

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**EVALUACIÓN DE UN POLÍMERO COMO AGENTE
CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS EN LECHADAS DE
CEMENTO**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Sardi R., Luis E.
Para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2015

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DE UN POLÍMERO COMO AGENTE CONTROLADOR DE MIGRACIÓN DE GAS EN LECHADAS DE CEMENTO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Wills, Violeta.

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Millan J., Adolfo J.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Sardi R., Luis E.
Para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo

Caracas, 2015

Caracas, Abril de 2015

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Luis E. Sardi R., titulado:

“Evaluación de un polímero como agente controlador de migración de gas en lechadas de cemento”

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 el autor, lo declaran APROBADO.


Prof. Miguel Castillo
Jurado


Prof. Pedro Díaz
Jurado


Prof. Pedro Martorano
Jurado

DEDICATORIA

El presente Trabajo Especial de Grado y los logros alcanzados durante mi etapa académica, se los dedico a mis Padres, Luis Enrique José Sardi Bracho y Maria Roman de Sardi y a mi hermana Astrid Elizabeth Sardi Roman, quienes me han acompañado con su cariño y apoyo, durante este largo camino.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por brindarme salud y sabiduría, para poder afrontar todos los obstáculos y retos encontrados durante mi formación académica.

En segundo lugar, es mi deseo expresar mi gratitud a mis Padres, por darme vida, ser mis ejemplos a seguir y ser responsables de formar a la persona que soy hoy en día, los Amo. A mi hermana, que sin duda alguna, por su cariño, paciencia y consejos, es un pilar fundamental en mi vida.

Quiero extender un agradecimiento especial, a Pedro De Los Santos y Luigi García, junto a quienes, he tenido la fortuna de disfrutar, compartir y recorrer, esta importante etapa de mi vida. Gracias por su hermandad, amistad y soporte. A Carlos Federico Rodríguez, por el cariño y apoyo incondicional y su constante impulso durante mi carrera.

Agradecer a la Universidad Central de Venezuela, esta maravillosa casa de estudio, en cuyos espacios he adquirido gran cantidad de conocimiento y desarrollado diversas herramientas técnicas y personales, que sin duda alguna servirán de base, para enfrentar los innumerables retos en la etapa profesional.

A mis compañeros de la Escuela de Petróleo y de la Facultad de Ingeniería, quienes han compartido vivencias y conocimientos conmigo, durante mis días en la universidad. En especial a Kristoffer Torres, Angelo Capacho y Derbid Guerrero, por los cuales siento un profundo respeto y aprecio.

A todos los profesores que durante mi carrera, compartieron sus experiencias y conocimientos, poniendo cada uno su grano de arena en mi formación académica. En especial, quiero extender mi agradecimiento, a la profesora Adriana Zambrano y al profesor Orlando Méndez, quienes cuentan con mi respeto, orgullo y admiración, por su trayectoria, experiencia, conocimiento, pasión y compromiso con la Universidad Central de Venezuela y la industria petrolera.

A las personas encargadas de asesorar y orientar el desarrollo del presente Trabajo Especial de grado, la Ing. Violeta Wills y el Ing. Adolfo Millan, por su sabiduría, consejos y recomendaciones. A Giovannina Ragusa y todo el equipo del Laboratorio de Schlumberger, Well Services – Las Morochas, en especial a los integrantes de la celda de cementación, José Pachecho, Luisa Tua, Edixon Ramirez y su familia, por compartir de una manera humana y sincera sus amplios conocimientos de cementación, experiencias y su valioso tiempo, durante mi estancia en Ciudad Ojeda.

Para finalizar, quiero extender un reconocimiento y agradecimiento especial a la empresa Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA), y a las siguientes personalidades y empleados: Eulogio Del Pino, Héctor Andrade, Marisela Brito, Wanda Colmenares, Werther Sandoval y María Acosta, por el apoyo permanente a mi persona, a los estudiantes de la Escuela de Petróleo y al Capítulo Estudiantil SPE, en diversos proyectos, eventos y visitas técnicas, que sin duda alguna complementaron de manera positiva mi formación académica.

Sardi R., Luis E.

**EVALUACIÓN DE UN POLÍMERO COMO AGENTE CONTROLADOR DE
MIGRACIÓN DE GAS EN LECHADAS DE CEMENTO**

Tutor Académico: Prof. Violeta Wills. Tutor Industrial: Ing. Adolfo Millan.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de
Petróleo. Año 2015, 111 p.**

Palabras Claves: Migración de gas, Cementación, Lechadas de cemento, Polímero,
Sistemas Sólidos, *Blend*.

Resumen. Petróleos de Venezuela S.A (PDVSA), adelanta una campaña de perforación de pozos someros en locaciones terrestres a lo largo de la costa oriental del Lago de Maracaibo como parte del desarrollo del área Tierra Este Pesado del campo Costanero Bolívar. La caracterización geológica, geofísica y la experiencia en la explotación del área, indican una potencial presencia de gas en las formaciones que comprenden la sección intermedia de los pozos; lo cual, ocasiona un importante riesgo de migración de este fluido hacia el espacio anular. Esto genera la necesidad de utilizar una lechada de cementación con propiedades antimigratorias. La empresa de servicios petroleros Schlumberger utiliza aditivos líquidos en el diseño de este tipo de lechadas. Sin embargo, se presenta una problemática cuando se utilizan grandes volúmenes de sistemas líquidos, dado que para poder cumplir con los requerimientos de control de calidad exigidos por el cliente, estos deben ser preparados con suficiente anticipación a la fecha del trabajo de cementación; lo cual, puede originar situaciones como ataque de bacterias, degradación, envejecimiento y contaminación de estos sistemas durante su manipulación y transporte. Por lo tanto, el presente estudio, encontró la manera de reducir el uso de aditivos químicos en estado líquido para el diseño de estas lechadas, a través de la evaluación de un polímero sólido como agente controlador de migración de gas en el diseño de lechadas de cementación compuestas únicamente por aditivos químicos en estado sólido mezclados con el cemento seco (*blend*). De esta manera se logró eliminar la necesidad de preparación de agua de mezcla, optimizar el uso de materiales y aditivos, mejorar la logística operacional, reducir los costos de producción de este tipo de lechadas y aumentar la eficiencia del servicio prestado a la empresa operadora nacional.

ÍNDICE

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABLAS	XIII
LISTA DE ECUACIONES.....	XIV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
OBJETIVOS.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
JUSTIFICACIÓN	3
ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	4
CAPÍTULO II	5
MARCO TEÓRICO.....	5
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	5
CEMENTACIÓN	7
Tipos de cementación	8
Tipos de sarta de revestimiento	10
Equipos de cementación	12
Diseño de la cementación	19
LECHADA DE CEMENTO.....	22
Cemento Portland	23
Aditivos químicos	25
Propiedades de una lechada de cemento.....	29

Migración de Gas.....	32
CAPÍTULO III.....	36
MARCO METODOLÓGICO.....	36
TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	36
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	36
POBLACIÓN Y MUESTRA.....	38
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	38
Revisión Bibliográfica.....	38
Gráficas.....	38
Pruebas de Laboratorio.....	39
Descripción de equipos.....	39
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
Fase I Selección de las condiciones operacionales.....	48
Fase II Procura y preparación de materiales.....	49
Fase III Recopilación de la evaluación del sistema convencional.....	55
Fase IV Optimización y evaluación del sistema propuesto.....	56
Fase V Análisis, conclusiones y recomendaciones.....	64
CAPÍTULO IV.....	65
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	65
UBICACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO.....	65
CAMPO COSTANERO DE BOLÍVAR.....	67
Estratigrafía.....	68
Estructura del Campo.....	70
Yacimientos del Campo.....	71
Diagramas mecánicos tipo.....	72
CAPÍTULO V.....	74
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	74

REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES OPERACIONALES.....	74
DISEÑOS DE LAS LECHADAS DE CEMENTACIÓN.....	75
CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO PETROLERO.....	80
Resultados del control de calidad del cemento clase H.....	81
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS.....	85
Evaluación de las propiedades físicas de la lechada antimigratoria con cemento clase H.....	85
Evaluación de las propiedades físicas de la lechada antimigratoria con cemento clase B.....	92
EVALUACIÓN DEL AGENTE ANTIMIGRATORIO.....	98
VENTAJAS DEL DISEÑO.....	100
Análisis económico de los diseños propuestos.....	100
Ventajas logísticas y operacionales.....	103
CONCLUSIONES.....	105
RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
BIBLIOGRAFÍA.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Cementación primaria.....	8
Figura 2. 2 Planta de cemento	13
Figura 2. 3 Camión de transporte de cemento a granel.....	13
Figura 2. 4 Modelos de unidades de bombeo.....	14
Figura 2. 5 Cabezal de cementación	15
Figura 2. 6 Zapata de flotación.	16
Figura 2. 7 Tapones.....	17
Figura 2. 8 Diafragma del tapón superior	17
Figura 2. 9 Tapones de cementación.....	18
Figura 2. 10 Centralizadores	19
Figura 2. 11 Causas básicas de migración del gas.	33
Figura 3. 1 Balanza electrónica.....	40
Figura 3. 2 Mezcladora.	41
Figura 3. 3 Balanza Presurizada.....	41
Figura 3. 4 Viscosímetro rotacional.....	42
Figura 3. 5 Consistómetro Atmosférico.....	43
Figura 3. 6 Filtro prensa estático de alta presión y alta temperatura.....	43
Figura 3. 7 Consistómetros presurizados.	44
Figura 3. 8 Partes de la copa de muestra y consistómetro	45
Figura 3. 9 Analizador de esfuerzo de gel estático	45
Figura 3. 10 Analizador de cemento ultrasónico.	46
Figura 3. 11 Equipo analizador de migración de fluidos FMA.....	46
Figura 3. 12 Proceso metodológico del trabajo especial de grado.....	47
Figura 3. 13 Solicitud de análisis de laboratorio (SAL)	49
Figura 3. 14 Procedimiento de mezcla de cemento con agua.	50
Figura 3. 15 Gráfica del flujo plástico de Bingham.	58

Figura 3. 16 Gráfico logarítmico del modelo de Ley de Potencia.	59
Figura 4. 1 Cuencas Petrolíferas de Venezuela.....	65
Figura 4. 2 Límites estructurales de la cuenca del Lago de Maracaibo	66
Figura 4. 3 Campos petroleros de la Cuenca del Lago de Maracaibo.....	66
Figura 4. 4 Campo Costanero de Bolívar.....	67
Figura 4. 5 Columna estratigráfica de la cuenca del Lago de Maracaibo	69
Figura 4. 6 Mapa de fallas del Campo Costanero de Bolívar	70
Figura 4. 7 Yacimientos del Mioceno-Costa del Distrito de Bolívar.....	71
Figura 4. 8 Diagrama Mecánico tipo para pozos en el Campo Tia Juana.....	72
Figura 4. 9 Diagrama Mecánico tipo para pozos del área en estudio	73
Figura 5. 1 Control de calidad del cemento petrolero H.....	81
Figura 5. 2 Tiempo de espesamiento, lechada con cemento clase H.	82
Figura 5. 3 Tiempo de espesamiento, lechada con cemento clase B.	83
Figura 5. 4 Control de calidad del cemento petrolero B	84
Figura 5. 5 Modelos reológicos, lechada antimigratoria cemento H.	87
Figura 5. 6 Tiempo de espesamiento, lechada cemento H.....	90
Figura 5. 7 Resistencia a la compresión, lechada antimigratoria H	91
Figura 5. 8 Esfuerzo de gel estático, lechada antimigratoria H.	92
Figura 5. 9 Modelos reológicos, lechada antimigratoria cemento B.....	94
Figura 5. 10 Tiempo de espesamiento, lechada antimigratoria cemento B.	96
Figura 5. 11 Resistencia a la compresión, lechada cemento B.	97
Figura 5. 12 Esfuerzo de gel estático, lechada cemento B.....	98
Figura 5. 13 Prueba de migración de fluidos por caída de presión.	99
Figura 5. 14 Transporte de aditivos en estado líquido.	103

