El volumen de filtrado para este sistema se observa en la figura 5.28, donde el mismo es de 4,8 ml, seguidamente se observa la cantidad de volumen acumulado, en el cual el momento mas critico es en la diferencia de 10 min (entre los minutos 15 y 25) al filtrar 1,2 ml. Con respecto al sistema base hay una diferencia en cuanto a la reducción de filtrado de 6,4 ml.

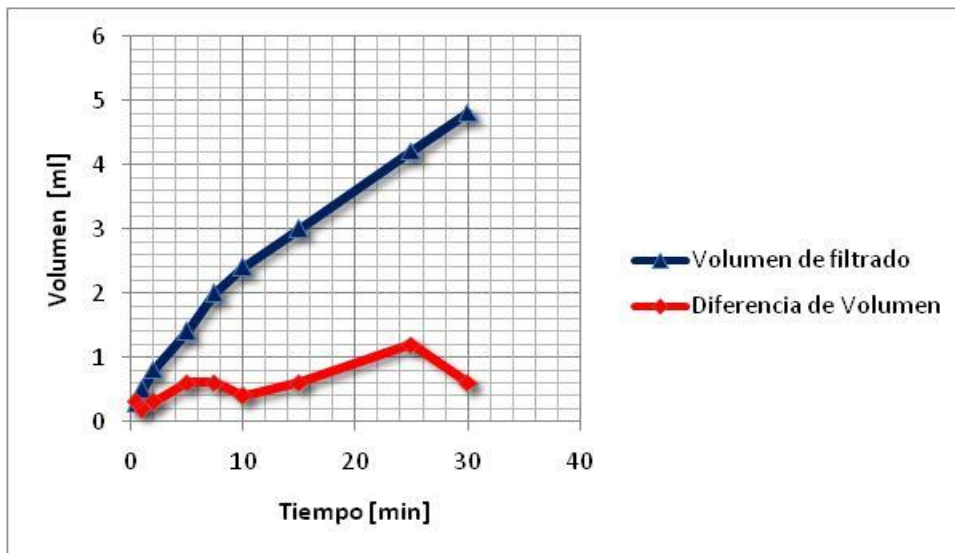


Figura 5.28: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio de las muestras de 0,019 mD como se observa en la tabla 5.35, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,013.

Tabla 5.35: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,02	0,002	0,019
2		15:00	0,17	0,019	
3		15:00	0,3	0,034	
4		15:00	0,2	0,022	

Para el sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx el tiempo de bombeabilidad es de 2 horas con 54 minutos aproximadamente, como se puede apreciar en la figura 5.29, donde el comportamiento del sistema durante el ensayo es el esperado, ya que luego del tiempo de premezclado de la lechada la viscosidad disminuye por el aumento de la temperatura hasta llegar a las condiciones del pozo. Como se observa en comparación al sistema blanco el aumento de tiempo de bombeabilidad.

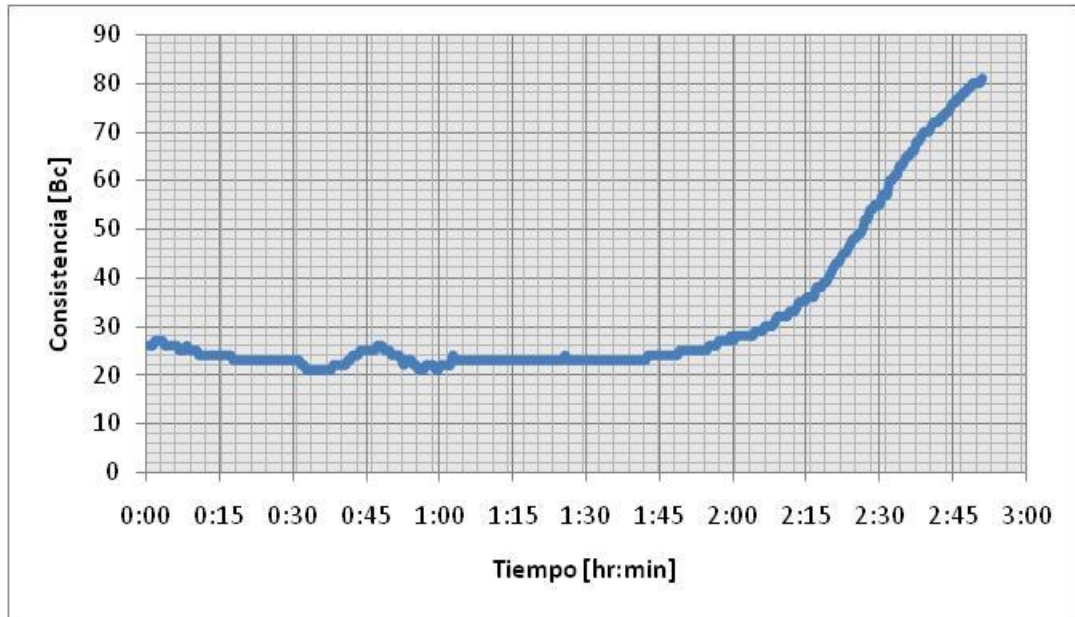


Figura 5.29: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx

La resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx tiene un valor promedio de 1515 psi, el cual se puede observar en la tabla 5.36 con una desviación estándar de 44 psi, de igual manera, los cubos presentan una reducción de tamaño considerable, esto se debe al colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.36: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 1,2 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión Promedio [psi]
Cubo 1	50,85	36,79	1871	1567,32	1515
Cubo 2	50,92	36,65	1866	1458,72	
Cubo 3	50,87	38,69	1968	1520,42	
Cubo 4	51,4	38,82	1995	1515,52	

5.5.7 Sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

El sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx, con respecto al balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 10,9 lb/gal el cual

es aceptable ya que la balanza utilizada tiene un error de 0,1 lb/gal. El valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.37 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 13,12 y 13,06 lb/gal con una desviación estándar de 0,05. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero se tiene una diferencia de aproximada 2 lb/gal, esto puede deberse a la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.37: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	37,16	23,7	13,06	13,06
	Medio	34,94	22,27	13,07	
	Base	37,92	24,22	13,04	
Muestra 2	Tope	40,43	25,61	13,15	13,12
	Medio	35,94	22,83	13,11	
	Base	38,54	24,49	13,11	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el

punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.38 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 60, 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.39 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9474. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.30, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste ente las curvas que en las tasas de cortes mas altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.38: Datos de reología del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	25	1,71	26,63	0,232	1,425
2	41	3,41	43,67	0,533	1,640
3	52,5	5,12	55,91	0,709	1,748
6	75	10,23	79,88	1,010	1,902
10	95	17,05	101,18	1,232	2,005
20	140	34,10	149,10	1,533	2,173
30	177,5	51,15	189,04	1,709	2,277
60	300	102,30	319,50	2,010	2,504
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.39: Modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	271,97	110,41	----	----	0,5932
Ley de Potencia	----	----	26,34	0,4599	0,9474

En lo expresado anteriormente, la figura 5.30 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

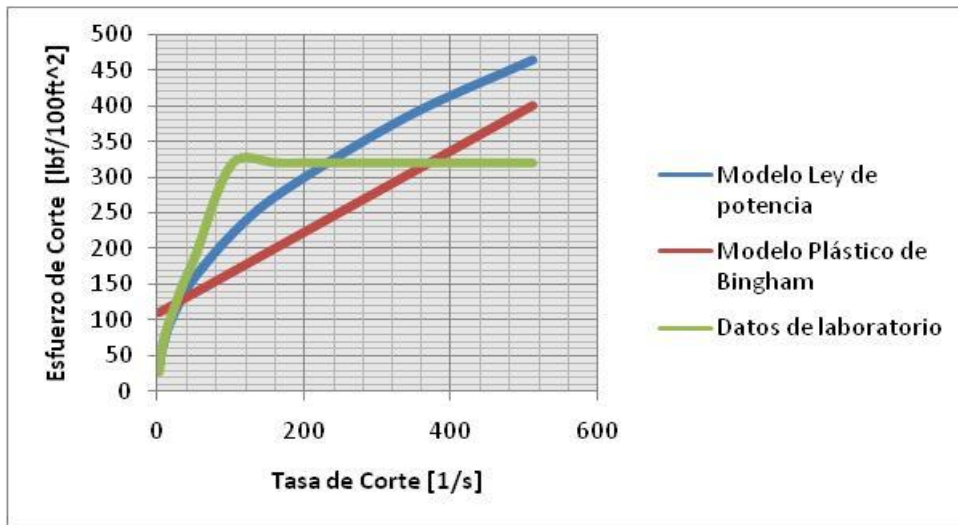


Figura 5.30: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx
 El volumen de filtrado para este sistema disminuye en comparación del sistema base (Blanco), esto se debe a la incorporación del surfactante. El volumen de filtrado para este sistema se observa en la figura 5.31, donde el mismo es de 5 ml, seguidamente se observa la cantidad de volumen acumulado, en el cual el momento más crítico es en la diferencia de 10 min (entre los minutos 15 y 25) al filtrar 1,2 ml. Con respecto al sistema base hay una diferencia en cuanto a la reducción de filtrado de 6,2 ml.

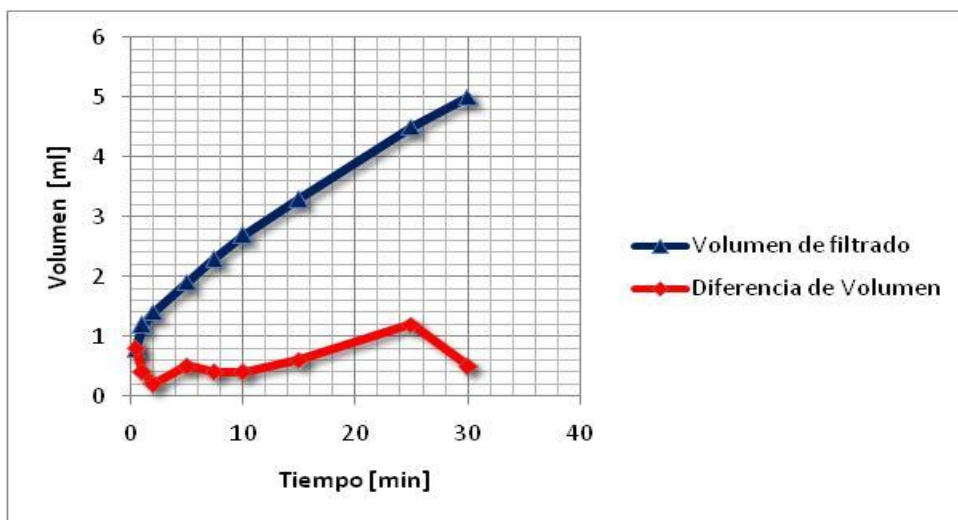


Figura 5.31: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio de las muestras de 0,021 mD como se observa en la tabla 5.40, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,009.

Tabla 5.40: Permeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,28	0,031	0,021
2		15:00	0,2	0,022	
3		15:00	0,09	0,010	
4		15:00	0,18	0,020	

El tiempo de bombeabilidad del sistema es de 2 horas con 57 minutos aproximadamente, la misma tiene altibajos en la consistencia para tiempos cortos como se observa en la figura 5.32, esto se debe a que la lechada es viscosa. El ensayo esta acorde a lo esperado, la disminución de la viscosidad por el aumento de la temperatura luego del tiempo de premezclado. De igual manera este sistema aumenta su tiempo en comparación al sistema base.

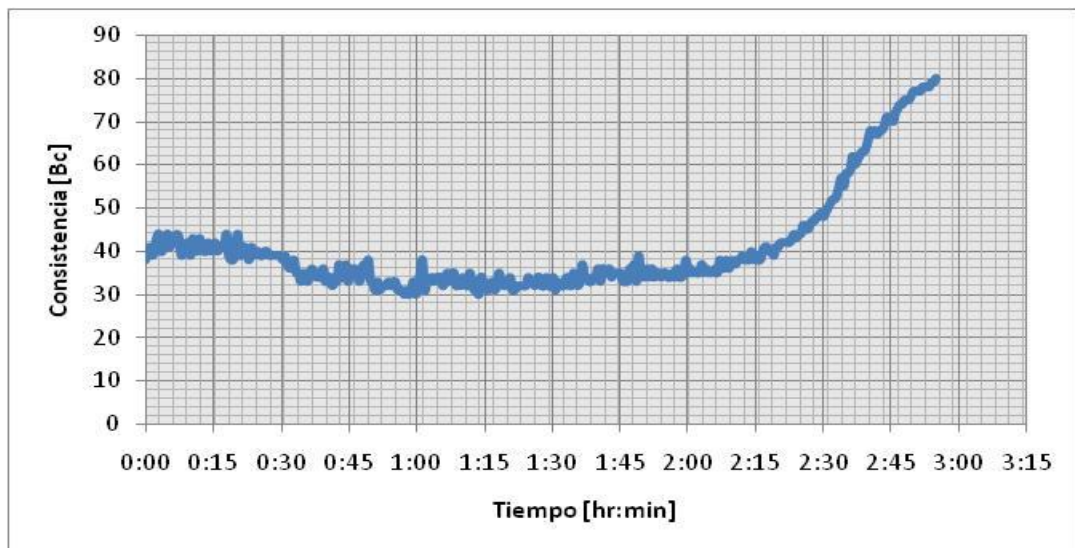


Figura 5.32: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

La resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx tiene un valor promedio de 1296 psi, el mismo se puede observar en la tabla 5.41, este promedio tiene una desviación estándar de 60 psi, al igual que los ensayos anteriores de resistencia a la compresión, los cubos tienen una reducción de tamaño considerable por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.41: Resistencia a la compresión del sistema Blanco + Surfactante C, 1,6 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	51,32	34,57	1774	1232,95	1296
Cubo 2	51,09	34,91	1784	1257,03	
Cubo 3	51,19	35,68	1826	1341,14	
Cubo 4	51	35,58	1815	1354,72	

En resumen, los sistemas evaluados para los surfactantes A y C en las distintas concentraciones, muestran que las propiedades evaluadas mejoran con respecto al sistema base, y resultando que ambos surfactantes logran dispersar el aditivo polimérico (LITECEM®).

Continuando con la evaluación de los sistemas, al sistema blanco en el balance de masa se le quita el aditivo acelerador, y se tiene el Sistema Blanco sin A/A (Aditivo /Acelerador), ya que dicho aditivo tiene la función principal para el diseño de la lechada es de generar viscosidad al sistema trayendo así la estabilidad del LITECEM®, por tal motivo se decide modificar el balance de masa sin el aditivo acelerador para estudiar el efecto de los surfactante en el sistema.

5.5.8 Sistema Blanco sin A/A

El sistema Blanco sin el aditivo acelerador el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11 lb/gal lo cual corrobora el valor teórico de la densidad.

Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto se debe a que el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para dicho sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.42 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,70 y 12,75 lb/gal con una desviación estándar de 0,03. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero se tiene una diferencia de aproximada 2 lb/gal, esto puede deberse al colapso masivo de las esferas poliméricas.