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1 Composición mineralógica del cemento Portland clásico.	23
Tabla 2. 2 Clasificación de los cementos API.....	24
Tabla 3. 1 Requerimientos para la preparación de la lechada.....	50
Tabla 3. 2 Resumen de los requerimientos físicos para cementos B y H	51
Tabla 3. 3 Programa para la prueba del tiempo de espesamiento cemento clase B....	54
Tabla 3. 4 Programa para la prueba del tiempo de espesamiento cemento clase H....	54
Tabla 3. 5 Formulación convencional de una lechada antimigratoria	55
Tabla 3. 6 Formulación tipo de una lechada antimigratoria con cemento clase H	56
Tabla 3. 7 Formulación tipo de una lechada antimigratoria con cemento clase B.....	63
Tabla 5. 1 Requerimientos para el diseño de las lechadas de cementación	74
Tabla 5. 2 Condiciones operacionales para el diseño	75
Tabla 5. 3 Formulación definitiva de la lechada con cemento clase H.....	77
Tabla 5. 4 Tabla comparativa de las lechadas con cemento clase H.....	78
Tabla 5. 5 Tabla comparativa de las lechadas con cemento clase B.....	79
Tabla 5. 6 Formulación definitiva de la lechada con cemento clase B	80
Tabla 5. 7 Parámetros reológicos lechada antimigratoria con cemento clase H.....	86
Tabla 5. 8 Modelos reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase H. ...	87
Tabla 5. 9 Prueba de sedimentación en lechada con cemento clase H	89
Tabla 5. 10 Parámetros reológicos lechada antimigratoria con cemento clase B.	93
Tabla 5. 11 Modelos reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase B ..	93
Tabla 5. 12 Prueba de sedimentación en lechada con cemento clase B.....	95
Tabla 5. 13 Aditivos requeridos en el diseño de la lechada convencional.....	101
Tabla 5. 14 Aditivos requeridos en el diseño de la lechada con cemento clase H....	101
Tabla 5. 15 Aditivos requeridos en el diseño de la lechada con cemento clase B ...	102

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 3.1: Pérdida de fluido.....	44
Ecuación 3.2: Porcentaje de fluido libre.....	52
Ecuación 3.3: Modelo plástico de bingham.....	58
Ecuación 3.4: Modelo de ley de potencia.....	59
Ecuación 3.5: Recta logarítmica del modelo de ley de potencia.....	59
Ecuación 3.6: Densidad relativa.....	61
Ecuación 3.7: Porcentaje de sedimentación.....	61

INTRODUCCIÓN

La cementación de pozos es el proceso mediante el cual se coloca una lechada de cementación en el espacio anular de un pozo (espacio existente entre la tubería de revestimiento y el agujero abierto o la tubería de revestimiento anterior) con el fin de asegurar la integridad del hoyo, lo cual implica básicamente los siguientes aspectos: aislamiento zonal, protección de la tubería de revestimiento, y soporte del agujero.

El proceso de cementación incluye la preparación de la lechada, que se compone de cemento seco, agua, y aditivos químicos para controlar las propiedades del cemento.

Las compañías que proveen servicios de cementación de pozos petroleros y gasíferos poseen una gama de aditivos químicos sólidos y líquidos que son utilizados en el diseño de lechadas que satisfagan las necesidades y requerimientos del cliente. Básicamente la selección de aditivo a utilizar depende de la logística y del ambiente de trabajo. Por lo general, cuando existe una alta actividad repetitiva (trabajos de cementación para pozos con condiciones similares) u operaciones que requieren la preparación de grandes volúmenes de lechada, la utilización de aditivos sólido representa la mejor opción, debido a que constituyen sistemas más económicos. Por otro lado, el uso de aditivos líquidos es recomendado tanto para locaciones costa afuera, debido a la facilidad de almacenamiento en espacios reducidos, como para operaciones que requieran pequeños volúmenes de lechada como es el caso de tapones o cementaciones forzadas (*squeeze*).

Por ende es indispensable seleccionar de manera óptima los aditivos que serán utilizados en el diseño de la lechada de cementación, debido a que los mismos tendrán un impacto directo en los costos, en la logística, y en la eficiencia de la operación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hoy en día existe un aumento en las actividades de perforación de pozos someros en tierra en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, los cuales demandan por lo general, lechadas de cementación antimigratorias, que posean propiedades físicas muy similares (densidad, tiempo de espesamiento, pérdida de fluido, resistencia a la compresión).

Para el diseño de este tipo de lechadas, las empresas de servicios petroleros adicionan al agua una importante cantidad de aditivos químicos en estado líquido, generando así la llamada agua de mezcla. Sin embargo, para cubrir las necesidades operacionales (preparar grandes volúmenes de lechada) y satisfacer los requerimientos de control de calidad del cliente (correr en el laboratorio pruebas de tanque antes de llegar a la locación) se presenta una problemática que radica en la necesidad de preparar el agua de mezcla con suficiente anticipación a la fecha del trabajo de cementación, lo cual, puede originar situaciones indeseadas como ataque de bacterias, degradación, envejecimiento y contaminación del sistema durante su manipulación, transporte y posterior uso, originando en algunos casos que las empresas de servicios tengan que deshacerse de grandes volúmenes de agua de mezcla. Esto sin duda alguna genera pasivos ambientales, aumento de los costos asociados al trabajo de cementación y propicia el desarrollo de una operación poco eficiente.

Por ende, el presente estudio busca la manera de reducir el uso de aditivos químicos en estado líquido para las operaciones en tierra y minimizar la preparación de agua de mezcla, a través de la evaluación de un polímero sólido como agente controlador de migración de gas en lechadas de cementación compuestas por aditivos químicos en estado sólido mezclados con el cemento seco.

Como resultado de lo expuesto anteriormente surgen las siguientes interrogantes: ¿Es factible el uso de un polímero en estado sólido como agente controlador de migración de gas en lechadas de cementación? ¿Cuál será la concentración del polímero que impida de manera efectiva la migración de fluidos?

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar un polímero como agente controlador de migración de gas en lechadas de cemento.

Objetivos específicos

1. Recopilar información sobre las condiciones de pozo y demás requerimientos técnicos del área en estudio.
2. Diseñar una lechada de cementación térmica antimigratoria.
3. Evaluar las propiedades de control de calidad del cemento petrolero bajo la norma ISO10426-2.
4. Evaluar las propiedades físicas de la lechada de cementación siguiendo los procedimientos de la norma API 10B/ ISO10426-2.
5. Evaluar la resistencia a la compresión del sistema.
6. Evaluar la capacidad del polímero del impedir la migración de gas hacia la lechada de cemento.
7. Determinar las ventajas de usar un aditivo controlador de migración de gas sólido frente a los usados frecuentemente en el área de estudio.

JUSTIFICACIÓN

Bajo el escenario antes expuesto, compuesto por un incremento de actividades en locaciones terrestres, y la utilización de lechadas con propiedades y características similares, lo más recomendable es utilizar cemento mezclado con aditivos químicos sólidos (*blend*), lo cual genera una flexibilidad operacional al utilizar los excesos de

blend de un trabajo de cementación en otro pozo, sin generar problemas como los que presentan los sistemas líquidos.

Por ende, la importancia del presente estudio radica en la evaluación de la factibilidad del uso de un polímero en estado sólido cuyo función es controlar la migración de gas, con el fin de maximizar la cantidad de aditivos químicos sólidos en *blend* con el cemento seco, y de esta manera reducir el uso de aditivos químicos en estado líquido, los tiempos de preparación de agua de mezcla, el número de equipos y personal utilizados durante la cementación del pozo, optimizar costos, mejorar la logística operacional y reforzar la calidad del servicio prestado.

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio contempla la selección de 8 pozos someros de la costa oriental del Lago de Maracaibo como área de estudio, y partiendo de las condiciones y características de los mismos, se evaluará la factibilidad de usar un polímero como agente controlador de migración de gas en estado sólido en el diseño de una lechada de cementación térmica antimigratoria, mediante la realización de pruebas de laboratorio enmarcadas en las prácticas recomendadas por el *American Petroleum Institute*.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se exponen los conceptos y las bases teóricas que sustentan el desarrollo de este trabajo especial de grado. Las mismas se encuentran divididas en las siguientes secciones: Antecedentes, Cementación, Lechadas de Cementación y Migración de gas. La exposición de estos conceptos permite tener una visión más amplia del tema estudiado, facilitando la comprensión de esta investigación cuyo objetivo es evaluar un polímero como agente controlador de migración de gas en lechadas de cemento compuestas únicamente por aditivos químicos en estado sólido.

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Coci, F. (2011) *D400 EasyBLOK Batch Mixing Procedure from Argentina with OXY* Argentina: Schlumberger. Disponible: InTouch. [Documento privado].

Este estudio describe la realización de una prueba de campo diseñada para evaluar la mezcla de una nueva lechada de cementación cuya formulación contiene un polímero en estado sólido como agente antimigratorio, en el equipo disponible en locación, asegurándose de seguir los procedimientos de control de calidad para la aplicación de nuevas tecnologías a nivel local (Argentina). La prueba de campo fue realizada en el campo Cañadon Seco el primero de Julio de 2010.

La prueba permitió concluir que la lechada de cementación se puede mezclar con el equipo disponible sin problemas de segregación, floculación y sedimentación. Se observó que la lechada alcanzó la densidad prevista y alcanzó una resistencia a la compresión dentro de 48 horas de 4000 psi. Sin embargo el tiempo de transición es más largo que los diseños comunes.

Salazar, J. (2007). *EasyBLOK (D400) field test report from USL, Canada and Russia*. Clamart, Francia: Schlumberger. Disponible: InTouch. [Documento privado].

El controlador de migración de gas en polvo D400 es el nuevo y primer aditivo en estado sólido desarrollado por Schlumberger para hacer frente a mercados donde el riesgo de gravedad de una migración de gas se clasifica como mediano o alto y en donde otros aditivos líquidos *GASBLOK* enfrentan problemas técnicos en su aplicación (ambientes con temperaturas bajo cero) y a nivel logístico.

Este trabajo tuvo como objetivo diseñar y ejecutar trabajos de cementación utilizando este aditivo controlador de migración de gas, sin experimentar ningún tipo de problema técnico. Esto incluye todos los pasos desde la optimización, pruebas de laboratorio, mezcla a nivel de campo, bombeo de la lechada y evaluación final del trabajo.

Basado en el buen desempeño del aditivo en las pruebas de campo, donde se efectuaron trabajos por encima de la temperatura límite recomendada inicialmente por el grupo de expertos que desarrollaron la tecnología, se recomendó extender la ventana de aplicación del aditivo desde una temperatura de fondo circulante de 100°C a 110°C.

Al-Shwayat, S. (2007). *Introduction of EasyBLOK D400 to central Oklahoma*.

El Reno, Oklahoma: Schlumberger. Disponible: InTouch. [Documento privado].

La mayoría de los pozos en la región central de Oklahoma contienen al menos una zona con presencia de gas, las cuales pueden generar una potencial migración de gas durante las operaciones de cementación. En el pasado se ha utilizado el aditivo líquido EasyBLOK D600 para enfrentar los problemas de migración de gas, sin importar el grado de severidad de riesgo o la eficiencia de costo de la operación.

Por ende este trabajo tuvo como objetivo introducir el nuevo aditivo controlador de gas en estado sólido (EasyBLOK D400) como una solución para ambientes con severidad de migración de gas media.

El trabajo concluye que el D400 es una alternativa rentable para trabajos de cementación con riesgo mediano de migración de gas. Por ende recomienda que este

aditivo sea introducido en nuevos mercados, distritos y clientes, como una alternativa para complementar al D600 más no remplazarlo.

Ezeokonkwo, C. (2006). *Introduction of Solid Gas Migration Additive D400 to the Permian Basin*. Midland, Texas: Schlumberger. Disponible: InTouch. [Documento privado].

Este documento discute la introducción del D400 en la cuenca Permian y las diferentes pruebas de laboratorio realizadas hasta el momento. Este estudio también evalúa la compatibilidad de este aditivo con otros aditivos locales, y la respuesta del controlador D400 bajo diferentes niveles de severidad de migración de gas.