Tabla 5.42: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	42,8	28,25	12,62	12,70
	Medio	47,46	31,01	12,75	
	Base	43,15	28,24	12,73	
Muestra 2	Tope	43,59	28,59	12,70	12,75
	Medio	47,47	30,83	12,83	
	Base	41,9	27,45	12,72	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y

optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.43 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.44 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9790. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.33, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste entre las curvas que en las tasas de cortes más altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.43: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A

RPM	Promedio Lecturas	$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [$\dot{\gamma}$]	log [τ]
1	26,5	1,71	28,22	0,232	1,451
2	38	3,41	40,47	0,533	1,607
3	45	5,12	47,93	0,709	1,681
6	63	10,23	67,10	1,010	1,827
10	77	17,05	82,01	1,232	1,914
20	115	34,10	122,48	1,533	2,088
30	143	51,15	152,30	1,709	2,183
60	213,5	102,30	227,38	2,010	2,357
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.44: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	288,45	88,59	----	----	0,7201
Ley de Potencia	----	----	23,23	0,4619	0,9790

En lo expresado anteriormente, la figura 5.33 se observa la gráfica de los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema Blanco sin A/A, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

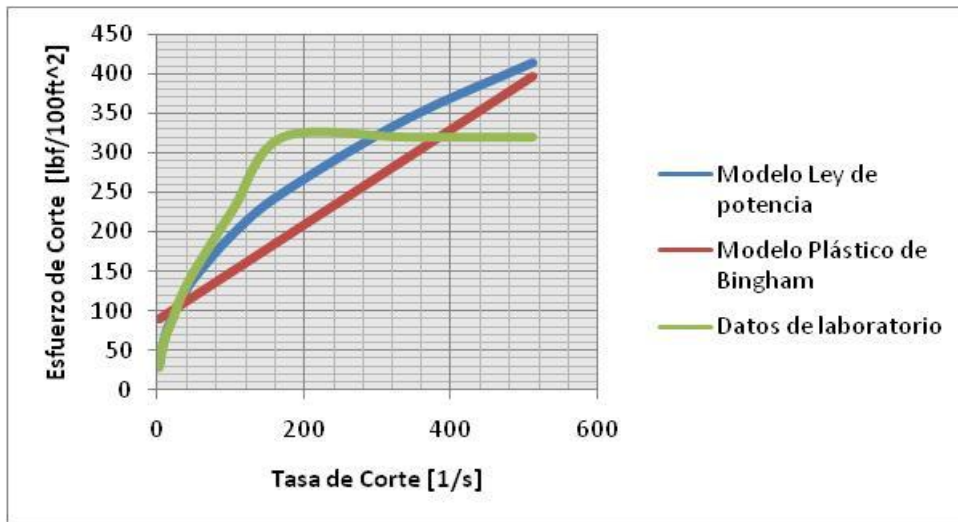


Figura 5.33: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A

En el ensayo de pérdida de filtrado los sistemas cementantes se diseñan para que el mismo no se deshidrate, esto se logra agregándole un aditivo controlador de filtrado, donde el valor promedio no debe ser mayor a 30 ml. Con respecto al sistema Blanco sin A/A, en la figura 5.34 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 8 ml para el sistema, siendo el momento crítico en los primeros 2 minutos en el cual es la mayor cantidad de volumen acumulado al filtrar de 1,5 ml.

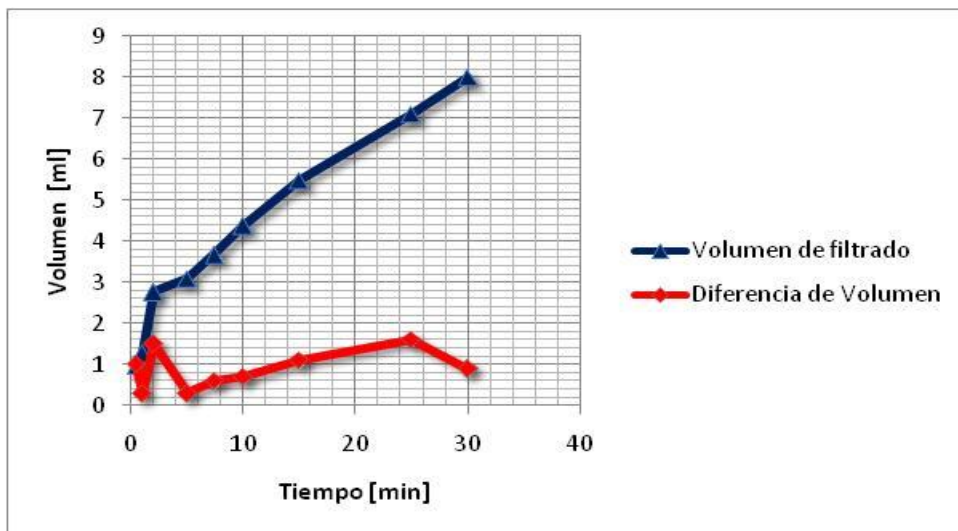


Figura 5.34: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio de las muestras de 0,006 mD como se observa en la tabla 5.45, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,004.

Tabla 5.45: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,03	0,003	0,006
2		15:00	0,03	0,003	
3		15:00	0,1	0,011	
4		15:00	0,05	0,006	

El tiempo de bombeabilidad del sistema es de 2 horas con 35 minutos aproximadamente, como se observa en la figura 5.35. El ensayo se muestra acorde a lo esperado, como es la disminución de la viscosidad por el aumento de la temperatura luego del tiempo de premezclado. Comparando los dos sistemas bases hay una diferencia con respecto al tiempo, esto se debe a que uno de ellos no posee el aditivo acelerador, donde el mismo posee mayor tiempo de bombeabilidad.

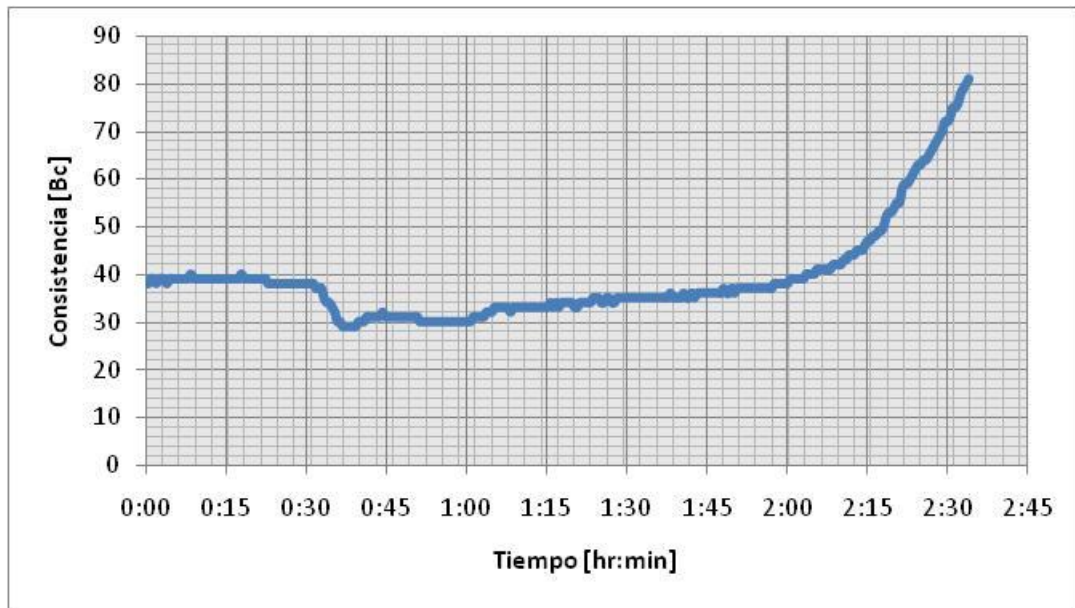


Figura 5.35: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A

La resistencia a la compresión para el sistema tiene un valor promedio de 746 psi, el mismo se puede observar en la tabla 5.46, este promedio tiene una desviación estándar de 31 psi, al igual que los ensayos anteriores de resistencia a la compresión, los cubos tienen una ligera reducción de tamaño en los cubos por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.46: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,95	43,16	2199	743,73	746
Cubo 2	50,91	45,98	2341	712,28	
Cubo 3	50,75	44,69	2268	742,42	
Cubo 4	51,1	45,86	2343	786,64	

5.5.9 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de

11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11 lb/gal el cual corrobora el valor teórico calculado. Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo de de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.47 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,36 y 12,68 lb/gal con una desviación estándar de 0,23. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero se tiene una diferencia de aproximada 2 lb/gal, esto puede deberse al colapso masivo de las esferas poliméricas.

Tabla 5.47: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	39,06	26,45	12,30	12,36
	Medio	37,29	24,91	12,47	
	Base	38,01	25,71	12,32	
Muestra 2	Tope	34,4	22,73	12,61	12,68
	Medio	34,35	22,4	12,77	
	Base	34,81	22,88	12,67	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.48 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 60, 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.49 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9439. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.36, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste entre las curvas que en las tasas de cortes más altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.48: Datos de reología sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	25	1,71	26,63	0,232	1,425
2	39,5	3,41	42,07	0,533	1,624
3	48,5	5,12	51,65	0,709	1,713
6	72	10,23	76,68	1,010	1,885
10	97	17,05	103,31	1,232	2,014
20	150	34,10	159,75	1,533	2,203
30	185,5	51,15	197,56	1,709	2,296
60	300	102,30	319,50	2,010	2,504
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.49: Modelos reológicos sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	270,92	111,77	----	----	0,5824
Ley de Potencia	----	----	25,58	0,4678	0,9439

En lo expresado anteriormente, la figura 5.36 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

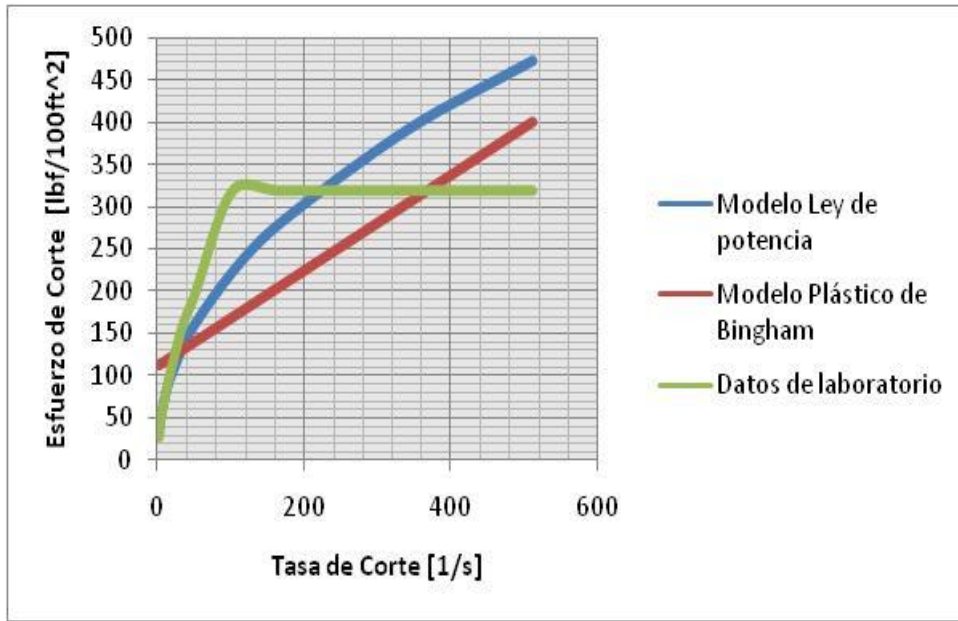


Figura 5.36: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Con respecto a este sistema, en la figura 5.37 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 4 ml, siendo el momento crítico en los primeros 5 minutos en el cual es la mayor cantidad de volumen acumulado al filtrar de 1,2 ml. En comparación con el sistema base sin el aditivo acelerador, hubo una reducción en el volumen de filtrado a un 50%.

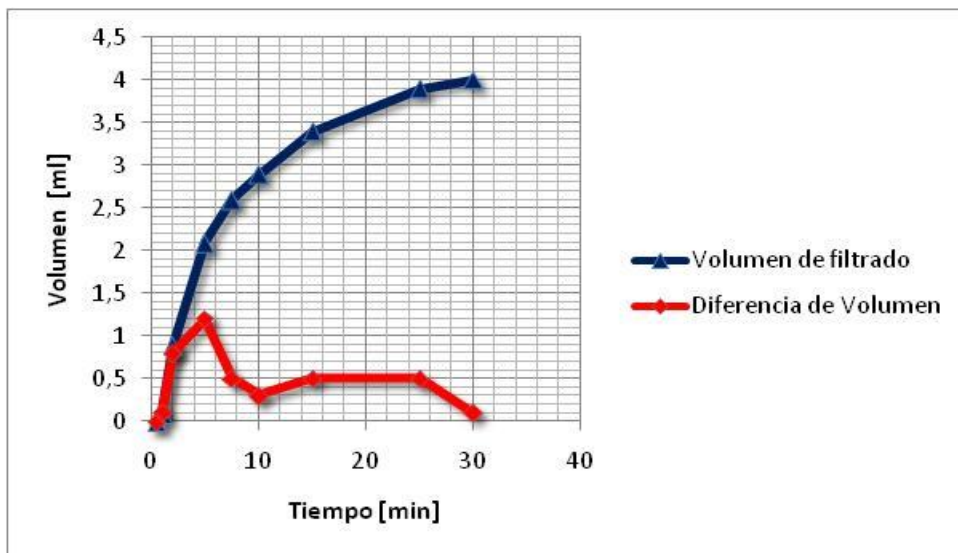


Figura 5.37: Gráfica de volumen de filtrado Y volumen acumulado de filtrado sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Los sistemas cementantes se caracterizan por tener baja permeabilidad para evitar el paso de fluidos hacia la superficie. El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio de las muestras de 0,007 mD como se observa en la tabla 5.50, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,005.

Tabla 5.50: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,1	0,011	0,007
2		15:00	0,02	0,002	
3		15:00	0,1	0,011	
4		15:00	0,04	0,004	

El tiempo de bombeabilidad para el sistema es de 2 horas con 56 minutos aproximadamente como se puede observar en la figura 5.38, de igual manera tiene el comportamiento esperado, disminuyendo su viscosidad cuando se llega a las condiciones del pozo. En comparación con el sistema Base sin A/A se tiene un aumento para el tiempo de bombeabilidad.

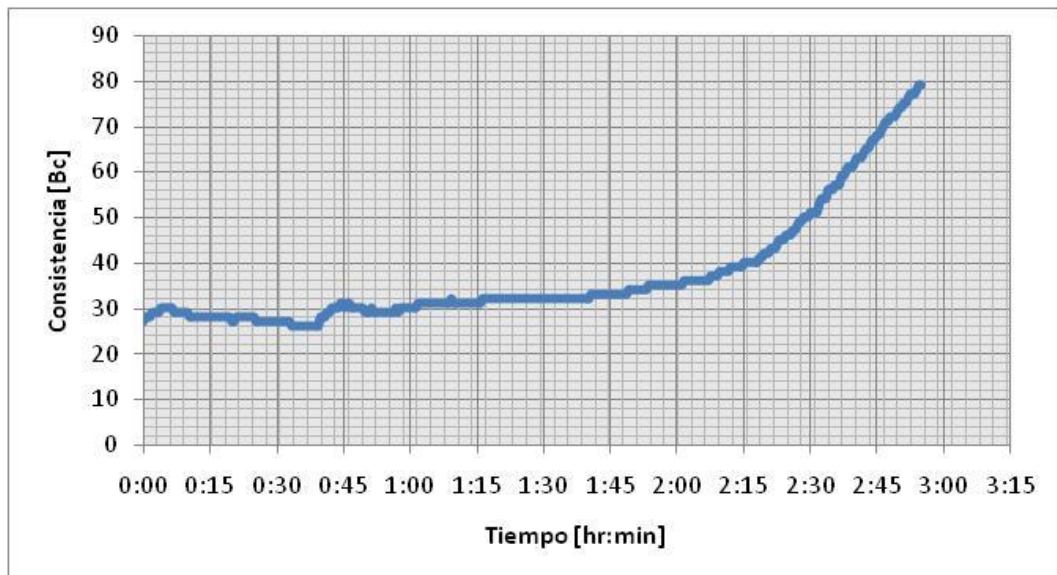


Figura 5.38: Gráfica de tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

La resistencia a la compresión para el sistema tiene un valor promedio de 1096 psi, el mismo se puede observar en la tabla 5.51, este promedio tiene una desviación estándar de 107 psi, al igual que los ensayos anteriores de resistencia a la compresión, los cubos tienen una ligera reducción de tamaño en los cubos por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.51: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 0,8 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,95	38,32	1952	992,29	1096
Cubo 2	50,85	37,15	1889	1031,41	
Cubo 3	51,14	38,33	1960	1130,45	
Cubo 4	51,02	37,46	1911	1230,88	

5.5.10 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11,1 lb/gal, este valor es aceptable ya que la balanza tiene un error de $\pm 0,1$ lb/gal.

Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo de de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B,

continuando con la idea en la tabla 5.52 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,05 y 12,17 lb/gal con una desviación estándar de 0,08. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo polimérico utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, este resultado corrobora lo antes mencionado.

Tabla 5.52: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	33,13	23	12,00	12,05
	Medio	37,09	25,32	12,20	
	Base	31,49	21,95	11,95	
Muestra 2	Tope	30,99	21,29	12,13	12,17
	Medio	37,17	25,13	12,32	
	Base	31,98	22,1	12,05	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.53 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 60, 100, 200 y 300 rpm

las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.54 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9354. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.39, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste ente las curvas que en las tasas de cortes mas altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.53: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	23,5	1,71	25,03	0,232	1,398
2	41	3,41	43,67	0,533	1,640
3	49,5	5,12	52,72	0,709	1,722
6	80,5	10,23	85,73	1,010	1,933
10	106	17,05	112,89	1,232	2,053
20	153,5	34,10	163,48	1,533	2,213
30	189	51,15	201,29	1,709	2,304
60	300	102,30	319,50	2,010	2,504
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.54: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	266,65	115,25	----	----	0,5762
Ley de Potencia	----	----	26,41	0,4649	0,9354

En lo expresado anteriormente, la figura 5.39 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

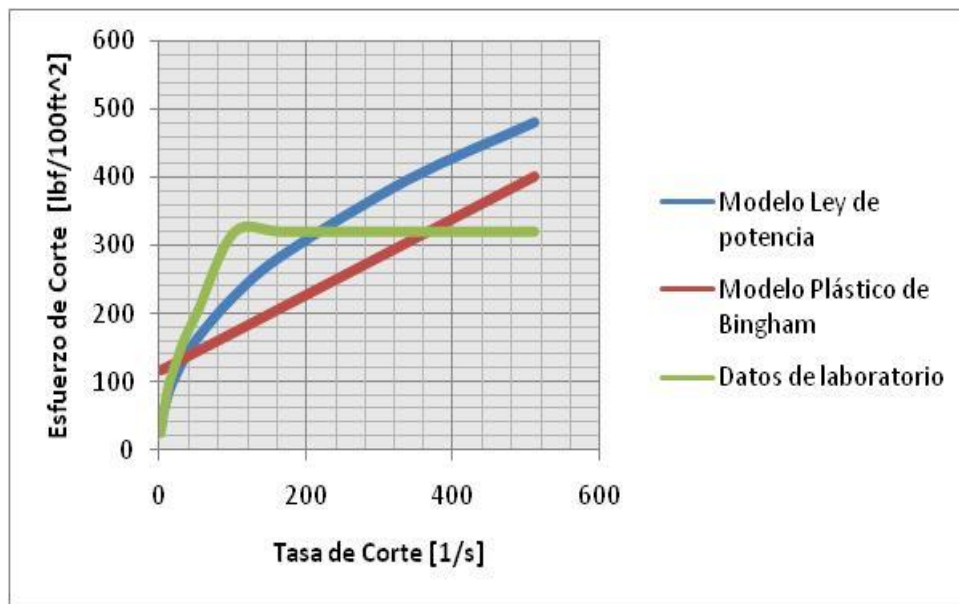


Figura 5.39: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Con respecto a este sistema, en la figura 5.40 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 6,2 ml, siendo el momento crítico los primeros 30 s, en el cual es la mayor cantidad de volumen acumulado al filtrar de 1,3 ml. En comparación con el sistema base sin el aditivo acelerador, hubo una reducción en el volumen de filtrado por efectos de la concentración de surfactante utilizada.

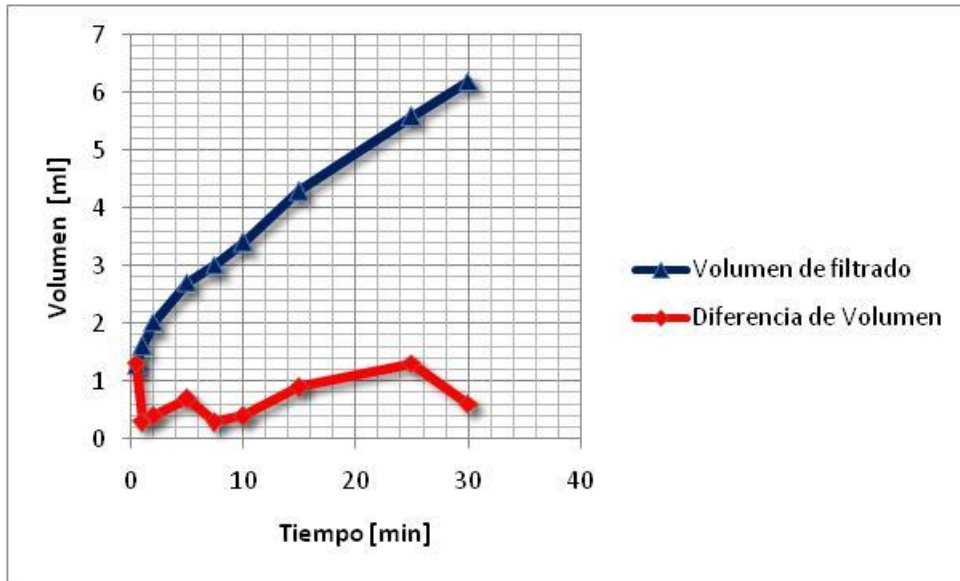


Figura 5.40: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio de las muestras de 0,031 mD como se observa en la tabla 5.55, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,012.

Tabla 5.55: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,15	0,017	0,031
2		15:00	0,4	0,045	
3		15:00	0,3	0,034	
4		15:00	0,27	0,030	

El tiempo de bombeabilidad es de 3 horas con 5 minutos aproximadamente para el sistema (ver figura 5.41), teniendo una disminución de la viscosidad cuando se llega a las condiciones del pozo luego del tiempo de premezclado. Comparando con el sistema base sin A/A se observa un aumento en el tiempo de bombeabilidad, debido a la utilización de surfactantes.

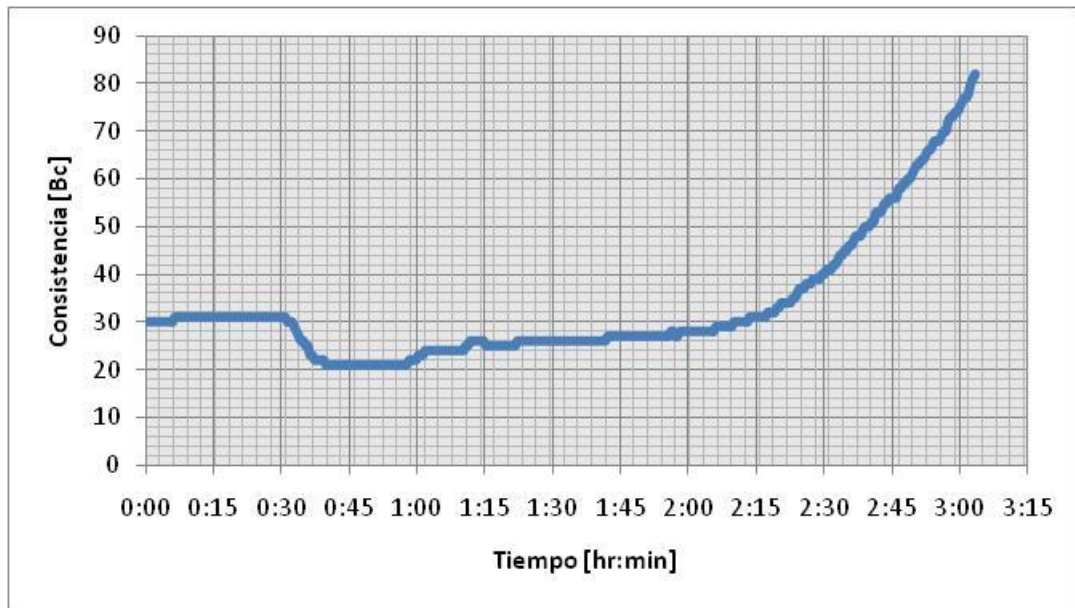


Figura 5.41: Tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

La resistencia a la compresión para el sistema tiene un valor promedio de 1166 psi, el mismo se puede observar en la tabla 5.56, este promedio tiene una desviación estándar de 123 psi, al igual que los ensayos anteriores de resistencia a la compresión, los cubos tienen una considerable reducción en el tamaño en los mismos por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.56: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,2 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,96	36,52	1861	1072,91	1166
Cubo 2	51,22	35,48	1817	1073,84	
Cubo 3	50,86	34,26	1742	1333,97	
Cubo 4	50,85	35,6	1810	1184,85	

5.5.11 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx, el balance de masa que se utilizo para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de

11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11 lb/gal el cual corrobora el valor teórico calculado.

Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.57 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,53 y 12,15 lb/gal con una desviación estándar de 0,27. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; estos resultados de asemejan a lo antes dicho.

Tabla 5.57: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	37,26	25,03	12,40	12,53
	Medio	32,81	21,57	12,67	
	Base	35,45	23,59	12,52	
Muestra 2	Tope	32,61	22,39	12,13	12,15
	Medio	31,73	21,51	12,29	
	Base	33,27	23,04	12,03	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.58 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 60, 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.59 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9323. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.42, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste entre las curvas que en las tasas de cortes más altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.58: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	26	1,71	27,69	0,232	1,442
2	40,5	3,41	43,13	0,533	1,635
3	53,5	5,12	56,98	0,709	1,756
6	81,5	10,23	86,80	1,010	1,939
10	107	17,05	113,96	1,232	2,057
20	163	34,10	173,60	1,533	2,240
30	205	51,15	218,33	1,709	2,339
60	300	102,30	319,50	2,010	2,504
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.59: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	261,90	119,62	----	----	0,5607
Ley de Potencia	----	----	28,21	0,4544	0,9323

En lo expresado anteriormente, la figura 5.42 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

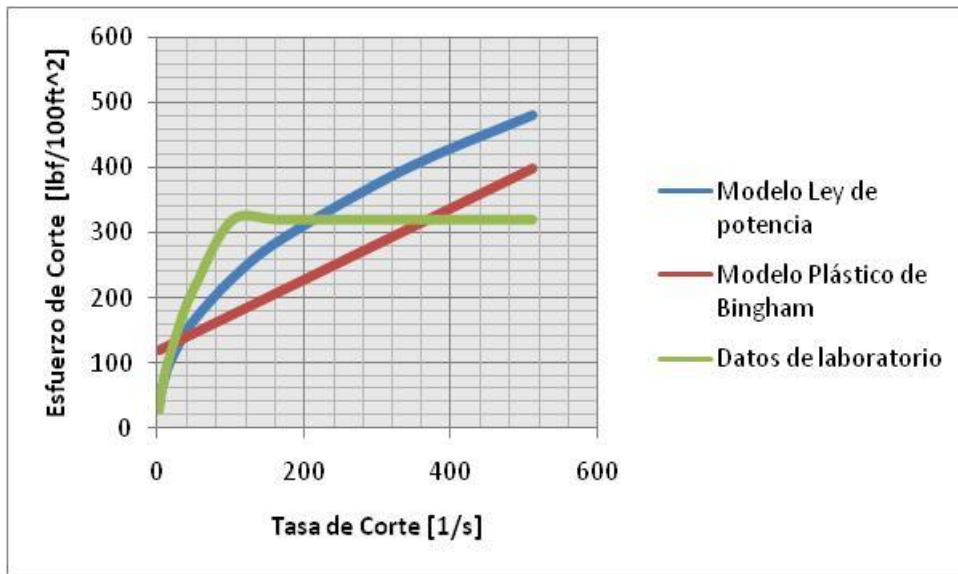


Figura 5.42: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx. Con respecto a este sistema, en la figura 5.43 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 6,7 ml, siendo el momento crítico la diferencia de tiempo de 10 min (entre los minutos 15 y 25), al filtrar un volumen acumulado de 1,3 ml. En comparación con el sistema base sin el aditivo acelerador, hubo una reducción en el volumen de filtrado por efectos de la concentración de surfactante utilizada.

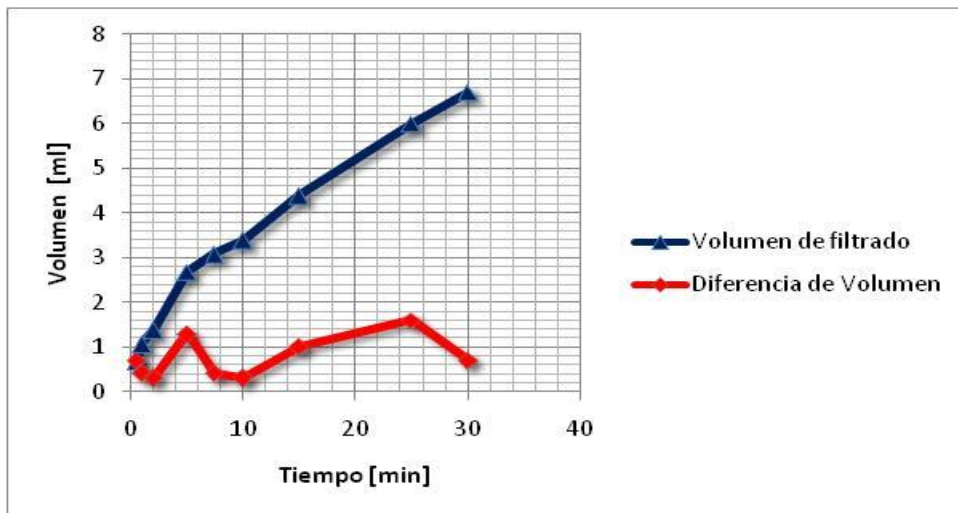


Figura 5.43: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio para las muestras 1 y 3 de de 0,033 mD como se observa en la tabla 5.60, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,017, las muestras 2 y 4 no son representativas porque las mismas se separaron del anillo permitiendo el paso del fluido por el espacio existente entre el anillo y la muestra.

Tabla 5.60: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,4	0,045	0,033
2		8:00	1	0,211	
3		15:00	0,18	0,020	
4		2:00	1	0,842	

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx el tiempo de bombeabilidad es de 3 horas con 41 minutos aproximadamente (ver figura 5.44), después del minuto 30 hay una disminución de la viscosidad por el aumento de la temperatura. Este aumento del tiempo de bombeabilidad se debe a la concentración de surfactante utilizada, ya que se observa el cambio con respecto al sistema Base sin A/A.

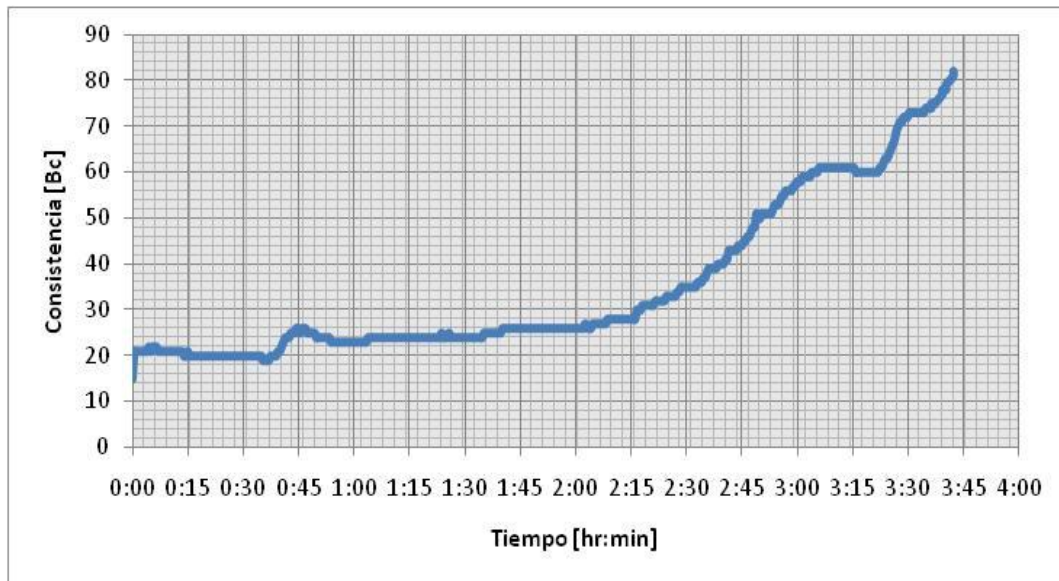


Figura 5.44: tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

La resistencia a la compresión para el sistema tiene un valor promedio de 1059 psi, el mismo se puede observar en la tabla 5.61, este promedio tiene una desviación estándar de 70 psi, al igual que los ensayos anteriores de resistencia a la compresión, los cubos tienen una considerable reducción en el tamaño en los mismos por el colapso de las esferas poliméricas.

Tabla 5.61: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante A, 1,6 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,91	35,91	1828	1121,84	1059
Cubo 2	51,46	34,59	1780	1098,74	
Cubo 3	50,99	35,77	1824	1052,57	
Cubo 4	50,81	37,14	1887	963,31	

5.5.12 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx el balance de masa que se utilizó para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 10,9 lb/gal este valor es aceptable ya que la balanza tiene un error de $\pm 0,1$ lb/gal, el cual corrobora el valor teórico calculado.

Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.62 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,86 y 12,88 lb/gal con una desviación estándar de 0,01. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; pero a efectos de estos resultados la diferencia es de aproximadamente 2 lb/gal, esto puede que se deba a la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.62: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	42,01	27,4	12,77	12,86
	Medio	39,43	25,32	12,97	
	Base	38,43	24,91	12,85	
Muestra 2	Tope	41,94	27,23	12,83	12,88
	Medio	38,53	24,78	12,95	
	Base	38,1	24,69	12,85	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.63 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 60, 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.64 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,8846. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se

puede observar gráficamente en la figura 5.45, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste ente las curvas que en las tasas de cortes mas altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.63: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	28,5	1,71	30,35	0,232	1,482
2	47,5	3,41	50,59	0,533	1,704
3	61	5,12	64,97	0,709	1,813
6	92,5	10,23	98,51	1,010	1,993
10	132	17,05	140,58	1,232	2,148
20	208,5	34,10	222,05	1,533	2,346
30	280	51,15	298,20	1,709	2,475
60	300	102,30	319,50	2,010	2,504
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.64: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	236,97	142,32	----	----	0,4561
Ley de Potencia	----	----	34,67	0,4282	0,8846

En lo expresado anteriormente, la figura 5.45 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo

antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

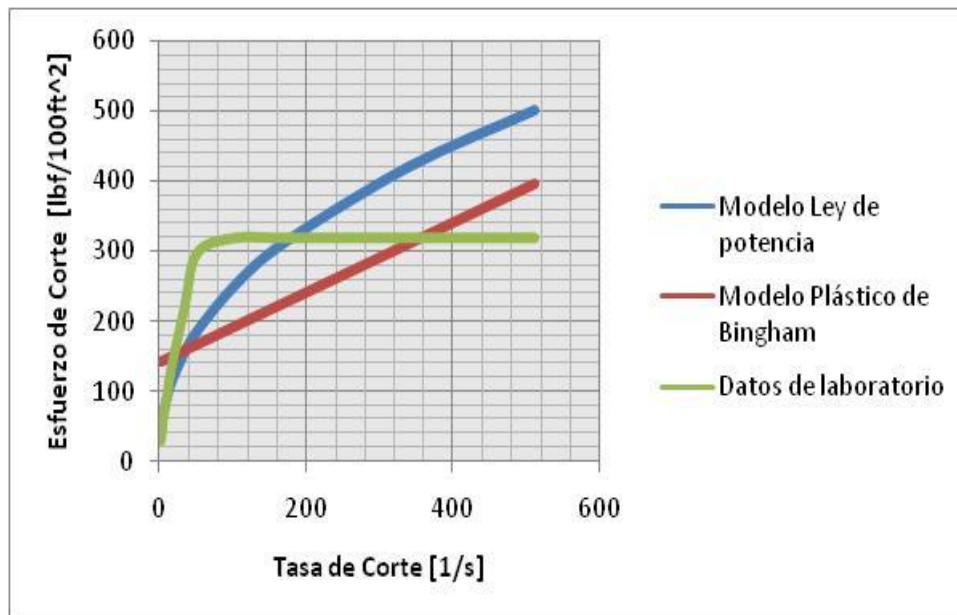


Figura 5.45: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Con respecto a este sistema, en la figura 5.46 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 3,5 ml, siendo el momento crítico la diferencia de tiempo de 10 min (entre los minutos 15 y 25), al filtrar un volumen acumulado de 0,8 ml. En comparación con el sistema base sin el aditivo acelerador, hubo una reducción en el volumen de filtrado por efectos de la concentración de surfactante utilizada.

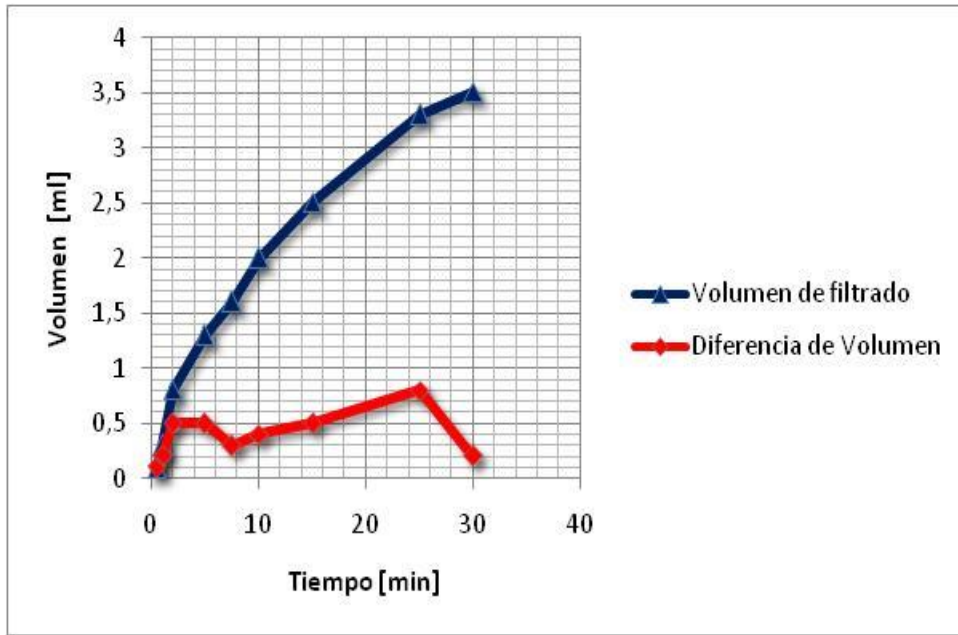


Figura 5.46: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio para las muestras 1, 3 y 4 de de 0,024 mD como se observa en la tabla 5.65, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,003, donde la muestra 2 no es representativa ya que la misma se separo del anillo permitiendo el paso del fluido por el espacio existente entre el anillo y la muestra.

Tabla 5.65: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,19	0,021	0,024
2		1:04	1	1,579	
3		15:00	0,24	0,027	
4		15:00	0,22	0,025	

El tiempo de bombeabilidad es de 3 horas con 30 minutos aproximadamente (ver figura 5.47), manteniendo de igual manera el comportamiento esperado con la

disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura luego del tiempo de premezclado. En comparación a sistema base sin A/A se observa el aumento del tiempo por efectos del surfactante.

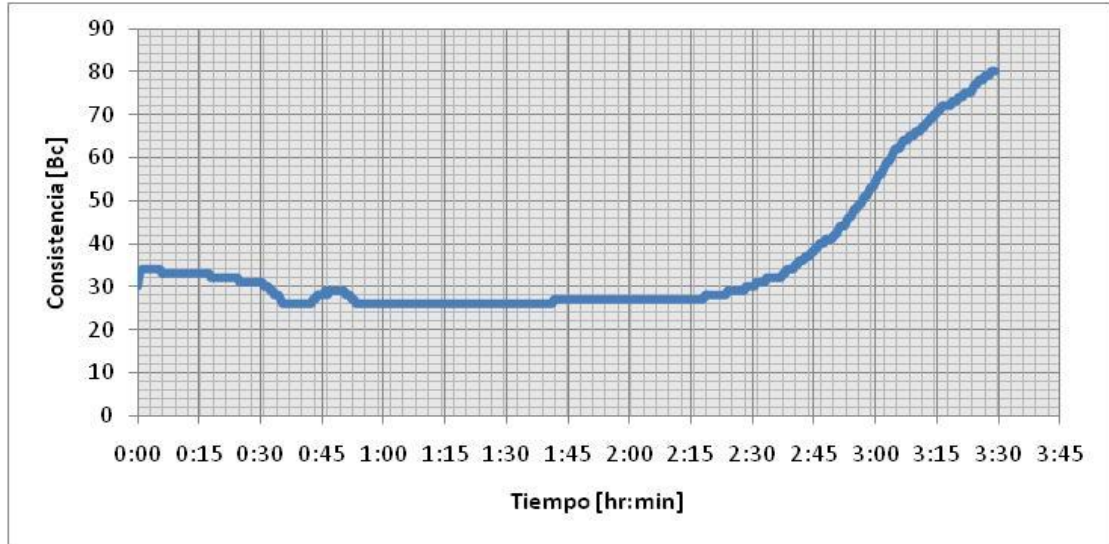


Figura 5.47: Tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx
El valor promedio de la resistencia a la compresión es de 1382 psi como se observa en la tabla 5.66, con una desviación estándar de 246 psi, al igual que los sistemas ya evaluados hay una reducción considerable en la altura de los cubos por el colapso de las esferas de poliestireno.

Tabla 5.66: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 0,8 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	51,32	40,78	2093	1280,74	1382
Cubo 2	50,86	39,87	2028	1702,08	
Cubo 3	51,2	39,87	2041	1421,44	
Cubo 4	50,92	39,67	2020	1122,78	

5.5.13 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx, el balance de masa que se utilizo para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de

11 lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11 lb/gal el cual corrobora el valor teórico calculado.

Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.67 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,86 y 12,84 lb/gal con una desviación estándar de 0,02. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; estos resultados difieren con respecto al valor de la lechada en 2 lb/gal, esto pudiera ser por la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.67: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	33,67	21,84	12,84	12,86
	Medio	38,1	24,58	12,91	
	Base	34,61	22,48	12,82	
Muestra 2	Tope	41,84	27,26	12,79	12,84
	Medio	42,73	27,58	12,91	
	Base	42,69	27,75	12,81	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.68 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 30, 60, 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.69 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,8612. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se puede observar gráficamente en la figura 5.48, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste entre las curvas que en las tasas de cortes más altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.68: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	38	1,71	40,47	0,232	1,607
2	59	3,41	62,84	0,533	1,798
3	59	5,12	62,84	0,709	1,798
6	108	10,23	115,02	1,010	2,061
10	152	17,05	161,88	1,232	2,209
20	239	34,10	254,54	1,533	2,406
30	300	51,15	319,50	1,709	2,504
60	300	102,30	319,50	2,010	2,504
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.69: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	220,03	156,50	----	----	0,4070
Ley de Potencia	----	----	43,53	0,3878	0,8612

En lo expresado anteriormente, la figura 5.45 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

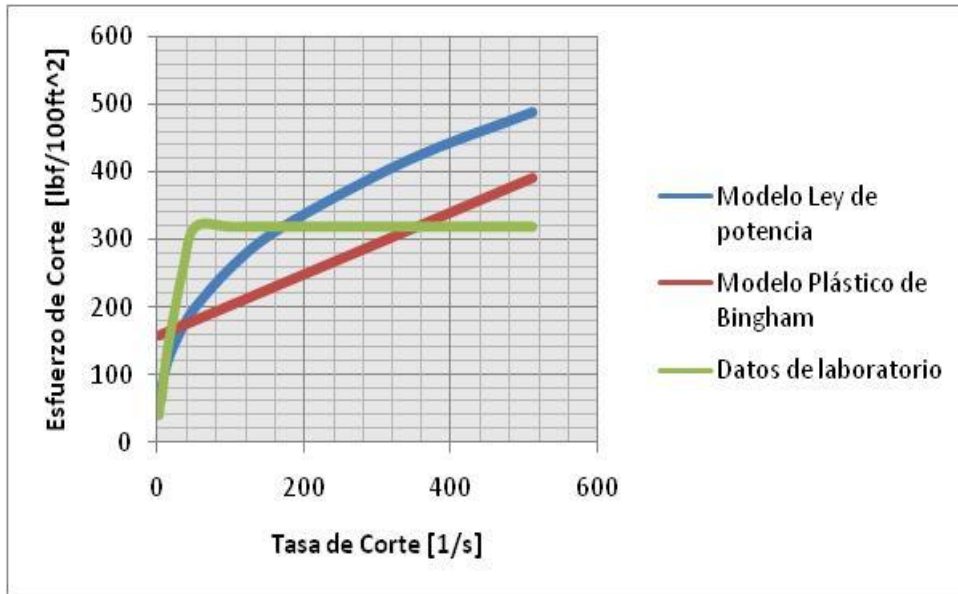


Figura 5.48: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx. Con respecto a este sistema, en la figura 5.49 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 3,6 ml, siendo el momento crítico la diferencia de tiempo de 10 min (entre los minutos 15 y 25), al filtrar un volumen acumulado de 0,8 ml. En comparación con el sistema base sin el aditivo acelerador, hubo una reducción en el volumen de filtrado por efectos de la concentración de surfactante utilizada.