Concluye que la utilización de este aditivo, puede traer diferentes beneficios económicos desde el punto de vista logístico, al bajar el costo de transporte de aditivos líquidos, elimina problemas de congelamiento de aditivos líquidos y mejora la calidad de servicio prestado en la cuenca Permian.

CEMENTACIÓN

Bourgoyne (1991), expone que el cemento es usado en las operaciones de construcción de pozo para proteger y soportar la sarta de revestimiento, prevenir movimientos de fluidos a través del espacio anular (espacio comprendido entre la formación y la superficie externa del revestidor), detener el movimiento de fluidos dentro de las fracturas de la formación y cerrar o abandonar una porción del pozo. Una lechada de cementación originada por la mezcla en superficie de cemento seco, agua y aditivos químicos, es bombeada y desplazada hidráulicamente hasta la ubicación deseada en el espacio anular. Al reaccionar los componentes de la mezcla, la lechada de cementación cambia de fase líquida a sólida, presentando de esta manera características de resistencia necesarias para cumplir sus funciones.

Tipos de cementación

Cementación Primaria

Según Nelson y Guillot (2006), este proceso consiste en la colocación de la lechada de cemento en el espacio anular. Desde sus inicios en 1903, el principal objetivo de la cementación primaria ha sido el de proporcionar un aislamiento zonal en los pozos con el fin de excluir los fluidos indeseados de una zona, del fluido de interés que se pretende producir de otra zona del pozo. Para alcanzar este objetivo, un sello hidráulico debe ser creado entre la sarta de revestimiento y el cemento y entre el cemento y la formación. Al mismo tiempo se debe prevenir que se originen canales a través de la columna de cemento por donde el fluido pueda migrar (ver figura 2.1). Estos requerimientos convierten a la cementación primaria en una de las operaciones más importantes durante la construcción de un pozo, y en caso de ser deficiente, podría ocasionar que el pozo no alcance a su producción potencial, así como otros inconvenientes de carácter operacional, económico y ambiental.

La cementación primaria se divide según el procedimiento que se realice en: cementación primaria de una etapa y cementación primaria de múltiples etapas.

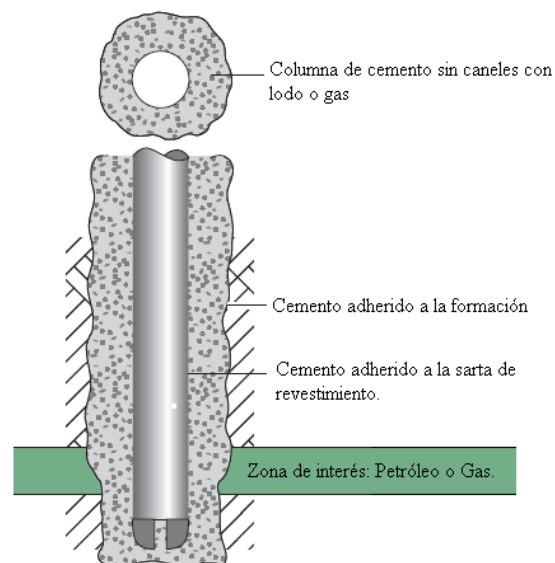


Figura 2. 1 Objetivos de la cementación primaria. [Nelson y Guillot, 2006]

Cementación primaria en una etapa

Son las operaciones de cementación más comunes, en las cuales se bombea y desplaza de manera continua la lechada de cementación hacia el espacio anular hasta alcanzar el nivel deseado. Estas cementaciones incluyen la cementación de la sarta de revestimiento conductora, del revestidor superficial, del revestidor intermedio y del revestidor de producción. Dichas sartas de revestimiento las conoceremos a fondo durante el presente capítulo.

Cementación primaria en múltiples etapas

Se utiliza para separar y aislar zonas. En primer lugar, la lechada de cementación se asienta alrededor de la sección inferior de una sarta de revestimiento con el cemento colocado hasta una profundidad determinada. A continuación, a través de los collares de etapa colocados en la sarta de revestimiento, se cementan de forma sucesiva las etapas superiores. Un collar de etapa es básicamente una junta de revestimiento con puertos que se abren y cierran o sellan mediante camisas de accionamiento a presión.

La cementación de etapas múltiples se utiliza con los siguientes fines:

- Reducir la presión hidrostática en las formaciones que no pueden soportar la presión hidrostática ejercida por una columna larga de cemento
- Aislar dos zonas con problemas en una misma sección del agujero del pozo, por ejemplo, una zona de alta presión y una zona con una presión de fractura baja.
- Ahorrar cemento en aquellos pozos en los que sólo es necesario cementar la parte inferior y una porción superior de la tubería de revestimiento.

Cementación secundaria

Cuando la cementación primaria no consigue alcanzar los objetivos deseados o cuando el cemento o la tubería de revestimiento presentan fallas debido al paso del tiempo, es necesario corregir el problema. Estos procesos de reparación reciben el nombre de cementaciones secundarias o remediales. También este tipo de

cementación es utilizada para alterar las características de una formación o abandonar una zona productiva o pozo.

La técnica de reparación más común es la cementación forzada, un procedimiento en el que se fuerza a la lechada a pasar a través de agujeros o rajaduras de la tubería de revestimiento, con el fin de reparar un trabajo de cementación primaria o un problema en un pozo.

Tipos de sarta de revestimiento

Una serie de sargas de revestimientos son necesarias para completar los pozos y producir de manera exitosa el fluido deseado. Por ende un factor importante de la cementación es conocer que etapa del pozo se va a cementar y que tipo de revestidor está involucrado en la operación. Nelson y Guillot (2006), explican que existen los siguientes tipos de revestidor:

Revestidor conductor

El conductor es usualmente la primera y más corta sarta de revestimiento. Su propósito es proteger a las formaciones poco profundas de la contaminación de fluidos de perforación, así como evitar los derrumbes que pueden producirse fácilmente cerca de la superficie donde hay capas superficiales o formaciones no consolidadas. Es diseñado para proveer soporte estructural a los revestidores subsecuentes y sargas de producción. También puede brindar soporte al cabezal del pozo y equipos impide reventones, cuando la firmeza del suelo no es la adecuada. La longitud común es de 100 pies, sin embargo su longitud puede variar entre un rango de 30 a 300 pies. Sus dimensiones más comunes son entre 30 y 20 pulgadas de diámetro.

Revestidor superficial

El segundo revestimiento también actúa como aislamiento para las formaciones no consolidadas o acuíferos presentes a poca profundidad y se denomina revestimiento de superficie. El diámetro externo de estas tuberías suele oscilar entre 9-5/8 pulgadas

y 20 pulgadas para profundidades de entre 100 y 5.000 pies. Es la primera sarta de revestimiento para fines de control de presión.

Revestidor intermedio

A veces, conforme va aumentando la profundidad de perforación, para mantener la integridad del pozo es necesario utilizar una tubería de revestimiento intermedia. Las tuberías de revestimiento intermedias se utilizan para separar el pozo en secciones de trabajo, aislar zonas de pérdida de circulación, secciones salinas, zonas de sobrepresión, secciones con lutitas y otras condiciones en el fondo o la superficie del pozo que puedan dificultar o hacer que sea peligroso continuar la perforación. El tamaño y la longitud de las tuberías de revestimiento intermedias varían mucho de un operador a otro y de un campo a otro, e incluso dentro de un mismo campo. Los tamaños más utilizados son: 13-3/8 pulgadas, 10-3/4 pulgadas y 9-5/8 pulgadas. La longitud puede oscilar entre 1.000 pies y 15.000 pies (305 m a 4.570 m).

Revestidor de producción

La colocación y cementación de la tubería de revestimiento de producción es uno de los pasos más importantes en la perforación de un pozo. La longitud y tamaño de la tubería de revestimiento de producción varía mucho, pero las más usuales son: 4-1/2 pulgadas, 5 pulgadas, 7 pulgadas y 9-5/8 pulgadas.

Las tuberías de revestimiento de producción pueden introducirse como una sarta completa desde el fondo del pozo (profundidad total) hasta la superficie o desde el fondo del pozo (profundidad total) hasta 100 o 200 pies dentro de la tubería de revestimiento anterior. Este último tipo de tubería recibe el nombre de *liner*.

Además de actuar como elemento de sustentación del agujero, esta tubería cumple otras misiones:

- Aislar la zona productiva de otras formaciones y de los fluidos presentes en ellas.

- Actuar como cubierta de protección de los equipos de terminación, tales como:
 - Equipo de bombeo artificial subterráneo
 - Equipo de terminación en zonas múltiples
 - Mallas de control de arena
- Recubrir tuberías de revestimiento intermedias dañadas o desgastadas.

Liner de producción

Los *liner* son tuberías de cementación que no llegan hasta la superficie sino que son colgadas del interior de la tubería anterior. La superposición depende del objetivo del *liner* y puede oscilar entre 50 y 500 pies. El uso de *liner* (como tuberías de revestimiento de producción) permite utilizar menos tubería de revestimiento y, por tanto, reducir el costo del pozo. El *liner* de producción va desde la última tubería de revestimiento hasta el fondo del pozo (profundidad total) y sustituye a la tubería de revestimiento de producción. Este *liner* está en contacto directo con los tramos de producción, de modo que la cementación en este punto es crítica.

Equipos de cementación

Los trabajos de cementación suelen realizarse con los siguientes equipos:

Equipo de material a granel

En los trabajos de cementación, se necesitan los siguientes equipos de material a granel para almacenar el cemento seco, aditivos químicos sólidos o *blend* (mezcla de cemento seco y aditivos sólidos) y transferirlos al sistema de mezclado de cemento.

- Silos a presión o silos de gravedad (ver Figura 2.2): los distintos cementos y mezclas deben almacenarse en silos separados.



Figura 2. 2 Planta de cemento, silos a presión y silos de gravedad. [Sardi, 2015]

- *Bulk* o Camión de transporte de cemento a granel (ver Figura2.3): se utilizan para transportar el cemento seco, aditivos sólidos y *blend* hasta el pozo. También pueden utilizarse durante la cementación para transferir directamente el cemento al sistema de mezclado.



Figura 2. 3 Camión de transporte de cemento a granel. [Sardi, 2015]

- Compresor de aire: suministra el aire para presurizar los silos y llevar a cabo la transferencia de cemento.
- Mangueras de caucho de 4 pulgadas: sirven para transferir el material desde el silo hasta el equipo de mezclado de cemento.

Unidad de bombeo

La unidad de bombeo de cemento (Figura 2.4) desempeña las siguientes funciones:

- suministra alta potencia y presión de bombeo.
- mide los fluidos de mezcla.
- proporciona y controla el sistema de mezclado de cemento.
- controla el caudal y la presión de bombeo.



Figura 2. 4 Modelos de unidades de bombeo. [Nelson y Guillot, 2006]

Línea de tratamiento

La línea de tratamiento es un conjunto de tuberías, válvulas y uniones giratorias que se utiliza para llevar la lechada de cementación y otros fluidos bombeados desde la unidad de cementación al pozo.

Mezclador por baches o recirculador

La mezcla por baches es un sistema simple para la mezcla de lechadas de cemento. Existen varios tipos de mezcladores por baches, con una capacidad que oscila entre 15 y 150 barriles. Normalmente, estos mezcladores están equipados con paletas, bombas centrífugas de circulación, y líneas para que la lechada circule y se mezcle en los tanques por baches durante el proceso de mezcla.

Sistema de aditivos líquidos

Los sistemas de aditivos líquidos sirven para almacenar y medir los aditivos líquidos durante las operaciones de cementación. Inicialmente, estos sistemas se diseñaron para utilizarse en espacios confinados en equipos de perforación costafuera; sin embargo, por su eficiencia y economía, ahora son un elemento imprescindible para cualquier trabajo de cementación en el que se utilicen aditivos líquidos.

Cabezales de cementación

El cabezal de cementación (ver Figura 2.5) aloja un conjunto de válvulas y líneas que permiten conducir la lechada desde la unidad de bombeo hasta el interior del pozo. Los cabezales convencionales varían de dimensiones entre 2-7/8 hasta 20 pulgadas de diámetro y pueden manejar un rango de presiones entre 1500 lpc y 10.000 lpc.



Figura 2. 5 Cabezal de cementación 9-5/8 y 10.000 lpc. [Sardi, 2015]

Equipos auxiliares para cementación

En los trabajos de cementación se utilizan distintos tipos de aditamentos y accesorios para tuberías de revestimiento, entre los que se pueden incluir: zapatas guía, collares de flotación, tapones, collares de múltiples etapas, centralizadores, entre otros.

Zapata de flotación o guía

Instaladas en la parte inferior de la sarta de revestimiento para proteger a la misma de golpes contra la formación cuando está descendiendo a través del hoyo (ver Figura 2.6). A su vez previene atascamientos y guía a la sarta de revestimiento dentro del pozo. Pueden poseer una válvula *check* que impide el flujo en reversa, es decir, impide el flujo de un fluido desde el espacio anular, hacia el interior de la sarta.



Figura 2. 6 Zapata de flotación. [Sardi, 2015]

Cuello flotador

Barberii (2001) dice que para reforzar la función de la zapata y coadyuvar en la mecánica de la cementación, se dispone que a cierta distancia del primer tubo (por lo general 80 ft) se coloque entre dos tubos una unión o cuello flotador. La unión permite el flujo por la tubería hacia el hoyo pero impide, por el mecanismo de su válvula de un solo paso, que fluidos del hoyo entren a la tubería. La unión también provee un lugar de asentamiento para los tapones de cementación (ver Figura 2.7).

El tapón superior, al llegar al cuello flotador, no puede pasar y el aumento de presión en la sarta indica que ya todo el cemento pasó por el cuello y ha concluido el desplazamiento.

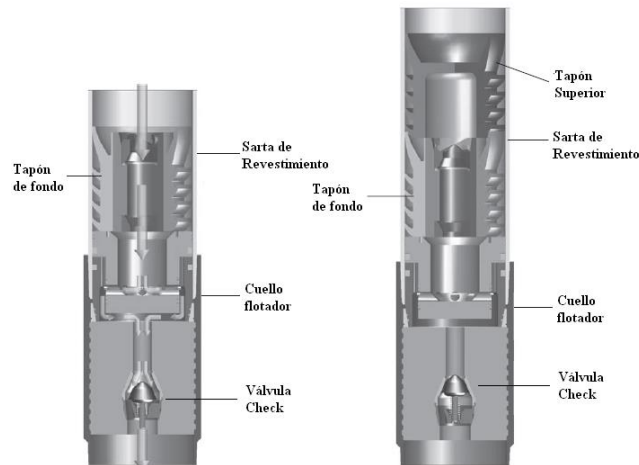


Figura 2. 7 Tapones asentados sobre el collar de flotación. [Nelson y Guillot, 2006]

Tapones de cementación

Estos elementos sirven para separar la lechada de los fluidos de perforación, limpiar las paredes interiores de la tubería de revestimiento y obtener una indicación positiva (presión) de que el cemento ya está en posición fuera de la sarta de revestimiento.

Hay dos tapones. El primero, el tapón inferior, es hueco y tiene una membrana o diafragma de caucho en la parte superior. Esta membrana se rompe cuando el tapón llega a la parte superior del collar de flotación, y se aplica presión diferencial (ver Figura 2.8).



Figura 2. 8 Diafragma del tapón superior. [Sardi, 2015]

El segundo tapón limpiador de cementación se denomina tapón superior y es sólido. Se bombea al final de los trabajos de cementación con el fin de separar la lechada del fluido de desplazamiento, y evitar así que sea contaminada por dicho fluido. También

proporciona indicación en superficie de la finalización del desplazamiento. Por lo general el tapón superior o duro es de color negro, mientras que el tapón inferior o blando es de color rojo (ver Figura 2.9).



Figura 2. 9 Tapones de cementación. [Sardi, 2015]

Collares de múltiples etapas

Barberii (2001) explica que cuando se trata de sargas muy largas la cementación se hace en dos o tres etapas. En cuyo caso, para cada etapa, se dispone en la sarga una unión que por diseño y construcción cumple funciones adicionales, además de la función de la unión o cuello corriente.

Esta unión, además de su válvula, tiene orificios que, en el momento apropiado, por el bombeo y la inserción de un dispositivo adecuado, permiten la salida del cemento al espacio anular. Para retener el cemento en el punto de salida y para que fluya hacia arriba por el espacio anular, la unión lleva como parte integral, o bien como complemento aparte asido a la sarga, a muy corta distancia de la base de la unión, un cesto de cementación, que al abrirse toma la forma de paraguas invertido. Al abrirse hace contacto con la pared del hoyo y su forma cónica le da configuración de cesto.

Centralizadores

Para que la sarga quede bien centrada en el hoyo, y a objeto de evitar que se recueste contra la pared del mismo, ocasionando luego defectos en la continuidad del cemento en el espacio anular, se le instalan a la sarga centralizadores (ver Figura 2.10) en

aquellos puntos que se consideren necesarios. Los centralizadores, por sus anillos que rodean el tubo y fijados con puntos de soldadura, quedan a las profundidades deseadas. Los flejes que unen los anillos tienen una curvatura hacia afuera para hacer contacto con la pared del hoyo.



Figura 2. 10 Colección de centralizadores de sarta de revestimiento. [Nelson y Guillot, 2006]

Diseño de la cementación

El ingeniero de cementación debe considerar una gran cantidad de datos proveniente de una variedad de fuentes y optimizar los parámetros de la operación de cementación de acuerdo con las condiciones del pozo. Cada operación de cementación tiene una serie de objetivos específicos que combinan aspectos técnicos con la economía del proyecto y las normativas locales. Para que una operación de cementación logre alcanzar exitosamente sus objetivos, el ingeniero debe diseñarla considerando según Nelson y Guillot (2006) 3 tipos de información o datos básicos:

1. Datos de profundidad y geometría del hoyo.
2. Condiciones del pozo.
3. Régimen de temperatura.

Datos de profundidad y geometría del hoyo

Profundidad vertical (TVD), profundidad medida (MD), azimut y ángulos de desviación, tamaño y peso de la sarta de revestimiento, el tamaño del hoyo abierto y tipo de sarta de revestimiento, son algunos de los datos que debe considerar un ingeniero al momento de diseñar la cementación.

Los datos de profundidad son particularmente importantes porque influyen fuertemente sobre la temperatura, el volumen de líquido, y las presiones hidrostáticas y dinámicas.

Pozos de alto ángulo son particularmente difíciles y requieren un estricto control de los desplazamientos de lodo y la estabilidad de la lechada. Si no se conoce la trayectoria exacta del pozo, la sarta de revestimiento relativamente flexible no será adecuadamente centralizada y puede recostarse en la pared del pozo en diversos lugares.

En principio, el tamaño del hoyo va a ser determinado por el tamaño de mecha que se utilice para perforar esa sección. Sin embargo, diversos factores operacionales y geológicos pueden producir un cambio en el tamaño del hoyo afectando de esta manera el volumen de lechada de cementación requerido. También puede afectar drásticamente la mecánica de desplazamiento. Para medir de manera confiable el tamaño del hoyo, antes de correr la sarta de revestimiento dentro del hoyo, se corren con guaya fina un *Caliper*. En general los *Calipers* registran un mayor número de mediciones independientes proporcionando una mejor estimación del tamaño del hoyo y el volumen.

Condiciones del pozo

Los problemas específicos en un intervalo del hoyo abierto que será revestido requieren una evaluación cuidadosa. La presencia de zonas productivas, formaciones altamente presurizadas, gradientes de fractura bajo e intervalo con gas presentan

desafíos particulares. Diseñar el trabajo cuidadosamente es necesario para superar estos problemas relacionados con los pozos.

Es importante conocer el régimen de presión a lo largo de toda la sección del hoyo abierto. Las presiones de poro son importantes para los efectos de control del pozo, y dicha información puede obtenerse a partir de registros.

En el otro extremo, el riesgo de fractura de la formación debe ser cuidadosamente evaluado, y un el gradiente promedio de la presión de fractura se proporciona normalmente para cada intervalo de hoyo abierto. Estos valores se basan normalmente los resultados de la prueba de integridad de presión o *leakoff testing*, que se realiza durante en la perforación de la zapata de la sarta de revestimiento anterior, o una prueba de integridad de la formación a cualquier profundidad particular de interés.

Las zonas productivas ameritan una atención especial. Es importante, por ejemplo, evitar un daño excesivo de la formación que puede ser causado por el filtrado de la lechada de cementación. Adicionalmente la zona de producción debe ser aislada de manera eficiente de otros intervalos no productores o acuíferos, con el fin de asegurar a largo plazo la mayor productividad del pozo.

Si existen formaciones con presencia de gas, lechadas especiales de cemento deben ser diseñadas para impedir que el gas migre de la formación hacia el espacio anular atravesando la lechada. Esto puede originar distintos problemas operacionales que conoceremos a fondo más adelante.

Régimen de temperatura

Según Hernández (2012) la temperatura afecta el tiempo de bombeabilidad y la resistencia a la compresión de las lechadas de cemento. La temperatura tiene una gran influencia y a medida que aumenta, la lechada se deshidrata y el fraguado se produce más rápidamente. Esto ocasiona que el tiempo de bombeabilidad disminuya. La temperatura de fondo circulante (*bottomhole circulating temperatura BHCT*) y la

temperatura de fondo estática (*bottomhole static temperatura BHST*) deben ser consideradas junto con el diferencial de temperatura entre el fondo y el tope de la columna de cemento.

La primera es la temperatura teórica que alcanza la lechada de cementación durante su bombeo y desplazamiento hasta el espacio anular, es decir la temperatura a la cuál es expuesta la lechada de cementación durante su colocación en el pozo. La temperatura circulante de pozo se determina normalmente de una lista o correlación establecida por el API. Sin embargo, algunos operadores prefieren trabajar con temperatura medidas en los pozos durante la circulación. Hernández (2012).

La segunda tiene gran importancia, debido a que la lechada de cementación estará expuesta a esta temperatura una vez que la misma haya sido colocada en el nivel del espacio anular deseado. Por ende tendrá una influencia importante sobre el desarrollo de gel y resistencia a la compresión de la lechada de cementación. 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.

Por último 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 desarrollar poca resistencia cuando se encuentre a una profundidad más llana en el pozo.

Todos estos parámetros o datos deben ser tomados en cuenta para realizar el diseño y selección de una lechada de manera eficiente.

LECHADA DE CEMENTO

El proceso de cementación incluye la preparación de la lechada, que se compone de cemento seco, agua, y aditivos químicos para controlar las propiedades del cemento.

Cemento Portland

El cemento Portland es el material más común usado para la cementación de pozos petroleros. Para Márquez (2002), el cemento Portland está compuesto básicamente de silicato tricálcico (Ca_3SiO_5), silicato dicálcico (Ca_2SiO_4), aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), aluminoferrita tetracálcica ($\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Estos compuestos denominados “Clinker” (excepto el yeso) se forman en un horno por una serie de reacciones a una temperatura de 1500°C aproximadamente.

Por lo general existen dos tipos de materias primas del cemento Portland. La primera es material calcáreo proveniente de calizas sedimentarias o metamórficas, corales, y depósitos de conchas (*Shell*). La segunda es material arcilloso que contenga alúmina, sílice y óxido de hierro, que pueden ser encontrados en arcillas, esquistos o lutitas, pizarras, cenizas volcánicas y sedimentos aluviales. (Nelson y Guillot 2006)

Las propiedades del cemento Portland van a ser determinadas por la composición mineralógica del Clinker. La composición mineralógica de un cemento Portland común se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1 Composición mineralógica de un cemento Portland clásico. [Nelson y Guillot, 2006]

Fase Componente	Designación	Nombre Común	Concentración (%)
$3\text{CaO} * \text{SiO}_2$	C ₃ S	Alita	55 – 65
$2\text{CaO} * \text{SiO}_2$	C ₂ S	Belita	12 – 25
$3\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A	Aluminato	8 – 14
$4\text{CaO} * \text{Al}_2\text{O}_3 * \text{Fe}_2\text{O}_2$	C ₄ AF	Ferro Aluminato	8 – 12

Clasificación del cemento Portland

Hernández (2012) resalta que existen varias clases de cementos, que son clasificados desde la letra A hasta la H según el Instituto Americano del Petróleo (ver tabla 2.2). Por la flexibilidad operacional que brindan los cementos G y H, son los más utilizados en la industria petrolera. Con la ayuda de aditivos químicos se pueden

diseñar lechadas con estos tipos de cemento para cubrir un amplio rango de temperaturas y profundidades.