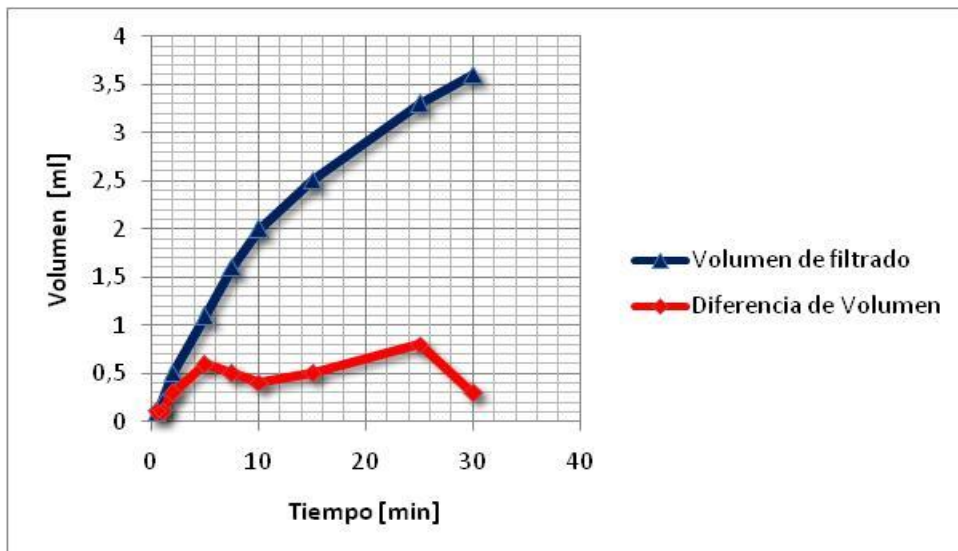


Figura 5.49: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx.

El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio para las muestras 2 y 3 de de 0,013 mD como se observa en la tabla 5.70, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,002, las muestras 1 y 4 no son representativas porque las mismas se separaron del anillo permitiendo el paso del fluido por el espacio existente entre el anillo y la muestra.

Tabla 5.70: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	05:11	1	0,325	0,013
2		15:00	0,1	0,011	
3		15:00	0,13	0,015	
4		00:20	1	5,053	

El tiempo de bombeabilidad del sistema es de 3 horas con 30 minutos aproximadamente (ver figura 5.50), manteniendo de igual manera el comportamiento esperado con la disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura luego del tiempo de premezclado. Comparando este resultado con el de sistema base sin A/A aumenta debido a la concentración de surfactante utilizada.

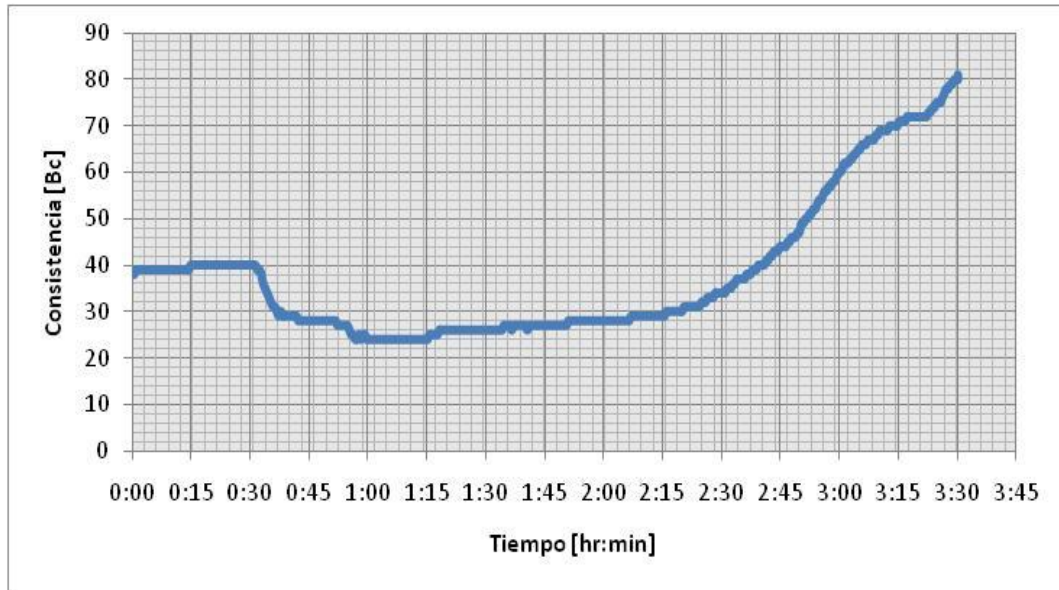


Figura 5.50: Tiempo de bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

El valor promedio de la resistencia a la compresión es de 1157 psi como se observa en la tabla 5.71, con una desviación estándar de 41 psi, al igual que los sistemas ya evaluados hay una reducción considerable en la altura de los cubos por el colapso de las esferas de poliestireno.

Tabla 5.71: Resistencia a la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,2 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	51,05	41,44	2116	1192,85	1157
Cubo 2	50,94	40,93	2085	1132,8	
Cubo 3	50,89	40,94	2083	1111,49	
Cubo 4	51,04	41,02	2094	1191,8	

5.5.14 Sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Para el sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx el balance de masa que se utilizo para el cálculo de la masa de los aditivos, la densidad teórica es de 11

lb/gal, dando como resultado en la práctica una densidad de 11,1 lb/gal, este valor es aceptable ya que la balanza tiene un error de $\pm 0,1$ lb/gal el cual corrobora el valor teórico calculado.

Los sistemas cementante se diseñan para que tengan cero por ciento (0 %) de fluido libre, esto es porque el fluido libre que pueda existir en el sistema afectaría las propiedades del mismo en el tope de la cementación, trayendo como consecuencia canales preferenciales para la migración de fluido; la causa del fluido libre lo tiene la segregación de las partículas de los distintos aditivos por no ser homogéneo el sistema; el valor de fluido libre que se obtuvo es de cero por ciento para este sistema.

La estabilidad de un sistema cementante viene dado por la homogeneidad de la lechada una vez fraguada, la diferencia entre el tope y la base del núcleo de cemento estudiado no debe ser mayor a 0,5 lb/gal según la norma API 10B, continuando con la idea en la tabla 5.67 se observa que el sistema es estable para las diferentes muestras evaluadas dando una densidad promedio de 12,81 y 12,88 lb/gal con una desviación estándar de 0,06. Luego de lo antes expuesto, resulta que las distintas muestras evaluadas el valor de la densidad se debe al colapso de las esferas poliméricas, abundando al respecto, Pereira (2006) precisa que, por las características propias del aditivo extendedor utilizado, el sistema sufre un incremento en la densidad igual a 1 lb/gal, al estar sometidos a presión; estos resultados difieren con respecto al valor de la lechada en 2 lb/gal, esto pudiera ser por la concentración de surfactante utilizada.

Tabla 5.72: Ensayo de Estabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

	Secciones	Peso sección en seco [g]	Peso sección en agua [g]	Densidad de la sección [lb/gal]	Densidad promedio [lb/gal]
Muestra 1	Tope	40,67	26,55	12,76	12,81
	Medio	39,18	25,38	12,86	
	Base	34,19	22,25	12,80	
Muestra 2	Tope	36,59	23,65	12,89	12,88
	Medio	37,72	24,32	12,92	
	Base	33,02	21,41	12,85	

A lo que respecta la reología de los sistemas cementantes, Bolívar (2003) señala que la reología permite diseñar el plan de bombeo de los fluidos en el pozo, identificar efectos de incompatibilidad de fluidos durante el desplazamiento y optimizar la operación de cementación durante la planificación, entonces para diseñar el plan de bombeo es necesario identificar los factores que afectan las propiedades reológicas de las lechadas de cemento que son la presión y la temperatura, donde esta última tiene incidencia sobre la viscosidad plástica y el punto cedente del sistema, hecha la acotación anterior en la tabla 5.73 se observa las lecturas promedio del esfuerzo de corte del sistema a diferentes velocidades del viscosímetro; calculándose así el logaritmo normal de la tasa de corte y del esfuerzo de corte para obtener la gráfica de los datos obtenidos y de los modelos reológicos, a fin de verificar el ajuste entre los datos y los modelos reológicos, en la misma también se observa que para las velocidades de 100, 200 y 300 rpm las lecturas de esfuerzo de corte son mayores que la escala del dial, donde el mismo llega hasta una lectura de 300, por tanto se reporta este valor máximo.

Continuando con lo anterior, en la tabla 5.74 se observa los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del modelo de Plástico de Bingham, y los valores de n y k para el modelo Ley de potencia, por consiguiente, el modelo reológico que mejor se ajusta es el de Ley de Potencia con un coeficiente de correlación de 0,9713. A pesar que el coeficiente de correlación no es mayor a 0,98 se considera que este modelo es el que mejor ajusta ya que se

puede observar gráficamente en la figura 5.51, donde en las tasas de cortes bajas hay mayor ajuste ente las curvas que en las tasas de cortes mas altas esto se debe a lo expresado anteriormente.

Este sistema puede ser utilizado ya que es capaz de desplazar el lodo hacia la superficie mientras éste es inyectado en el hoyo debido a la jerarquización de fluido el cual consiste en que el fluido que antecede posee mayores propiedades reológicas.

Tabla 5.73: Datos de reología del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

RPM	Promedio Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100ft ²]	log [γ]	log [τ]
1	23	1,71	24,50	0,232	1,389
2	40	3,41	42,60	0,533	1,629
3	48	5,12	51,12	0,709	1,709
6	56	10,23	59,64	1,010	1,776
10	71,5	17,05	76,15	1,232	1,882
20	114,5	34,10	121,94	1,533	2,086
30	145	51,15	154,43	1,709	2,189
60	222,5	102,30	236,96	2,010	2,375
100	300	170,50	319,50	2,232	2,504
200	300	341,00	319,50	2,533	2,504
300	300	511,50	319,50	2,709	2,504

Tabla 5.74: Modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100ft ²]	k [lbf s ⁿ /ft ²]	n	Coef. Correlación
Plástico de Bingham	290,11	88,15	----	----	0,7105
Ley de Potencia	----	----	22,00	0,4733	0,9713

En lo expresado anteriormente, la figura 5.51 se observa la gráfica del los modelos reológicos y los datos obtenidos para el sistema, donde el modelo reológico Ley de Potencia coincide con los datos de laboratorio corroborando lo

antes mencionado, a pesar que gráficamente no se puede apreciar, numéricamente se expresa.

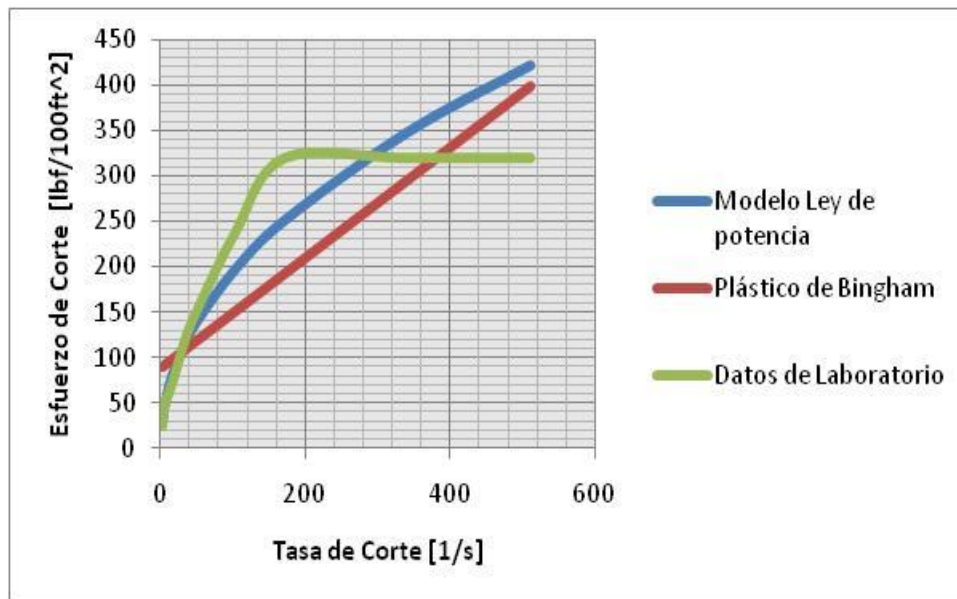


Figura 5.51: Gráfica de modelos reológicos del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Con respecto a este sistema, en la figura 5.52 se observa el volumen de filtrado en 30 minutos, dando como valor de 3,5 ml, siendo el momento crítico la diferencia de tiempo de 10 min (entre los minutos 15 y 25), al filtrar un volumen acumulado de 1 ml. En comparación con el sistema base sin el aditivo acelerador, hubo una reducción en el volumen de filtrado por efectos de la concentración de surfactante utilizada

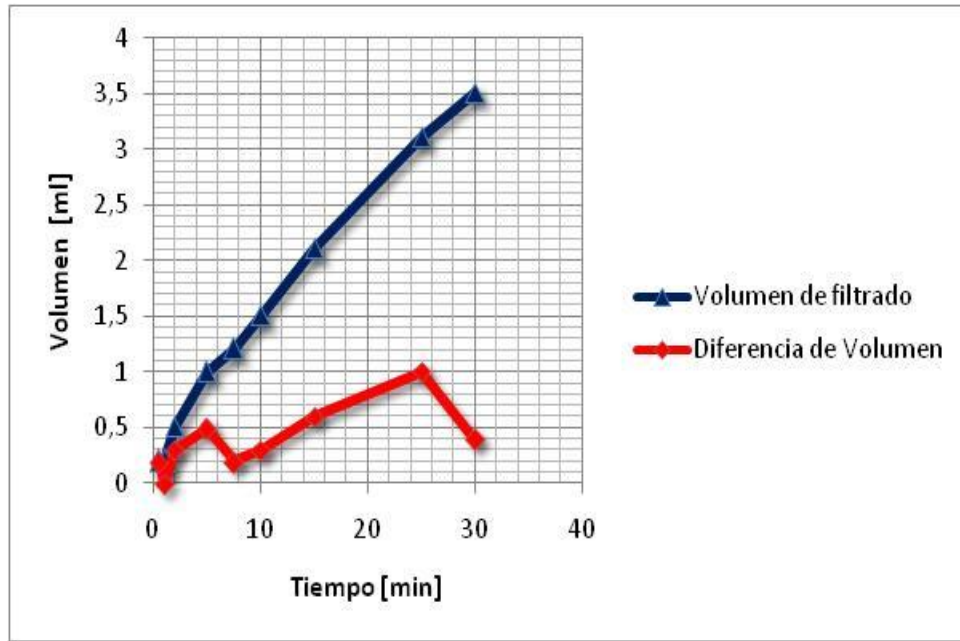


Figura 5.52: Gráfica de volumen de filtrado y volumen acumulado de filtrado del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

El sistema en estudio posee una permeabilidad promedio de las muestras de 0,013 mD como se observa en la tabla 5.75, donde este promedio tiene una desviación estándar de 0,003.

Tabla 5.75: Permeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

Muestra	ΔP Presión [psi]	Tiempo [min]	Volumen [ml]	K [mD]	K Promedio [mD]
1	60	15:00	0,13	0,015	0,013
2		15:00	0,08	0,009	
3		15:00	0,1	0,011	
4		15:00	0,15	0,017	

El tiempo de bombeabilidad del sistema es de 3 horas con 48 minutos aproximadamente (ver figura 5.53), manteniendo de igual manera el comportamiento esperado con la disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura luego del tiempo de premezclado. Al igual que los sistemas

evaluados anteriormente, el tiempo de bombeabilidad aumenta con respecto al sistema base sin A/A.