Tabla 2. 2 Clasificación de los cementos API. [Hernández, 2012]

Clase de cemento	Requerimiento de agua	Densidad de la lechada	Profundidad del pozo	Temperatura estática
API	[gal/sx]	[lpq]	[pies]	[°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 – 320
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

Retrogresión del cemento

A temperaturas mayores a 230°F el gel de silicato de calcio conocido por sus iniciales en inglés como CSH (*calcium silicate hydrate*) sufre una metamorfosis (cambia a una fase llamada alfa-silicato dicálcico hidratado α -C2SH) cuyos resultados son usualmente la disminución en la resistencia a la compresión del cemento y un aumento en la permeabilidad del sistema. Este fenómeno es conocido como retrogresión.

Para realizar el diseño de una lechada térmica, es decir, un sistema de cementación que durante la vida útil del pozo se encontrará expuesto a temperaturas por encima de los 230°F, es necesario agregar a la formulación una porción de sílice o silica de entre 35% y 40 % del peso del cemento para evitar que el cemento sufra un proceso de retrogresión.

Aditivos químicos

Las compañías que proveen servicios de cementación de pozos petroleros y gasíferos poseen una gama de aditivos químicos sólidos y líquidos que son utilizados en el diseño de lechadas que satisfagan las necesidades y requerimientos del cliente. Dichos aditivos modifican el comportamiento y propiedades de la lechada de cementación, permitiendo su exitosa ubicación en el espacio anular, el desarrollo de resistencia a la compresión y un aislamiento zonal eficiente durante la vida productiva del pozo.

En los trabajos de cementación los aditivos sólidos pueden ser transportados a la locación, almacenados individualmente (sacos) o mezclados con el cemento a granel (*blend*). En la formulación de la lechada, los aditivos en estado sólidos son expresados en porcentaje del peso del cemento (% BWOC por las siglas en inglés de *By Weight of Cement*).

Por su parte, los aditivos químicos en estado líquidos son adicionados al agua, originando el agua de mezcla, que posteriormente será mezclada con el cemento seco. En la formulación de la lechada, los aditivos en estado sólidos son expresados en galones por saco de cemento (gal/sks).

Según Nelson y Guillot (2006), existen ocho principales categorías de aditivos generalmente reconocidas:

Aceleradores

Son empleados para reducir el tiempo de espesamiento de la lechada de cementación y acelerar el proceso de endurecimiento del cemento. Las sales inorgánicas son por lo general aditivos químicos que producen este efecto, siendo los cloruros los más conocidos y eficientes. El acelerador más común es el cloruro de calcio en estado sólido. El cloruro de sodio (NaCl) es raramente usado como acelerador debido a su baja eficiencia.

Retardadores

Como su nombre lo indica, retarda el proceso de hidratación del cemento, lo cual ocasiona que el mismo desarrolle una resistencia a la compresión de manera más lenta y aumenta el tiempo de espesamiento de la lechada de cementación. Son utilizados para proveer una flexibilidad operacional en pozos de altas temperaturas y profundidades. Por ende, son usados en la cementación de la zona productora o la sección intermedia.

Los aditivos retardares incluyen a los lignosulfonatos, los derivados de la celulosa y mezclas orgánicas.

Extendedores

La manera más rápida de reducir la densidad de una lechada es agregando agua a la mezcla. También es la manera más económica. Sin embargo, el problema radica en que esta agua extra que se agrega, tiende a separarse de la lechada posteriormente, convirtiéndose en una porción de agua libre. Esto genera problemas de canalización en la columna de cemento, lo cual puede comprometer que el trabajo de cementación alcance satisfactoriamente sus objetivos. Por ende, para reducir la densidad y aumentar el rendimiento de la lechada (reducir la cantidad de cemento por unidad de volumen de producto) se utilizan aditivos químicos conocidos como extendedores.

Las arcillas minerales como la bentonita son los extendedores más populares. También son usados micro esferas llenas de aire, material silicio o aluminoso conocido como pozzolan y silicatos de sodio sólidos (Na_2SiO_3) o en estado líquido $\text{Na}_2\text{O} \cdot (3-5)\text{SiO}_2$ como extendedores. Sin embargo este último, debido a su tendencia a acelerar, puede reducir la eficacia de otros aditivos como los retardadores o agentes controladores de pérdida de fluido.

Agentes densificantes

Cuando se requiere diseñar lechadas con densidades altas para solventar problemas de control de pozos u otras condiciones operacionales, es necesario utilizar aditivos con

una gravedad específica mayor a la del cemento, baja absorción de agua y una distribución del tamaño de partícula compatible.

Entre los principales agentes densificantes se encuentran: la barita, la ilmenita, la hematita y el carbonato de calcio.

Dispersantes

Estos aditivos químicos reducen la viscosidad y el rendimiento de la lechada. Mejora la su capacidad de mezcla y reduce los valores de los parámetros reológicos. Son moléculas de polímeros cargadas negativamente, las cuales son atraídas por las cargas positivas ubicadas en la superficie de los granos de cemento hidratados. La carga positiva original de la lechada se va disipando y la carga negativa empieza a incrementar a medida que se agrega dispersante. El resultado es una posterior repulsión entre las partículas de cemento, generando la dispersión del sistema.

Entre los principales dispersantes se encuentran los lignosulfonatos, el polinaftaleno sulfonato y los ácidos hidroxicarboxílicos.

Agentes de control de pérdida de fluido

Son aquellos que controlan el escape prematuro de la fase acuosa de la lechada de cementación hacia la formación. Al utilizar este aditivo se previene la deshidratación, el aumento de la densidad y el fraguado prematuro del sistema.

La bentonita puede originar un revoque poco permeable que impida el paso de la fase acuosa de la lechada hacia la formación. También se utiliza microsílica, asfáltenos, resinas termoplásticas y polímeros solubles en agua (derivados de la celulosa) como agentes controladores de filtrado.

Agentes que controlan la pérdida de circulación

Algunos de los problemas de pérdida de circulación en los pozos pueden ser solventados por la adición de materiales que se unen físicamente sobre fracturas y bloquean las zonas débiles. Tales materiales aumentan la resistencia de la zona a fracturarse bajo el efecto de la presión. Como regla general, son químicamente inertes con respecto a la hidratación del cemento Portland.

Entre los principales agentes que controlan la pérdida de circulación se encuentran: materiales fibrosos fragmentados, perlas expandidas, celofán y materiales granulados. Márquez (2002).

Aditivos especiales

Existe una variedad de aditivos que son agregados a la lechada de cementación, pero no pertenecen a una categoría general. Entre ellos podemos destacar los siguientes:

Antiespumantes

Permiten reducir el entrapamiento de aire durante la preparación o mezcla de la lechada. Los agentes antiespumantes producen un cambio en la tensión superficial, alteran la capacidad de dispersión de los sólidos, o producen ambos efectos al mismo tiempo. Existen dos clases: el poliglycol éter y los silicones.

Inhibidores de retrogresión

En los trabajos de cementación que se encontrarán expuestos a temperaturas mayores a los 230°F durante la vida productiva del pozo, es necesario agregar este tipo de aditivos que previenen la retrogresión del cemento, evitando que el mismo pierda propiedades mecánicas como su resistencia a la compresión o que el sistema desarrolle una alta permeabilidad. Por ende en las lechadas de cementación térmica, es una regla utilizar sílica entre un 35% y 40 % del peso del cemento.

Agentes controladores de migración de gas

Estos aditivos crean una película impermeable en presencia de gas, previniendo su migración a través del cemento durante el período crítico de deshidratación, es decir, durante la etapa en que la lechada de cemento cambia de estado líquido a sólido. Los agentes forman un revoque delgado, elástico e impermeable que también ofrece excelente control de pérdida de filtrado y reduce la permeabilidad del sistema.

Los aditivos antimigratorios más comunes son los látex. Los polímeros generalmente usados en el látex para el cemento Portland son: resinas estireno-butadieno (SBR), acrílicos, estireno-acrílicos, polivinil acetato (PVA) y copolímeros de vinil acetato. Máquez (2002).

Propiedades de una lechada de cemento

Los cementos Portland están diseñados para utilizarse en la cementación de pozos, en muy diversas condiciones: distintas temperaturas y presiones, formaciones y fluidos con distintas propiedades.

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 emplearse. Los procedimientos de prueba en laboratorio se rigen por las normas incluidas en API 10B / ISO 10426-1: Procedimiento Recomendado para la Prueba de Cementos para Pozos (Recommended Practice for Testing Well Cements).

Densidad

La densidad es el peso por unidad de volumen y suele expresarse en lbm/galUS o kg/m³.

La densidad de la lechada de cemento debe ser tal que permita mantener el control sobre el pozo. Las lechadas utilizadas en la cementación de pozos de petróleo y gas tienen una densidad entre 11,5 lbm/galUS y 19,0 lbm/galUS [1.380 kg/m³ y 2.280 kg/m³].

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 m³/kg o pies³/saco.

Tiempo de espesamiento

Es el tiempo que una lechada está en estado líquido en las condiciones de presión y temperatura simuladas del pozo. Para conocer dicho tiempo se mide la consistencia de la lechada, la cual se expresa 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, 70 Bc se considera el valor máximo de consistencia bombeable.

Requerimiento de agua

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.

Requerimiento de fluido de mezcla

El fluido de mezcla es la cantidad total de aditivos líquidos más el agua, expresada en galones por saco de cemento seco.

Reología

Según Hernández (2012) una definición 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. La reología define las propiedades de flujo de la lechada. 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: la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

Viscosidad Plástica

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Su valor se puede determinar al conocer el valor de la pendiente de la línea en la gráfica de esfuerzo de corte Vs velocidad de corte.

La viscosidad se suele expresar en centipoise [cP]. Es la unidad más usada debido a que el agua posee una viscosidad de 1,0020 cP a 20 °C.

Punto de cedencia

Expresado en libras fuerza por cada cien pies al cuadrado (lbf/100 pies²), es el esfuerzo mínimo de corte que debe aplicarse a un fluido para que comience a desplazarse. Por ende esta propiedad determina la resistencia del fluido a fluir.

Resistencia a la compresión

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 esfuerzos generados por las operaciones de perforación y cañoneo, y resistir una presión hidráulica alta sin fracturarse. Esta propiedad se expresa en libras por pulgada cuadrada (lpc).

Pérdida de fluido

Cantidad de fluido que pierde una lechada de cemento al ser forzada contra una pantalla de 325 mesh (simula la cara de la formación) bajo un diferencial de 1000 lpc.

Fluido libre

Es la cantidad de agua que puede separarse de la lechada de cementación. Si existe una cantidad muy alta de agua libre, el desempeño de la lechada puede verse afectado. Esta tendencia se mide en mL/250 mL.

Migración de Gas

La entrada de fluidos en el anular durante la perforación, cementación y después de la cementación, ha sido reconocido desde hace un tiempo como uno de los problemas más importantes durante las operaciones de construcción de un pozo. La entrada de gas de formación en el espacio anular del hoyo perforado, debido a la presión bajo balance que genera el fluido de soporte en la cara de la formación, puede resultar en una migración de gas a través del fluido que se encuentre en el espacio anular. El gas puede fluir hacia zonas de presiones más bajas o posiblemente hasta superficie.