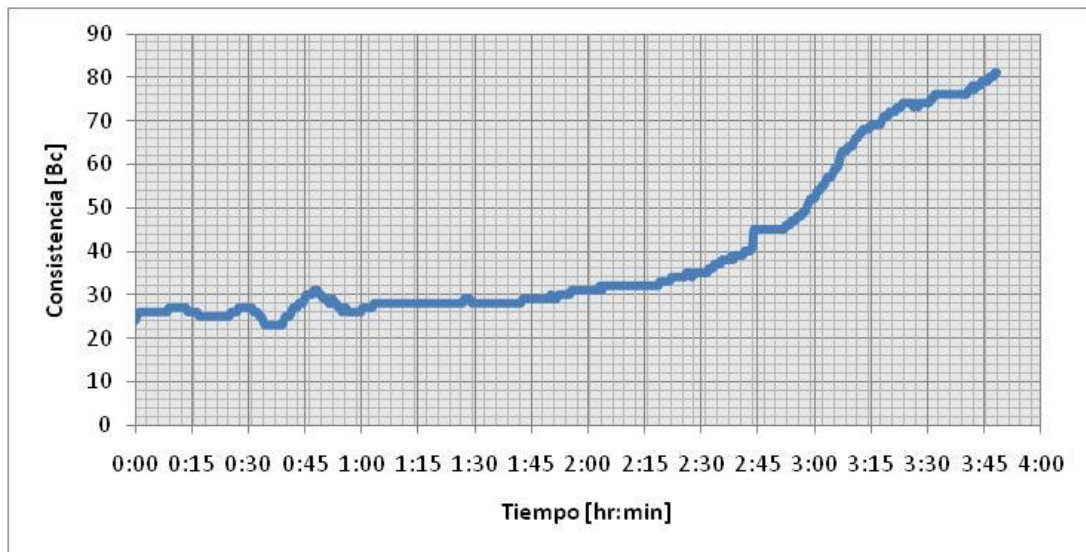


Figura 5.53: Tiempo de Bombeabilidad del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

El valor promedio de la resistencia a la compresión es de 894 psi como se observa en la tabla 5.71, con una desviación estándar de 86 psi, al igual que los sistemas ya evaluados hay una reducción considerable en la altura de los cubos por el colapso de las esferas de poliestireno.

Tabla 5.76: Resistencia al la compresión del sistema Blanco sin A/A + Surfactante C, 1,6 gal/sx

	Arista 1 [mm]	Arista 2 [mm]	área [mm ²]	Resistencia a la Compresión [psi]	Resistencia a la Compresión [psi] Promedio
Cubo 1	50,82	40,38	2052	831,66	894
Cubo 2	51	39,85	2032	824,45	
Cubo 3	50,91	40,75	2075	1009,35	
Cubo 4	50,82	40	2033	911,23	

5.6 PROPIEDADES CRÍTICAS DE LOS SISTEMAS EVALUADOS

Luego de lo antes expuesto, se presenta de manera ilustrativa los resultados obtenidos de modo comparativo, con el fin de conocer cual es el surfactante y a que concentración el mismo mejora la dispersión de las partículas de LITECEM® en la lechada.

Como se ha mencionado la estabilidad es una propiedad que se determina estimando la densidad en varias secciones de igual tamaño de cemento curado bajo las condiciones del pozo en celdas cilíndricas, en la figura 5.54, para los sistemas base con surfactante A presentan una sinergia para las dos primeras concentraciones, esto pudiera estar ocurriendo debido al aire entrampado en micro burbujas en el núcleo de cemento, por la cantidad de espuma generada cuando se hace la mezcla de la lechada, a diferencia con la concentración de 1,6 gal/sx de surfactante hay un aumento en la densidad muy por encima del sistema base, la hipótesis que se tiene es que el surfactante por la concentración utilizada hace que las partículas se atraigan más entre ellas generando una disminución en el volumen del núcleo.

De la misma manera al evaluar los sistemas sin el aditivo acelerador, se considera que para las tres concentraciones hay una correlación entre ellas manteniendo la densidad del cemento constante y similar a la del sistema base sin el aditivo acelerador.

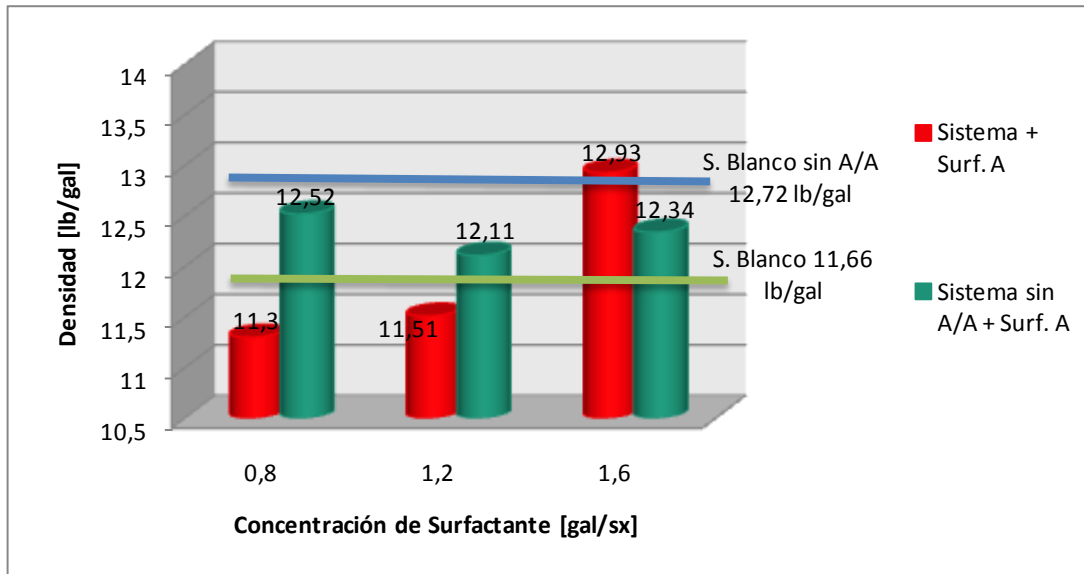


Figura 5.54: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Estabilidad para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones.

Continuando con los ensayos de estabilidad, para los sistemas base con el surfactante C, se tiene que los resultados permanecen por encima del sistema base (ver figura 5.55), en una diferencia aproximada de 1,5 lb/gal, no obstante los mismos puede deberse a las concertaciones utilizadas de surfactante, ya que el mismo se comporta de la misma manera a las tres concentraciones utilizadas.

Para los sistemas base sin el aditivo acelerador, los resultados son similares a los anteriores escritos, de igual manera hay una concordancia entre los tres sistemas donde no hubo variación y son similares al sistema base sin el aditivo acelerador.

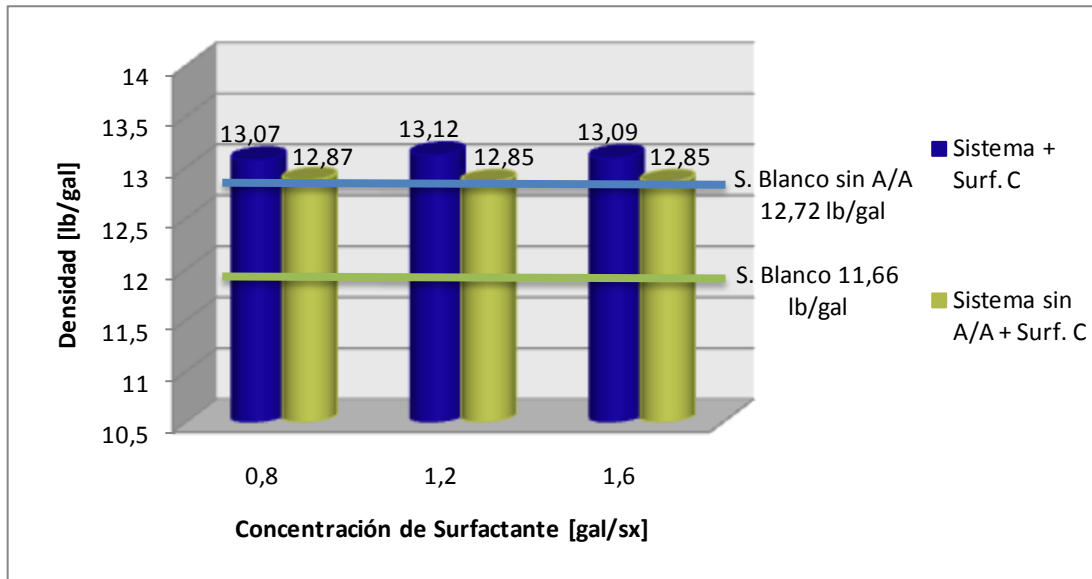


Figura 5.55: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Estabilidad para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones.

La evaluación de la pérdida de filtrado es importante, ya que indica si el sistema en estudio se deshidrata, trayendo como consecuencia que la lechada no genere las propiedades de resistencia para consideras que sea una buena cementación. De acuerdo con el volumen de filtrado se puede decir si el sistema es antimigratoria o no, para serlo el volumen del mismo no debe ser mayor a 30 ml, esto es según autores en la materia.

Como se puede observar en la figura 5.56, el mayor volumen de filtrado se obtuvo para el sistema Blanco, siendo la lechada diseñada para se utilizada en el campo cumpliendo así los requisitos del área de Tía Juana. Para los sistemas con surfactante A, hay una variación entre los mismos pero se mantienen por debajo del sistema base, esto nos puede decir que hay un una competencia entre el aditivo acelerador (metasilacato de sodio) y el surfactante ya que el aditivo tiene propiedades de retener las moléculas de agua y de igual manera las moléculas de surfactante tienen el mismo efecto.

A diferencia los sistemas blancos sin A/A con el surfactante A, el volumen de filtrado aumenta de acuerdo a la concentración utilizada, resultados que se

observan en la figura 5.56, esto es porque hay mayor volumen de la fase continua (líquido).

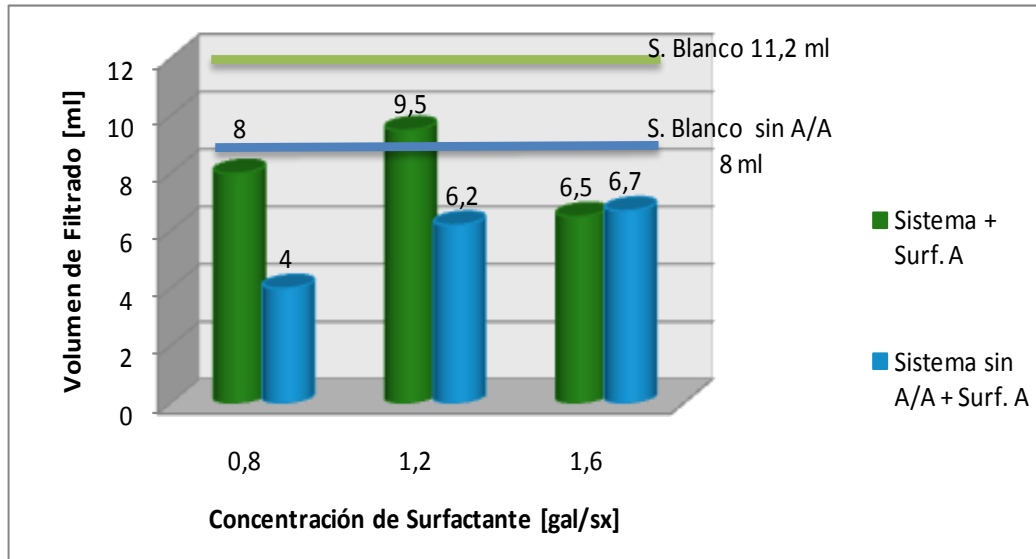


Figura 5.56: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Pérdida de filtrado para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones.

Para ambos sistemas con surfactante C, la cantidad de volumen filtrado se mantiene, para el sistema base con el aditivo acelerador es ligeramente mayor al que no lo tienen, eso se debe a la interacción que pudiera haber en los mismos con la retención de las moléculas de agua.

De igual forma para los distintos sistemas se considera que tienen capacidad antimigratoria por la cantidad de volumen filtrada.

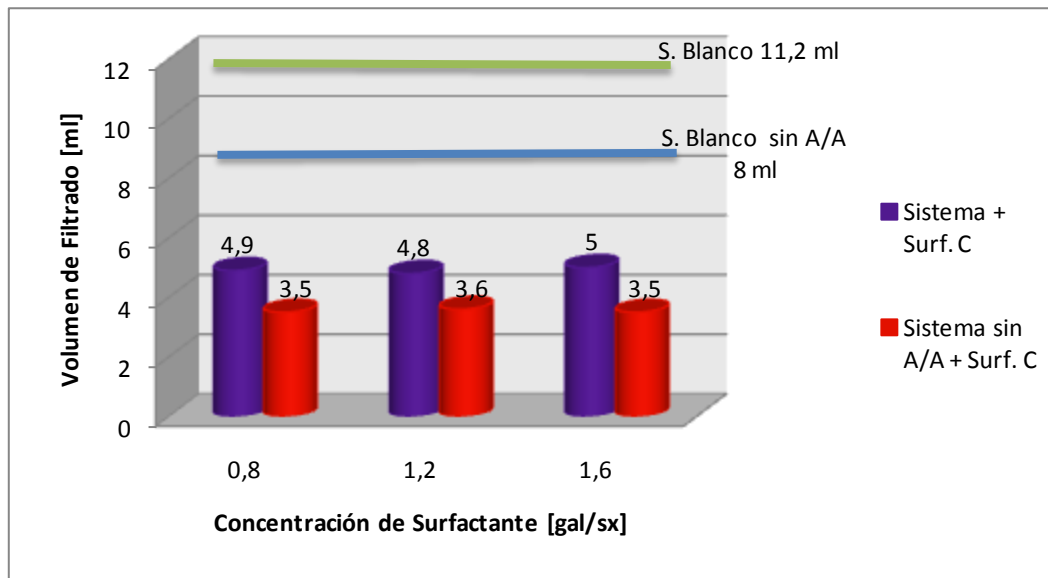


Figura 5.57: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Pérdida de filtrado para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones.

La permeabilidad en los sistemas cementante debe ser baja, ya que se encuentra en el orden de 10^{-4} , para los sistemas evaluados dicha propiedad aumenta debido a que se agrega un porcentaje de partículas de mayor tamaño (de 250 a 350 μm) lo cual puede ayudar a crear espacios entre las mismas y las partículas de cemento, ya que se cree que las partículas de cemento no se adhieren a la pared de las esferas poliméricas.

Por consiguiente, en la figura 5.58 se observa los valores de permeabilidad por medio de un gráfico de barras, donde esta propiedad aumenta a medida que se incrementa la concentración del surfactante A. Esto ocurre para los sistemas evaluados con o sin el aditivo acelerador, pero si tomamos en consideración la desviación estándar de cada uno de los resultados los mismos mantienen una relación de estabilidad para las muestras evaluadas, donde este valor permanece bajo para los diseños.