La migración de gas es un problema complejo que involucra parámetros como: control de densidad del fluido, desplazamiento del fluido de perforación, propiedades de las lechadas de cemento, hidratación del cemento y la interacción entre la formación el cemento y el *casing*.

Cuando la presión ejercida sobre la formación cae por debajo de la presión de poro, ocurre el flujo de gas en dos etapas:

1. La invasión del gas de formación al hoyo del pozo.
2. La migración del gas dentro del hoyo hacia una zona de presión más baja.

Causas básicas de la migración de gas

Tres diferentes causas pueden incidir en la ocurrencia de una migración de gas:

1. La presión en el anular cae a un valor que es menor o igual a la presión de poro de la formación portadora de gas.
2. Espacio disponible para que el gas entre en la columna del espacio anular.
3. La existencia de una ruta de acceso en el espacio anular a través de la cual pueda migrar el gas.

Las tres causas básicas de migración de gas (ver Figura 2.11) deben ocurrir para que la misma tenga lugar. Varios factores inherentes al proceso de cementación pueden

ser responsables por la presencia de algunas de estas causas. Determinar exactamente cuál de los factores es el responsable, depende de cuando se produce la migración del gas con relación a la operación de cementación.

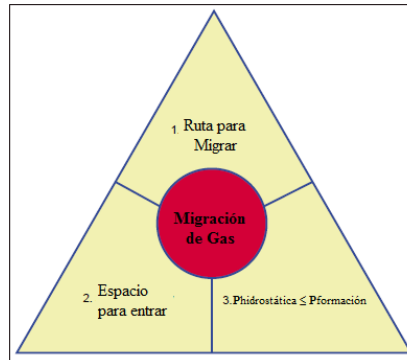


Figura 2. 11 Las tres causas básicas de migración del gas. [Sardi, 2015]

Caracterización de la migración del gas

La dificultad de entender y modelar el fenómeno de migración de gas surge del hecho de que el material a través del cual el gas va a canalizar, es decir la columna de cemento en el espacio anular, evoluciona con el tiempo. El estado físico del cemento progresa desde la colocación en el espacio anular en forma de lechada, pasando por el desarrollo de un sólido débil con moderada permeabilidad, hasta alcanzar un sólido de muy baja permeabilidad posterior al fraguado. Por ende, es conveniente cuando se estudia el proceso físico de migración del gas categorizarlo en base al momento en que se produce en relación con la operación de cementación.

Tres principales categorías pueden ser definidas:

1. Migración de gas inmediata (Durante la colocación): ocurre entre el comienzo de la operación de cementación y el final de la colocación de la lechada en el espacio anular.
2. Migración de gas a corto plazo: Ocurre después del que cemento se encuentra en el espacio anular, durante la primera etapa del fraguado del cemento.

3. Migración de gas a largo plazo: puede ocurrir después de unos pocos días de haber terminado el trabajo de cementación, pero es más probable que se manifieste semanas, meses o incluso años después del proceso de cementación.

Factores que afectan la migración de gas

Hay diferentes factores que inciden de manera directa en la evolución del fraguado del cemento:

La permeabilidad de la formación

La cual describe principalmente la capacidad de la formación de liberar gas.

El factor de remoción de lodo

Representa la capacidad del sistema para evitar un camino que permita la migración del gas a través del lodo dejado en la pared del hoyo.

Las propiedades de la lechada

Las cuales controlaron su comportamiento químico, físico, reológico y su capacidad de ejercer presión hidrostática.

Las siguientes propiedades de la lechada son relevantes en la migración de gas a corto plazo:

- **Densidad:** tiene impacto directo sobre el control de pozo (Controla la presión hidrostática).
- **Pérdida de Fluido:** la pérdida de fluido de la lechada de cementación en la formación afecta directamente todas las causas básicas de una migración de gas, y por lo tanto debe ser considerada como uno de los principales factores que contribuyen a la ocurrencia de este fenómeno.

Primero puede ser responsable por la disminución de la presión en el anular debido a:

- Incremento en los geles de la lechada, efecto causado por la reducción de contenido de agua en la misma.
- Disminución de la longitud de la columna hidrostática causada por la compactación debido a la disminución del volumen de la lechada.

También puede ser responsable por el control de la permeabilidad del revoque que en última instancia influye en la ruta de migración del gas. Por otro lado los aditivos de controlador de filtrado pueden indirectamente disminuir la permeabilidad de la lechada de cementación, Mientras más baja sea la pérdida de fluido, mejor va a responder la lechada ante una migración de gas a corto plazo.

- **Fluido Libre:** en hoyos desviados, el fluido libre puede unirse formando un canal continuo en la parte superior del hoyo, resultando en la creación de una ruta a través de la cual el gas puede migrar. En pozos tanto verticales como desviados, el fluido libre puede formar canales a lo largo del eje del hoyo y por consiguiente puede originar un pobre aislamiento hidráulico. Es por esto, que se requiere el diseño de una lechada que esencialmente no posea fluido libre.
- **Esfuerzo de Gel Estático Crítico:** el esfuerzo de gel estático crítico que resulta del decaimiento de la presión hidrostática hasta el punto donde las presiones están balanceadas (la presión de poro igual a la hidrostática) frente a la formación que tiene el potencial de aporte de fluidos indeseados.
- **Periodo de transición crítico:** es un período intermedio, durante el cual el cemento no se comporta ni como fluido ni como sólido. La lechada pierde su capacidad de transmitir presión hidrostática.
- **Encogimiento:** contribuye a la migración del gas causada por la reducción de la presión anular y provee un espacio que permite que el gas pueda entrar al hoyo. Esto ocurre sobre todo después de que el cemento desarrolla suficiente resistencia para detener la migración de gas.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo pretende describir cuales fueron los métodos, técnicas y procedimientos que se aplicaron durante la realización de este estudio, con la finalidad de tener una visión clara de lo que se hizo, por qué y cómo se hizo. Se presentan los aspectos relacionados con la metodología usada, es decir, las razones por las cuales se seleccionó dicha metodología, su adecuación al problema en estudio y sus limitaciones.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación que se planteó durante el desarrollo del presente trabajo fue de tipo experimental. Murillo (2011) explica que en la investigación de enfoque experimental el investigador manipula una o más variables de estudio, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas. Dicho de otra forma, un experimento consiste en hacer un cambio en el valor de una variable (variable independiente) y observar su efecto en otra variable (variable dependiente). Esto se lleva a cabo en condiciones rigurosamente controladas, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Al definir el diseño, se estableció cual va a ser la estrategia o secuencia de decisiones acerca de cómo recoger, ordenar y analizar los datos, es decir, la parte procedimental de cómo realizar la investigación. Nuestra investigación experimental está constituida por los siguientes pasos:

1. **Planteamiento de un problema de conocimiento:** la elección del problema depende los intereses del investigador: comprobar teorías, descubrir o generar conocimiento o mejorar la práctica operacional. Dicho problema está

relacionado con la variable dependiente. Las preguntas planteadas deben poder resolverse con la aplicación de un proceso experimental. El enfoque metodológico vendrá determinado por la naturaleza del problema. Es fundamental revisar la bibliografía sobre el problema que se ha formulado.

2. **Formulación de hipótesis:** la hipótesis es una respuesta conjetural al problema, dicho de otro modo, es la anticipación de un resultado posible de la investigación experimental. La hipótesis relaciona dos o más variables, éstas deben ser planteadas en términos empíricos, es decir, que se puedan observar o medir.
3. **Realización de un diseño adecuado a la hipótesis:** el diseño refleja el plan o esquema de trabajo del investigador, es su organización formal. El diseño incluye diversos subprocesos, describe con detalle qué se debe hacer y cómo realizarlo, como por ejemplo la asignación de sujetos a los diferentes grupos experimentales y las variables implicadas.
4. **Recogida y análisis de datos:** para recoger datos el investigador tiene a su alcance diferentes instrumentos o técnicas (test, cuestionarios, escalas, sistemas de observación, etc.). Cada uno posee ventajas e inconvenientes y tiene diferentes usos, por ello, a la hora de elegir un instrumento, el investigador debe tener en cuenta su validez y fiabilidad. Una vez obtenidos los resultados se han de analizar siguiendo un plan que se tendrá que haber determinado con anterioridad. El análisis de datos consiste en organizar y tratar la información para que se pueda describir, analizar e interpretar.
5. **Elaboración de conclusiones:** se incluyen aspectos como hasta qué punto y con qué limitaciones queda confirmada la hipótesis experimental, el poder de generalización de los datos obtenidos, la metodología utilizada, coincidencias o desacuerdos con otras investigaciones, implicaciones para la práctica y sugerencias para posteriores investigaciones.

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, 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, 2012).

Por ende se seleccionó como población de esta investigación, los sistemas de cementación con propiedades antimigratorias y térmicas. Por otro lado se estableció como muestra aquellas lechadas que usan polímeros con agente controlador de gas y cuyos aditivos se encontraran todos en estado sólido.

TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para desarrollar esta investigación experimental y alcanzar satisfactoriamente los objetivos planteados, fue necesario consultar diferentes fuentes de información, realizar distintos ensayos e utilizar una gran cantidad de instrumentos y equipos. A continuación se expone cuáles fueron las técnicas e instrumentos de recolección de datos utilizados.

Revisión Bibliográfica

Se realizó la consulta de distintos libros, estudios, artículos técnicos y manuales referentes a la cementación de pozos petroleros, migración de gas, polímeros y sistemas térmicos, con el fin de afianzar las bases teóricas y conocimientos relacionados con el tema desarrollado en el presente trabajo especial de grado.

Gráficas

Una gráfica es un agregado de datos numéricos que se plasma para representar el comportamiento de un proceso y facilitar su análisis.

Las gráficas fueron un instrumento de recolección de datos utilizadas con el fin de conocer las condiciones de pozo a las cuales estarían expuestas las lechadas de

cementación (presión y temperatura). Adicionalmente parte de los equipos utilizados para medir las propiedades físicas de una lechada de cemento expresan los resultados resumidos en una gráfica.

Pruebas de Laboratorio

Son el conjunto de ensayos y procedimientos a los cuales fueron sometidas las distintas lechadas de cementación formuladas durante el estudio. Dichos ensayos permitieron determinar las propiedades físicas y caracterizar el comportamiento de las lechadas de cemento bajo condiciones controladas (simulando las condiciones de pozo). Durante el desarrollo de esta investigación se realizaron nueve pruebas en las instalaciones del laboratorio de cementación:

- Prueba de densidad.
- Prueba de reología.
- Prueba de pérdida de fluido o filtrado.
- Prueba de fluido libre.
- Prueba de resistencia a la compresión.
- Prueba de tiempo de bombeabilidad.
- Prueba de esfuerzo de gel estático.
- Prueba de análisis de migración de fluido.
- Prueba de sedimentación.

Descripción de equipos

La información y datos necesarios para sustentar los resultados obtenidos, fueron obtenidos a través de los siguientes equipos:

Balanza electrónica

Se utiliza para pesar el cemento seco, los aditivos químicos y el fluido de mezcla según la formulación de la lechada. Se utilizó una balanza electrónica marca AE Adam de la serie PGL (ver Figura 3.1). Posee una resolución de 0.01g.



Figura 3. 1 Balanza electrónica. [Sardi, 2015]

Mezcladora

Este equipo se utilizó para mezclar los componentes de la lechada de cementación. El mismo dispone de dos modalidades de selección de velocidad. La primera es automática y brinda la opción de seleccionar las siguientes velocidades: 4000 ± 250 rpm y 12000 ± 250 rpm. Según la norma API 10B / ISO 10426-1 (Procedimiento Recomendado para la Prueba de Cementos para Pozos) estas velocidades (4000 rpm durante 15 seg + 0.1 seg y 12000 rpm durante 35 seg + 0.1s) permiten obtener una mezcla homogénea al proporcionar una energía de mezcla de 5.9 KJ/Kg de lechada. La segunda modalidad de selección de velocidad es manual. Esta última permite ajustar la velocidad a través de una perilla, con el fin de mezclar lechadas que requieran una menor energía de mezcla o aditivos especiales que pueden ser vulnerables al colapso a altas velocidades.

La mezcladora utilizada para la preparación de las lechadas de cemento posee una copa con un volumen aproximado de un cuarto de galón, consta de una cuchilla tipo mezclador en el fondo y un motor y caja controladora de velocidad. El recipiente para el mezclado y la cuchilla son de un material resistente a la corrosión (ver Figura 3.2).



Figura 3. 2 Mezcladora. [Sardi, 2015]

La mezcladora utilizada para la preparación de las lechadas de cemento posee una copa con un volumen aproximado de un cuarto de galón, consta de una cuchilla tipo mezclador en el fondo y un motor y caja controladora de velocidad. El recipiente para el mezclado y la cuchilla son de un material resistente a la corrosión.

Balanza Presurizada

Este equipo (marca *OFI testing equipment*) fue utilizado para determina la densidad de la lechada de cementación. Consta de una copa de muestra con volumen fijo, una válvula de presurización, una bomba manual de presurización, un visor, una pesa y un brazo con una escala donde se puede obtener la densidad de la lechada en [lb/gal]. En la copa es introducida la lechada de cementación (ver Figura 3.3). Posteriormente la copa es presurizada con el fin de reducir cualquier aire entrampado hasta un volumen insignificante, proporcionando de esta manera una medición más representativa de la verdadera densidad de la lechada.



Figura 3. 3 Balanza Presurizada. [Sardi, 2015]

Viscosímetro rotacional

Se utilizó este instrumento de 8 velocidades, marca *OFI testing equipment* y modelo 800 (ver Figura 3.4), para medir los parámetros reológicos de las lechadas en estudio. Es un instrumento de medición que indica la deflexión (torque) debido al esfuerzo que se aplica a un fluido que interactúa entre un cuerpo rígido (bob) y uno rotatorio (rotor). Lo compone principalmente un bob, un rotor, un resorte y el motor.

Las lecturas tomadas en este instrumento posteriormente permiten el cálculo del comportamiento reológico del fluido.



Figura 3. 4 Viscosímetro rotacional. [Sardi, 2015]

Consistómetro Atmosférico

Marca *Chandler Engineering Company*, modelo 1200 (ver Figura 3.5), se utilizó principalmente para acondicionar la lechada de cemento y fluidos a presión atmosférica y temperatura circulante menor ó igual a 190°F (según norma ISO 10426-2/ API 10B). El equipo está compuesto por un controlador de temperatura, una resistencia, el cuerpo y el motor. El fluido que se utiliza como conductor térmico es el agua con una pequeña capa de aceite mineral blanco. En este equipo se simuló las condiciones de premezclado de las lechadas de cemento.



Figura 3. 5 Consistómetro Atmosférico. [Sardi, 2015]

Filtro prensa estático de alta presión y alta temperatura

Es un equipo que se utilizó para determinar la pérdida de filtrado de una lechada de cemento con un diferencial de presión de 1000psi y en contacto con una malla de 60/325mesh. Está compuesta principalmente por una copa, dos mallas, dos tapas, una chaqueta de calentamiento y una perilla para seleccionar la temperatura de la prueba (ver Figura 3.6).

En un cilindro graduado se recoge filtrado hasta cumplir 30 min o hasta que la lechada se deshidrate en un tiempo menor al mismo.



Figura 3. 6 Filtro prensa estático de alta presión y alta temperatura. [Sardi, 2015]

La cantidad de filtrado se puede calcular mediante la Ecuación (3.1):

$$Pf = 2 Q \frac{c}{\sqrt{t}}$$

3.1

Dónde:

Pf = pérdida de filtrado [cc/min]

Q = volumen del filtrado [cc]

t = tiempo [min]

c = factor de conversión [c = 5,477]

Consistómetro presurizado

Es un equipo que se utiliza para determinar el tiempo de espesamiento de una lechada de cemento simulando las condiciones de presión y temperatura del pozo (ver Figura 3.7). La unidad de medición es el Bc (consistencia de Bearden).



Figura 3. 7 Consistómetros presurizados marca *Chandler Engineering Company*. [Sardi, 2015].

Está compuesto principalmente por una celda, una copa, cuerpo, una resistencia, un potenciómetro y aceite como conductor térmico y agente presurizante (ver Figura 3.8).



Figura 3. 8 Izquierda: partes de la copa de muestra. Derecha: consistómetro. [Sardi, 2015]

Analizador de esfuerzo de gel estático

Este equipo posee dos transductores. El primero genera una señal ultrasónica, la cual es transmitida a través de la muestra. El segundo transductor ubicado en el fondo, mide y registra la amplitud de la onda luego de atravesar la lechada. Estos datos son procesados y el esfuerzo de gel estático es determinado utilizando un algoritmo que correlaciona la amplitud acústica de la señal con el esfuerzo de gel estático.

El equipo está compuesto por una copa, dos transductores ultrasónicos (tope y fondo), controlador de temperatura, una línea de alta presión y una chaqueta de calentamiento (ver Figura 3.9).



Figura 3. 9 Analizador de esfuerzo de gel estático. [Sardi, 2015]

Analizador de cemento ultrasónico

Este equipo fue utilizado para realizar una medición continua del tiempo de tránsito de una onda ultrasónica a través de la lechada de cementación (ver Figura 3.10). Posteriormente un software convierte a través de correlaciones dicho tiempo de tránsito en resistencia a la compresión.



Figura 3. 7 Analizador de cemento ultrasónico. [Sardi, 2015]

Analizador de migración de fluidos FMA

Es un equipo que tiene la capacidad de evaluar la migración de fluido a través de la matriz de cemento durante su periodo de hidratación (ver Figura 3.11), debido a que es el periodo de transición más crítico; el equipo funciona partiendo del principio de caída de presión simulando la pérdida de presión hidrostática a través del desarrollo de gel.



Figura 3. 8 Equipo analizador de migración de fluidos FMA. [Sardi, 2015]

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Para alcanzar los objetivos planteados en la investigación, se procedió a dividir la misma en cinco fases, las cuales son expuestas en la figura 3.12.



Figura 3. 9 Proceso metodológico del trabajo especial de grado. [Sardi, 2015]

Fase I Selección de las condiciones operacionales

En esta fase es alcanzado el primer objetivo específico de la investigación. En la misma se realizó la recopilación de información y los datos necesarios para establecer las condiciones operacionales del estudio. Se revisó los datos suministrados por la empresa operadora (necesidades y requerimientos), las condiciones operacionales de 8 pozos ubicados en el área de estudio, se revisó bibliografía con el fin de seleccionar que variables y parámetros eran necesarios para desarrollar las fases posteriores y por último se establecieron las condiciones bajo las cuales las lechadas de cementación iban a ser evaluadas.

Una vez establecidas las condiciones operacionales se procedió a recopilar información sobre las formulaciones utilizadas para trabajos de cementación con requerimientos similares (lechadas térmicas y antimigratorias). Posteriormente fueron consultados artículos técnicos en otras latitudes que incluyeran en sus formulaciones el polímero controlador de migración en estado sólido que se pretendía evaluar. Para finalizar se originó una solicitud de análisis de laboratorio (SAL ver figura 3.13), en la cual se indican todas las condiciones operacionales, los requerimientos del cliente y el diseño de una posible formulación de lechada de cementación térmica antimigratoria (formulación tipo) la cual será sometida a un proceso de optimización. Con esto se cubre el segundo objetivo específico planteado.

Schlumberger

SOLICITUD DE ANALISIS DE LABORATORIO

Ciente:	SLB	Distri/Loc:	Tierra Este Pesado
Solicitado por:	Luis Sardi	Pozo:	-
Fecha:	16-Aug-14	Tipo de Trabajo:	Rev 7 "
T. Superfi	90 °F	MD:	1714 ft
BHST:	123 °F	TVD:	1714 ft
BHCT:	97 °F	BHP:	1231 psi
Muestras de:	Laboratorio	Tiempo para condiciones:	40 min

LECHADAS DE CEMENTO				
Volumen de Lechada		Convencional	Lechada 2	Lechada 3
Aditivos	Función			
D909	H	100%		
D068	Silica	32% BWOC	43%	
D154	Extendedor	11% BWOC		
D400	GasBlok	1.5% BWOC		
D202	Dispersante	0.5% BWOC		
D201	Retardador	0.1% BWOC		
D048	Antiespumante	0.2% BWOC		
Tipo de Agua	Agua Fresca			
	Agua de Mar			
	Otra			

PROPIEDADES			
Densidad	14.50 ppg		
Tiempo de Espesamiento	04:00 - 04:30 h:min		
Premezclado @ 80 °F	30 min		
Perdida de Filtrado	< 50 ml/30min		
Fluido Libre @ 30 °	0		
RC (UCA)	1500 psi @24 h		
SGSA	Requerido		
Reologia (PV)	> 30 cP		
Reologia (Ty)	30-60 lb/100ft ²		
Otra(s)			

Figura 3. 10 Solicitud de análisis de laboratorio (SAL). [Sardi, 2015]

Fase II Procura y preparación de materiales

Se establecieron dos tipos de formulación, una con cemento tipo H y otra con cemento tipo B. Esto con el fin de brindar flexibilidad operacional al momento de no poseer en inventario alguno de los dos ellos.

Una vez conocida la formulación tipo, se procedió a solicitar a la planta la cantidad de cemento necesaria para realizar el estudio, además de muestrear todos los aditivos requeridos.

Seguido a esto se realizó distintos ensayo conocidos como QA/QC, para cumplir con el objetivo de evaluar las propiedades de control de calidad del cemento petrolero bajo la norma ISO10426-2.

Se pesó cemento puro y agua según las cantidades indicadas en la tabla 3.1:

Tabla 3. 1 Requerimientos para la preparación de la lechada. [American Petroleum Institute]

Componentes	Tipo B (g)	Tipo H (g)
Agua	355 ± 0,5	327 ± 0,5
Cemento	772 ± 0,5	860 ± 0,5

Luego de pesar los dos componentes, se realizó el siguiente procedimiento (ver Figura 3.14):

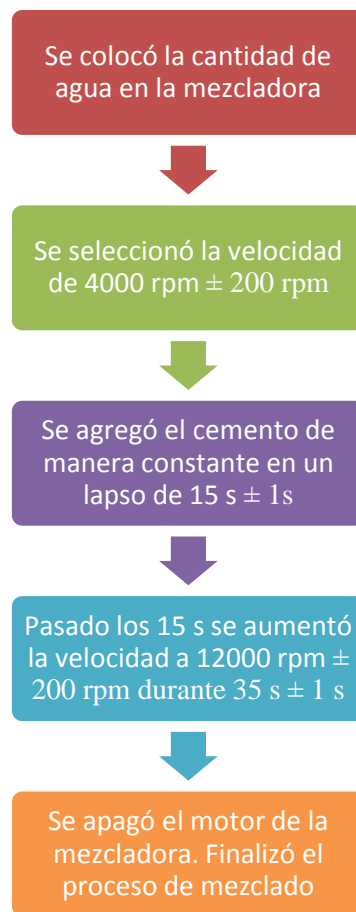


Figura 3. 11 Procedimiento de mezcla de cemento con agua. [American Petroleum Institute]

Una vez mezclada la lechada se procedió a realizar 3 pruebas de control de calidad del cemento: fluido libre, resistencia a la compresión y tiempo de espesamiento. Los valores de estos requerimientos, son expuestos en la tabla 3.2.