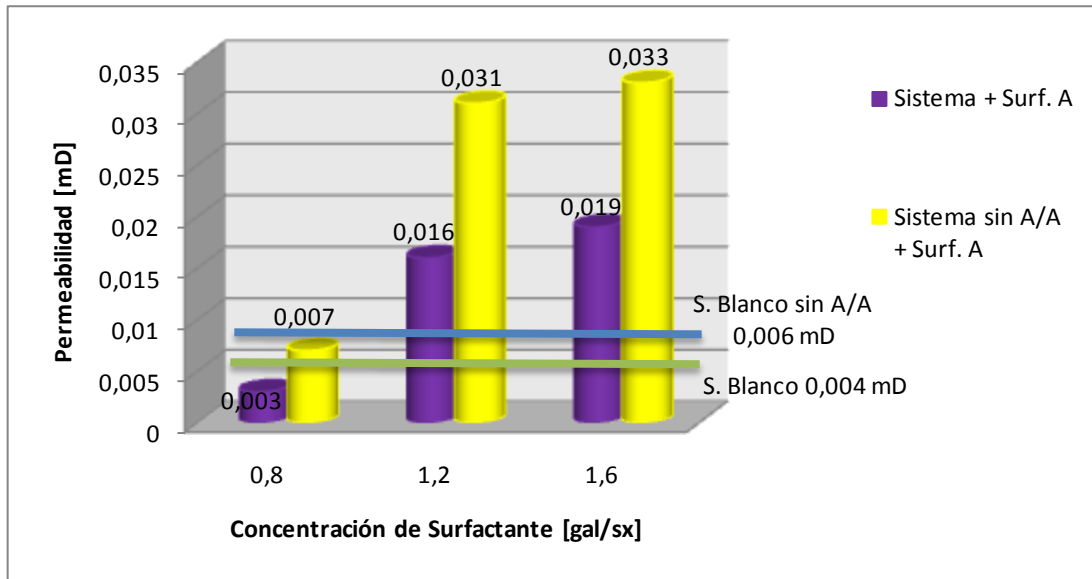


Figura 5.58: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Permeabilidad para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones.

Continuando con la evaluación de la permeabilidad, para los sistemas con surfactante C, los valores de dicha propiedad para los diseños bases va en aumento medida que se incrementa la concentración de surfactante, y los diseños que no poseen el A/A la propiedad disminuye con el incremento de surfactante, de igual manera si se observa la desviación estándar para estos sistemas, los mismos se mantienen constantes y con baja permeabilidad.

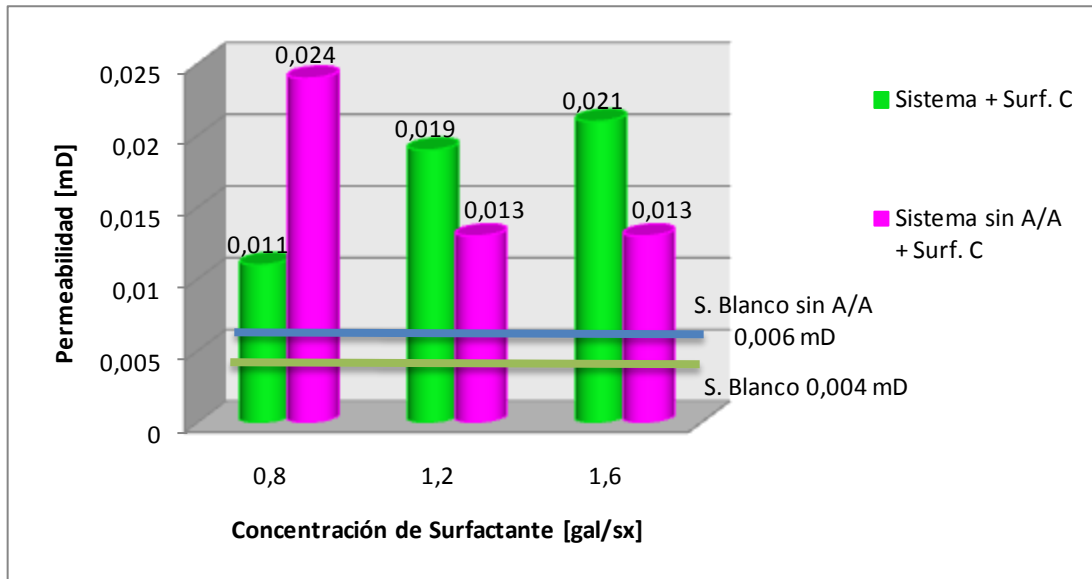


Figura 5.59: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Permeabilidad para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones.

El tiempo de bombeabilidad permite determinar el tiempo con el que la lechada puede ser bombeada cuando se encuentra bajo las condiciones del pozo. En la figuras 5.60 y 5.61 observamos el tiempo de bombeabilidad para cada uno de los sistemas evaluados.

Para los sistemas con surfactante A (figura 5.60), se puede observar que el tiempo aumenta a medida que la concentración de surfactante aumenta, esto se debe a que las moléculas de surfactante no permiten que las partículas de cemento se hidraten con facilidad, extendiendo así en tiempo de espesamiento de la lechada.

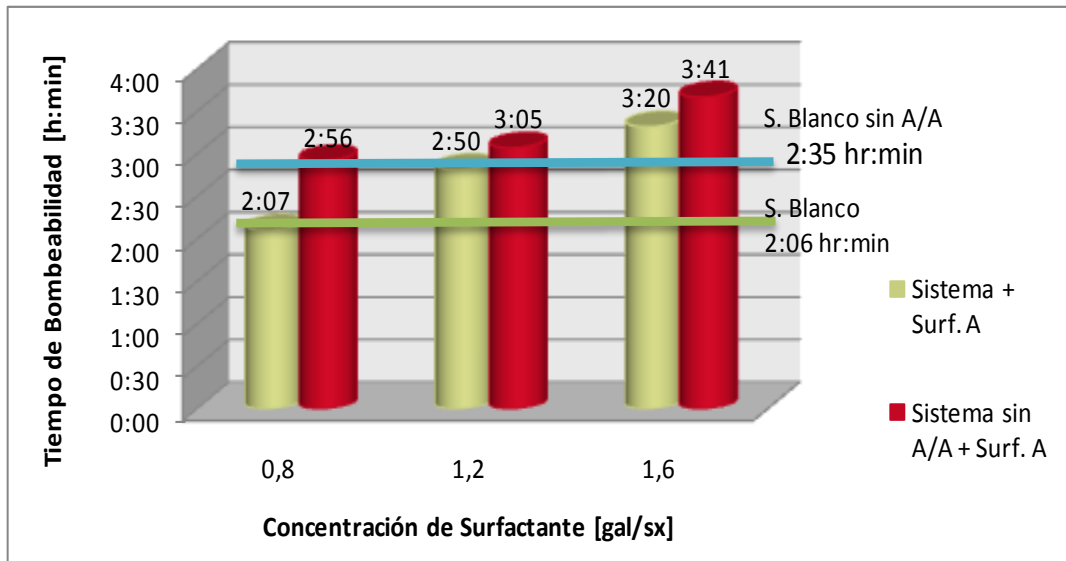


Figura 5.60: Gráfica comparativa de resultados del ensayo Tiempo de Bombeabilidad para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones.

En los sistemas con surfactante C (figura 5.61), el tiempo de espesamiento permanece constante tanto para los sistemas base como para los sistemas base sin el A/A, esto se debe especialmente a que el surfactante C posee 100 % de materia activa, por tanto al utilizar la más baja concentración de mismo (0,8 gal/sx) y seguida de las otras, se tiene la máxima concentración de moléculas de surfactante adsorbida en la superficie de las partículas de cemento, por ende las concentraciones mayores a 0,8 gal/sx de este surfactante no generan cambios en las propiedades evaluadas.

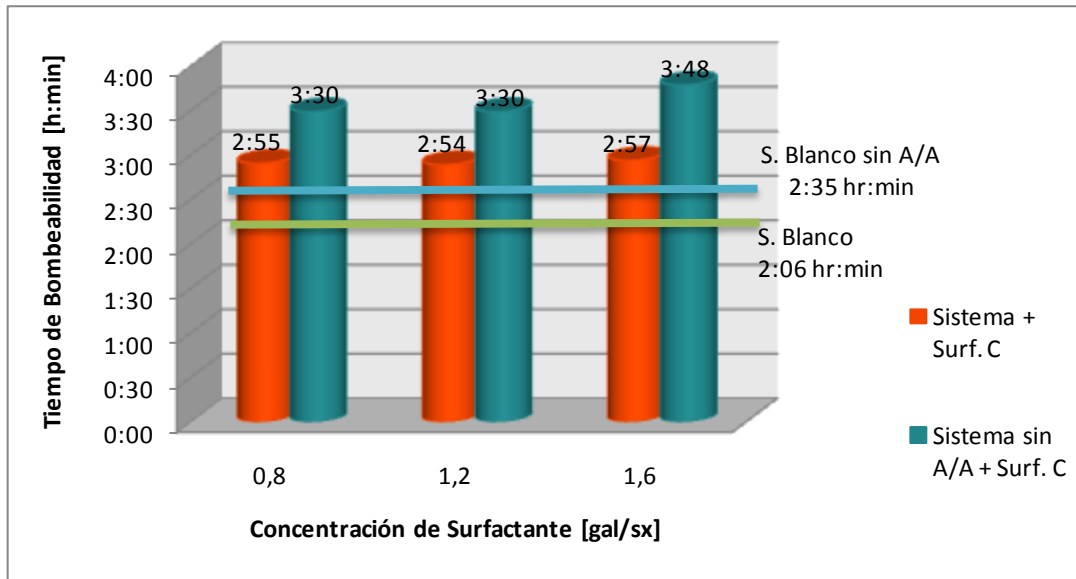


Figura 5.61: Gráfica comparativa de resultados del ensayo Tiempo de Bombeabilidad para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones.

Hasta ahora se ha discutido los resultados de los distintos ensayos realizados que pueden ayudar en la escogencia del surfactante, sin embargo el ensayo de resistencia a la compresión siendo no menos importante que los demás, el mismo debe tener un valor mínimo requerido, puesto que luego de la operación de cementación se realizan distintas maniobras, donde este trabajo puede ser afectado si no posee dicho valor.

A propósito de lo anterior, la resistencia a la compresión de los sistemas con surfactante A se muestran en la figura 5.62, donde los mismos permanecen constantes para los sistemas bases, siendo mayor que el sistema base sin surfactante, esto pudiera deberse a la interacción que existe entre el aditivo acelerador y el surfactante con la retención de las moléculas de agua como se mencionó anteriormente.

Los sistemas sin el A/A y surfactante A, la resistencia a la compresión disminuye considerablemente en comparación a los sistemas anteriores, pero de igual manera permanecen constantes para las distintas concentraciones utilizadas.

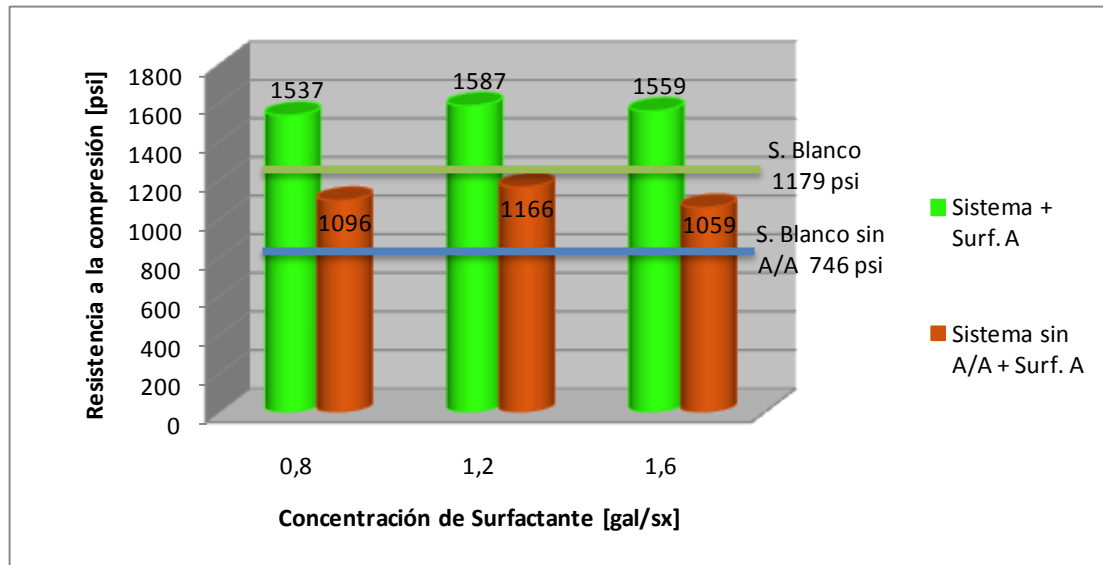


Figura 5.62: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Resistencia a la Compresión para los sistemas con surfactante A, para las distintas concentraciones.

Continuando con los resultados de la resistencia a la compresión, los sistemas con surfactante C, se observó en la figura 5.63 que disminuye la misma a medida que se aumenta la concentración del surfactante. Para los sistemas bases se nota una diferencia considerable entre el sistema blanco y el que posee una concentración de 0,8 gal/sx, de igual manera como se mencionó anteriormente es posible que la interacción surfactante aditivo acelerador generen la retención de las moléculas de agua dando como consecuencia resistencias a la compresión temprana.

Esto se puede verificar observando en dicha figura, los valores de resistencia para los sistemas sin el A/A, ya que los mismos disminuyen en comparación a los otros. El sistema blanco sin A/A este valor es bajo ya que no se desarrolla resistencias tempranas por la ausencia del aditivo que en parte ayuda a generar esta propiedad.

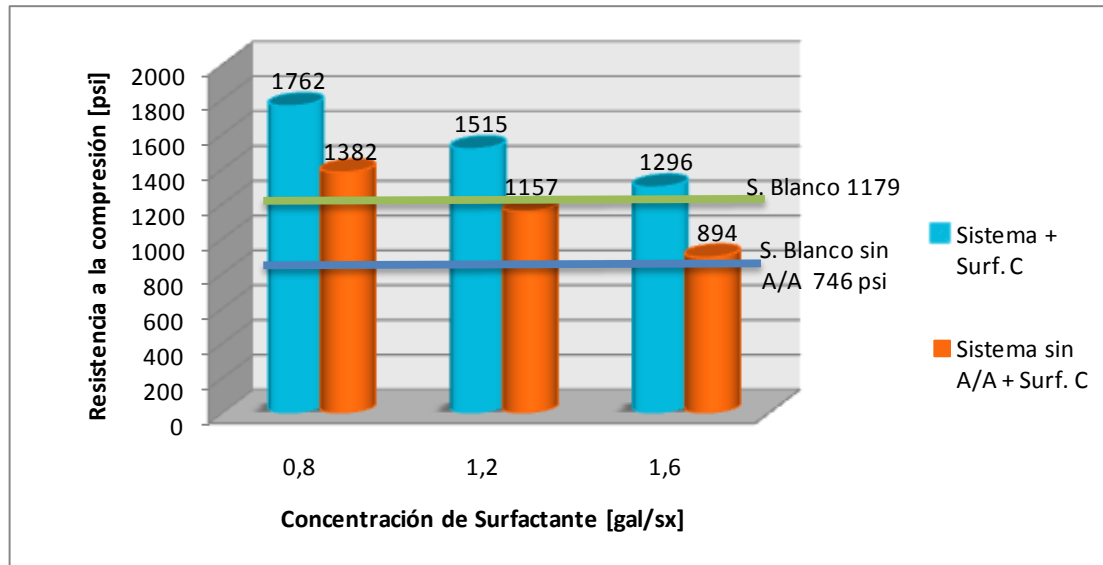


Figura 5.63: Gráfica comparativa de resultados del ensayo de Resistencia a la Compresión para los sistemas con surfactante C, para las distintas concentraciones.

En consecuencia de lo expuesto antes, la evaluación de las distintas propiedades de evaluadas tanto a la lechada como el cemento, los surfactantes A y C en presencia del cemento no perdieron la capacidad de dispersión de las partículas de LITECEM[®], pero al estudiarlos como aditivos de la lechada el surfactante C mejoras las propiedades del sistema.

El metasilicato de sodio en la industria de cementación de pozos, es un aditivo extendedor, pero para efectos de los sistemas evaluados cumple con mejorar la dispersión de las partículas poliméricas viscosificando la lechada de manera tal de integrar las mismas en el seno de la de la mezcla. Este aditivo reacciona con la caliza del cemento o con el cloruro de calcio adicionado al sistema, donde el mismo genera un gel de calcio-silicato, donde el mismo tiene la propiedad que al mezclarse permite reducir el agua libre.

Hecha la acotación anterior, se verifica que puede haber una interacción entre el dicho aditivo y el surfactante, dando excelentes resultados a favor del sistema; en cuanto a la concentración del surfactante C, se observa que para a las tres concentraciones no hay variación para los ensayos realizados, por tal motivo se

escoge la menor concentración (0,8 gal/sx), ya que representa una disminución en el costo del sistema a utilizar.

CONCLUSIONES

1. La tensión superficial de las soluciones acuosas de surfactantes no varía con respecto a las soluciones que se encuentran en presencia de cemento para los surfactantes A y C, a diferencia del surfactante B, que se nota una amplia diferencia en las tensiones superficiales.
2. La mojabilidad de las partículas de LITECEM[®], varia de acuerdo a las soluciones acuosas de surfactantes, siendo los surfactantes A y C los que mejor mojan la superficie sólida de las partículas, esto ocurre mediante la cadena lipofílica del surfactante que se adsorbe sobre la superficie sólida. A diferencia del surfactante B no genera cambios sobre la mojabilidad de las esferas. Para estos ensayos no se calculó el ángulo de contacto por la no linealidad de los resultados obtenidos.
3. El efecto de los surfactantes sobre la mojabilidad de las partículas de cemento, varía de acuerdo al mismo, para el surfactante A no se obtuvo el ángulo de contacto ya que el mismo retrasa la penetración del agua dentro del lecho de partículas de cemento donde la ecuación de Washburn no puede ser aplicada por la incongruencia de los datos obtenidos; para los surfactantes B y C los ángulos de contacto son mayores que el obtenido con agua, esto significa que la adsorción de los surfactantes disminuye la velocidad de hidratación del cemento.
4. La escogencia de los surfactantes A y C para la evaluación de los mismos en el laboratorio de cementación, se debe a su capacidad de mejorar la mojabilidad de las partículas poliméricas en soluciones acuosas.

5. De acuerdo con los ensayos que se recomiendan en la norma API 10A, el cemento clase H lote 174, cumple con los requisitos de control de calidad siendo el mismo apto.
6. La estabilidad de los sistemas cementantes evaluados aumentan en 2 lb/gal su densidad haciéndola más densa luego del fraguado.
7. El tiempo de bombeabilidad para los sistemas con surfactante A aumentan de acuerdo a la concentración de surfactante utilizada, a diferencia del surfactante C, que para las tres concentraciones se mantiene constante. Esto ratifica la hipótesis planteada de que los surfactantes retrasan la velocidad de hidratación de las partículas de cemento, siendo este valor más amplio a medida que se aumenta la concentración del mismo.
8. Los surfactantes disminuyen el volumen de filtrado de los sistemas, para el surfactante A la cantidad de volumen varia de acuerdo a la concentración, pero el surfactante C se mantiene constante a las distintas concentraciones.
9. La resistencia a la compresión se mantiene constante para el surfactante A, a diferencia del surfactante C que disminuye a medida que aumenta la concentración del mismo.
10. El surfactante C a la concentración de 0,8 gal/sx, es el que mejor dispersa las esferas de poliestireno, mejorando las propiedades de: volumen de filtrado, resistencia a la compresión y permeabilidad.

RECOMENDACIONES

1. Para el surfactante C, se recomienda realizar evaluaciones a bajas concentraciones de 0,8 gal/sx para registrar el efecto sobre la mojabilidad de las esferas poliméricas.
2. Estudiar la interacción de los surfactantes con el cemento, para observar si los mismos aumentan la densidad luego de fraguado.
3. Estudiar la interacción del aditivo acelerador (metasilicato de sodio) y el surfactante, ya que tiene como efecto el aumento de resistencia a la compresión sobre los sistemas cementantes evaluados.
4. Realizar la evaluación económica de las lechadas de baja densidad.
5. Realizar microscopia electrónica para observar la morfología de los sistemas.
6. Realizar un análisis químico y una difracción de rayos X, a las muestras de los sistemas evaluados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Arrieta, M. (s.f.). Revestimeinto y cementacion de pozos. Consultado el 19 de noviembre de 2.011, de [http://www.buenastareas.com/ensayos/Cementacion-De-Pozos-y-Revestidotes /207 1001.html](http://www.buenastareas.com/ensayos/Cementacion-De-Pozos-y-Revestidotes/2071001.html).

[2] Balestrini, M. (2006). Como se elabora el proyecto de investigación. 7ma ed. Caracas, Editorial Consultores Asociados.

[3] Carruyo, J. (2005). Evaluación de la tecnología de lodo cementante aplicada en pozos de inyección alterna de vapor en las áreas de tierra este pesado. Trabajo especial de grado. La Universidad del Zulia, Maracaibo. Documento no publicado.

[4] Colina A., Mas M., Aular W., Blanco A. y Massirubi L. (2004). Tecnología y Aplicación en campo de lechada tensoactiva. SEFLU CEMPO, Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta. Venezuela.

[5] Díaz, P. y Méndez, A. (2007). Fundamentos teóricos prácticos de perforación y construcción de pozos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

[6] Galindo, C., Gil, L., Gutiérrez, R., Millan, R., Ordoñez, A., Sánchez, C., Semprum, H. (2006). Retrogresión térmica en los cementos petroleros. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

[7] Lilkov, V.; Djabarov, N.; Bechev, G.; Kolev, K. (1999). Properties and hydration products of lightweight and expansive cements. Part I: Physical and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 29: 1635-1640.

- [8] Martínez, S., Blanco, M. (2008). Caracterización estructural y microestructural de geles C-S-H. X Congreso Nacional de Materiales. Donostia - San Sebastián.
- [9] Moulin, E.; Philippe, R.; Jain, B. (1997). Using Concrete Technology to improve the Performance of Lightweight Cements. SPE/IADC N° 39276. Bahrain.
- [10] Nelson, E Nelson, E. (1990). Well Cementing. Schlumberger Dowell, Sugar Land. Texas.
- [11] PDVSA Intevep. (1997). Diseño y prueba de la lechada de cemento liviano LITECEM®. Informe técnico. Los Teques. Documento confidencial.
- [12] PDVSA Intevep. (2006). Protocolo de aplicación del producto tecnológico LITECEM®. Manual. Los Teques. Documento confidencial.
- [13] PDVSA Servicios. (2010). Programa de perforación Campo Lago Norte I (área Tía Juana Lago). Gerencia de Ingeniería de Perforación. El Menito, Estado Zulia. Documento Confidencial.
- [14] Puertas F. y Vazquez T. (2001). Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN, Vol. 51, n° 262, abril/mayo/junio. España.
- [15] Quintero, F. (2011). Diseño, caracterización y evaluación de un fluido de terminación y rehabilitación de pozos basado en soluciones acuosas de surfactantes. Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio. Informe Final Trayecto IV. Los Teques, Venezuela.

- [16] Rivas, H., y Gutiérrez, X., (1999). Los Surfactantes: comportamiento y algunas de sus aplicaciones en la industria Petrolera. *Acta Científica Venezolana*, 50(1), 54-65.
- [17] Rivera, J. (2004). *Práctica de Ingeniería de yacimientos petrolíferos*. Universidad del Oriente, Venezuela.
- [18] Rodríguez, R. (2012). Propuesta técnica de cementación para la construcción de un pozo exploratorio en aguas ultra-profundas en el golfo de México. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- [19] Rosen, M.J. (2004). *Surfactants and interfacial phenomena*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- [20] Rulison, C. (s.f.). wettability studies for porous solids including powders and fibrous materials. *Laboratory Services and Instrumentation for Surface Science*. Technical note #302. Krüss USA.
- [21] Sabino, C. (2007) “El Proceso de Investigacion”. Editorial Panapo. Caracas.
- [22] Salager, J., (2002). *Fenómenos Interfaciales en Dispersiones Polifásicas y en Medios Porosos*. Universidad de los Andes, Cuaderno FIRP S122-N.
- [23] Schlumberger (1997). *Well Evaluation Conference Venezuela – Evaluacion de Pozos*. Cap. 1.
- [24] Solís R., Moreno E. y Chuc N. (2006). Evaluación del concreto con reductor de agua en clima cálido. *Ingeniería* 16 (2): 103-111, ISSN: 1409-2441. San José, Costa Rica.

[25] Spoerker, H., OMV A. y Doschek, M. (2002). Field Experience with Applying Foamed Cement Slurries in Mature Depleted Formations. Paper IADC/SPE 77215. Jakarta, Indonesia.

[26] The Robert Gordon University. (2007). Cementing Operation. MSc Energy Programme / Drilling Technology Cementing Operations.

[27] Zapata, I. (2001). Interpretación sísmica estructural 3D y uso de atributos sísmicos en el cretácico. Bloques IX y XIV del Lago de Maracaibo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

BIBLIOGRAFÍA

Arias, F. (1999) “El Proyecto de Investigación, Guía Para su Elaboración”, 3era ed. Caracas, Editorial Episteme – Oriol Ediciones.

Arrieta, M. (s.f.). Revestimiento y cementación de pozos. Consultado el 19 de noviembre de 2.011, de [http://www.buenastareas.com/ensayos/Cementacion-De-Pozos-y-Revestidores /207 1001.html](http://www.buenastareas.com/ensayos/Cementacion-De-Pozos-y-Revestidores/2071001.html).

Balestrini, M. (2006). Como se elabora el proyecto de investigación. 7ma ed. Caracas, Editorial Consultores Asociados.

Blanco, A. (s.f.). Cementación primaria y secundaria. Programa de postgrado en perforación petrolera. UNEFA. Caracas, Venezuela. Presentación digital.

Bolívar, R. (2003). Taller especial para Ingenieros sobre cementación de pozos de petróleo y gas. Holcim Venezuela. Presentación Digital.

Carruyo, J. (2005). Evaluación de la tecnología de lodo cementante aplicada en pozos de inyección alterna de vapor en las áreas de tierra este pesado. Trabajo especial de grado. La Universidad del Zulia, Maracaibo. Documento no publicado.

Colina A., Mas M., Aular W., Blanco A. y Massirubi L. (2004). Tecnología y Aplicación en campo de lechada tensoactiva. SEFLU CEMPO, Isla de Margarita, Estado Nueva Esparta. Venezuela.

Díaz, P. y Méndez, A. (2007). Fundamentos teóricos prácticos de perforación y construcción de pozos. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Escuela de Ingeniería de petróleo, Universidad Central de Venezuela. “Guía General de Pozos I”. Caracas, Venezuela.

Galindo, C., Gil, L., Gutiérrez, R., Millan, R., Ordoñez, A., Sánchez, C., Semprum, H.(2006). Retrogresión térmica en los cementos petroleros. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Lilkov, V.; Djabarov, N.; Bechev, G.; Kolev, K.(1999). Properties and hydration products of lightweight and expansive cements. Part I: Physical and mechanical properties. *Cement and Concrete Research*, 29: 1635-1640.

Martínez, S., Blanco, M.(2008). Caracterización estructural y microestructural de geles C-S-H. X Congreso Nacional de Materiales. Donostia - San Sebastián.

Moulin, E.; Philippe, R.; Jain, B. (1997). Using Concrete Technology to improve the Performance of Lightweight Cements. SPE/IADC N° 39276. Bahrain.

Nelson, E Nelson, E. (1990). Well Cementing. Schlumberger Dowell, Sugar Land. Texas.

Pardey, R, Ramírez, C., Centeno, A., Castañeda, I, Medina U. (1997). Diseño y prueba de la lechada de cemento liviano LITECEM®. Informe técnico. Los Teques, Venezuela: Intevp. [Documento confidencial].

Pardey, R, Ramírez, C., García, J., Colina, A., Medina, U., Mcpherson, I., Casillo, P., Soto, J., Centeno, A. (1999). Evaluación de la tecnología LITECEM en la

celda anular (CEPRO). Informe técnico. Los Teques, Venezuela: Intevep. [Documento confidencial]

Pereira, F., Buccellato, V. (2006). Protocolo de aplicación del producto tecnológico LITECEM®. Manual. Los Teques, Venezuela. [Documento confidencial].

PDVSA Servicios. (2010). Programa de perforación Campo Lago Norte I (área Tía Juana Lago). Gerencia de Ingeniería de Perforación. El Menito, Estado Zulia. Documento Confidencial.

Puertas F. y Vazquez T. (2001). Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes. *Materiales de construcción*, Vol. 51, n° 262, abril/mayo/junio. España.

Quintero, F. (2011). Diseño, caracterización y evaluación de un fluido de terminación y rehabilitación de pozos basado en soluciones acuosas de surfactantes. Instituto Universitario de Tecnología Dr. Federico Rivero Palacio. Informe Final Trayecto IV. Los Teques, Venezuela.

Recommended Practice for Testing Well Cements. (2005). Washington: American Petroleum Institute. 171p. [ANSI API RP 10B-2/ISO 10426-2:2005]

Rivas, H., y Gutiérrez, X., (1999). Los Surfactantes: comportamiento y algunas de sus aplicaciones en la industria Petrolera. *Acta Científica Venezolana*, 50(1), 54-65.

Rivera, J. (2004). *Práctica de Ingeniería de yacimientos petrolíferos*. Universidad del Oriente, Venezuela.

Rodríguez, R. (2012). Propuesta técnica de cementación para la construcción de un pozo exploratorio en aguas ultra-profundas en el golfo de México. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.

Rosen, M.J. (2004). Surfactants and interfacial phenomena. John Wiley & Sons, Nueva York.

Rulison, C. (s.f.). wettability studies for porous solids including powders and fibrous materials. Laboratory Services and Instrumentation for Surface Science. Technical note #302. Krüss USA.

Sabino, C. (2007) “El Proceso de Investigación”. Editorial Panapo. Caracas.

Salager, J., (2002). Fenómenos Interfaciales en Dispersiones Polifásicas y en Medios Porosos. Universidad de los Andes, Cuaderno FIRP S122-N.

Salager, J. y Fernandez, A. (2004). Surfactantes. Universidad de los Andes, Cuaderno FIRP S301-PP.

Schlumberger (1997). Well Evaluation Conference Venezuela – Evaluacion de Pozos. Cap. 1.

Solís R., Moreno E. y Chuc N. (2006). Evaluación del concreto con reductor de agua en clima cálido. Ingeniería 16 (2): 103-111, ISSN: 1409-2441. San José, Costa Rica.

Spoerker, H., OMV A. y Doschek, M. (2002). Field Experience with Applying Foamed Cement Slurries in Mature Depleted Formations. Paper IADC/SPE 77215. Jakarta, Indonesia.

The Robert Gordon University. (2007). Cementing Operation. MSc Energy Programme / Drilling Technology Cementing Operations.

Zapata, I.(2001). Interpretación sísmica estructural 3D y uso de atributos sísmicos en el cretácico. Bloques IX y XIV del Lago de Maracaibo. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.