Tabla 3. 2 Resumen de los requerimientos físicos para cementos B y H. [American Petroleum Institute]

Clase de cemento	B	H
Porcentaje de agua de mezcla %	46	38
Contenido de Fluido Libre %	NR	5.9
Mínima resistencia a la compresión (lpc) (8 horas de tiempo de curado)	200 @100°F y 14,7 psi	300 @100°F y 14,7 psi
Mínima resistencia a la compresión (lpc) (24 horas de tiempo de curado)	NR @140°F y 14,7 psi	1500 @140°F y 14,7 psi
Mínimo tiempo para alcanzar una consistencia de 100 Bc (min)	90	90
Máximo tiempo para alcanzar una consistencia de 100 Bc (min)	NR	120

Nota: La máxima consistencia entre los primeros 15 min y 30 min debe ser 30 Bc

Leyenda: NR = No requiere

Prueba de Fluido Libre

Esta prueba sólo se realizó a la mezcla de agua con cemento H, porque la norma indica que para el cemento B esta prueba no es requerida. Una vez mezclada la lechada según el procedimiento mencionado anteriormente, se procedió a acondicionar la lechada durante 20 min \pm 30 s a una temperatura de 80°F \pm 3°F en el

consistómetro atmosférico. Pasado los 20 minutos se realizó el traspaso en un tiempo no mayor a 1 min de 790 g \pm 5 g de lechada a un matraz cónico de 500 ml, y se selló el mismo para evitar la evaporación. Se colocó el matraz en una superficie libre de vibraciones durante 2 horas \pm 5 min. Luego de este período de tiempo se retiró la envoltura sellante del matraz y el fluido libre de la muestra con la ayuda de una pipeta o jeringa, y se midió el volumen del mismo (expresado en ml).

Luego utilizando la Ecuación (3.2) se calculó el porcentaje de fluido libre:

$$\% FL = \frac{FL * dl}{Mi} * 100 \quad 3.2$$

Dónde:

% FL = porcentaje de fluido libre [porcentaje]

FL = volumen de fluido libre [ml]

dl = densidad de la lechada [g/cc]

Mi = masa inicial registrada [g]

Una vez obtenido el porcentaje se comparó con el valor establecido por la norma (ver tabla 3.2).

Resistencia a la compresión

La lechadas de cemento B y H fueron vertidas en los moldes previamente engrasados, hasta llenar la mitad del volumen de los mismos. Se agitó cada muestra mediante 27 movimientos, con el fin de liberar el gas que pudiese haber quedado atrapado. Luego se terminó de llenar los moldes, se agitó de nuevo cada uno y se taparon con una placa previamente engrasada. La norma establece que no menos de 3 cubos deben ser usados para determinar esta propiedad.

Luego se colocaron los moldes en el baño precalentado a una temperatura de 100°F, y permanecen en el baño durante 8 horas. Adicionalmente la norma requiere que el

mismo procedimiento sea realizado pero a una temperatura mayor (140°F) para lechadas con cemento clase H, y para lechadas con cemento clase B se debe realizar un baño de curado a 100°F durante 24 horas.

Los moldes fueron removidos del baño 45 min \pm 5 min antes de cumplirse el tiempo de curado. Los cubos fueron desmontados del molde y se enfriaron durante un periodo de 40 min en un baño de agua que se encontraba a una temperatura de 80°F \pm 6°F. Se midió con la ayuda de un vernier electrónico las dimensiones de los cubos, con el fin de obtener el área. Posteriormente los cubos fueron colocados en la prensa mecánica, con el fin de efectuar la prueba destructiva de resistencia a la compresión. Con la ayuda de un software se obtiene la lectura de la resistencia a la compresión.

Prueba del tiempo de espesamiento

Al tener mezclada la lechada, se traspasó el fluido a la copa del consistómetro presurizado. Una vez llenada la copa se golpeó suavemente la misma, con el objetivo de eliminar el aire que pudiese haber quedado atrapado y se colocó en la celda movable del equipo, se encendió la rotación y se acopló la paleta al consistómetro, chequeando que el equipo tuviera una lectura de la consistencia de la lechada. Luego el cabezal del cilindro se enroscó al mismo y se suministró aceite mineral a la celda. Este fluido permite el calentamiento de la celda. Por último se introdujo el sensor de temperatura a través del eje del vaso enroscándolo parcialmente, y ajustándolo cuando el aceite mineral llenó completamente la celda.

Se siguió con programa del ensayo estipulado por la norma. Los programas para las lechadas con cemento clase B y clase H pueden apreciarse en la tabla 3.3 y 3.4 respectivamente. Cuando transcurrieron 30 min de haber iniciado la prueba se registró la consistencia de la lechada. La norma establece que este valor debe ser menor a 30 Bc. Se continuó con el ensayo hasta que la lechada alcanzó una consistencia de de 100 Bc. Para ambas lechadas la norma exige que este valor de consistencia sea alcanzado en un lapso mínimo de 90 y para las lechadas con cemento

H establece un lapso máximo de 120 minutos. Una vez alcanzado el valor de 100 Bc la prueba se da por concluida.

Tabla 3. 3 Programa para la prueba del tiempo de espesamiento para cemento clase B. [*American Petroleum Institute*]

Tiempo transcurrido	Presión	Temperatura
min	MPa (lpc)	°C (°F)
0	5,2 (750)	27 (80)
2	7,6 (1.100)	28 (83)
4	9,7 (1.400)	31 (87)
6	11,7 (1.700)	32 (90)
8	13,8 (2.000)	34 (93)
10	15,9 (2.300)	36 (97)
12	17,9 (2.600)	38 (100)
14	20,0 (2.900)	39 (103)
16	22,1 (3.200)	41 (106)
18	24,8 (3.600)	43 (110)
20	26,7 (3.870)	45 (113)

Tabla 3. 4 Programa para la prueba del tiempo de espesamiento para cemento clase H. [*American Petroleum Institute*]

Tiempo transcurrido	Presión	Temperatura
min	MPa (lpc)	°C (°F)
0	6,9 (1.000)	27 (80)
2	9,0 (1.300)	28 (83)
4	11,1 (1.600)	30 (86)
6	13,1 (1.900)	32 (90)
8	15,2 (2.200)	34 (93)
10	17,3 (2.500)	36 (96)
12	19,3 (2.800)	37 (99)
14	21,4 (3.100)	39 (102)

Continuación Tabla 3.4 Programa para la prueba del tiempo de espesamiento para cemento clase H. [American Petroleum Institute]

Tiempo transcurrido	Presión	Temperatura
min	MPa (lpc)	°C (°F)
16	23,4 (3.400)	41 (106)
18	25,5 (3.700)	43 (109)
20	27,6 (4.000)	44 (112)
22	29,6 (4.300)	46 (115)
24	31,7 (4.600)	48 (119)
26	33,8 (4.900)	50 (122)
28	35,6 (5160)	52 (125)

Fase III Recopilación de la evaluación del sistema convencional

A lo largo de esta fase de la investigación se realizó la recolección de las evaluaciones de lechadas de cemento con la formulación convencional utilizada para hacer frente a pozos que serán sometidos a la inyección de vapor y que presentan un potencial riesgo de migración de gas durante la perforación de alguna de sus secciones. La formulación usada convencionalmente se presenta en la tabla 3.5.

Tabla 3. 5 Formulación convencional de una lechada antimigratoria. [Sardi, 2015]

Código	Función	Concentración	Estado
D909	CEMENTO H	100 %	Sólido
D066	SÍLICA	34 % BWOC	Sólido
D154	EXTENDEDOR	10 % BWOC	Sólido
D500	ANTIMIGRATORIO	1.6 GPS	Líquido
D080	DISPERSANTE	0.02 GPS	Líquido
D177	RETARDADOR	0.01 GPS	Líquido
D047	ANTIESPUMANTE	0.03 GPS	Líquido

LEYENDA: GPS = Galones por saco ; BWOC = *By Weight Of Cement*

Se recolectó dicha evaluación con el fin de comparar posteriormente el desempeño de la lechada de cementación formuladas comúnmente, con el desempeño de la lechada de cementación propuesta en esta investigación, bajo condiciones operacionales similares.

Fase IV Optimización y evaluación del sistema propuesto

Durante esta fase, se evaluó el rendimiento y desempeño de la lechada de cementación bajo las condiciones operacionales establecidas en la Fase I. Por ende se caracterizaron físicamente las lechadas y se realizó la optimización de los sistemas, hasta alcanzar los valores de las propiedades físicas requeridas por la empresa operadora.

Se comenzó a trabajar con la formulación tipo (ver tabla 3.6) de una lechada de cementación térmica y antimigratoria con cemento clase H.

Tabla 3. 6 Formulación tipo de una lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Código	Función	Concentración	Masa (g/600mL)
D909	CEMENTO H	64.7 % BVOB	465.03
D066	SÍLICA	34 % BWOC	158.11
D154	EXTENDEDOR	10 % BWOC	46.5
D400	ANTIMIGRATORIO	1.5 % BWOC	6.98
D202	DISPERSANTE	0.2 % BWOC	0.93
D201	RETARDADOR	0.2 % BWOC	0.93
D046	ANTIESPUMANTE	0.2 % BWOC	0.99

LEYENDA: BVOB = *By Volume Of Blend* ; BWOC = *By Weight Of Cement*

Se realizó el pesado del cemento, aditivos químicos en estado sólido y el agua fresca, y se mezcló la lechada siguiendo el procedimiento antes mencionado (figura 3.14).

Una vez mezclada, se procedió a realizar las siguientes mediciones y pruebas con el fin de abarcar el objetivo específico de evaluar las propiedades físicas de la lechada de cementación siguiendo los procedimientos de la norma API 10B/ ISO10426-2:

Medición de la densidad

Se midió la densidad de la lechada de cementación utilizando la balanza presurizada. Para ello se colocó la lechada en la copa de la balanza, se tapó la misma y se procedió a presurizar la copa con la ayuda de una bomba manual. Posteriormente se ubicó la balanza en una base y se desplazó la pesa a través del brazo indicador hasta alcanzar una posición horizontal, y se registró la lectura en libras por galón [lb/gal]. La densidad de la lechada coincidió con la densidad teórica de la formulación.

Proceso de acondicionamiento

Luego de medir la densidad, la lechada se acondicionó en el consistómetro atmosférico a 90°F (temperatura de superficie) durante un periodo de 30 minutos, para simular la exposición de la lechada a dicha temperatura durante el proceso de premezclado. Se incrementó la temperatura de 90°F a 97°F (temperatura circulante del fondo del pozo) durante un periodo de 40 minutos, simulando el incremento de temperatura que percibe la lechada durante su viaje hacia el fondo del pozo. Por último se mantuvo expuesta la lechada durante 30 minutos a la temperatura circulante del fondo del pozo para poder evaluar sus propiedades de reología, pérdida de fluido y fluido libre.

Reología

Con el fin de obtener los parámetros reológicos como la viscosidad plástica y el punto cedente y el modelo reológico que gobierna el comportamiento de la lechada de cementación, la misma se colocó en el vaso del viscosímetro y se registró las lecturas del esfuerzo de cortes a las siguientes velocidades: 3, 6, 10, 20, 30, 60, 100, 200 y 300 rpm. Para conocer la capacidad de formación de geles se realizó la lectura del

esfuerzo de corte (a la velocidad de 3 rpm) al pasar 10 segundos y 10 min de estar estática la lechada.

Con el objetivo de describir la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte que presenta la lechada de cementación, se realizó la caracterización reológica de la misma, a través de los modelos reológicos: Plástico de Bingham y Ley de Potencia.

- Modelo Plástico de Bingham: Hernández (2012), indica que 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).

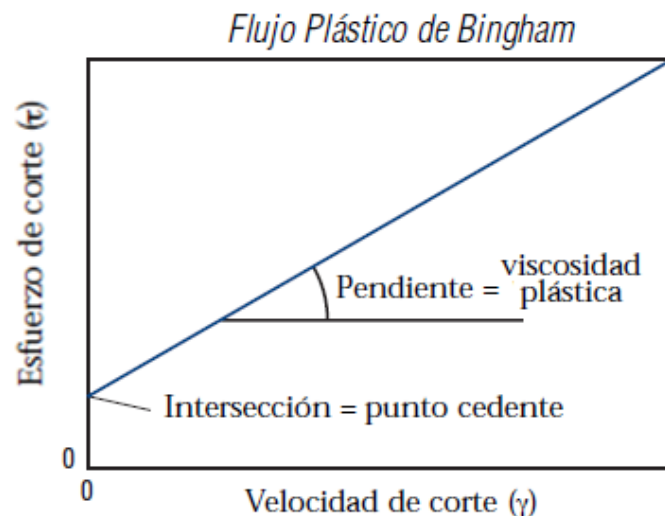


Figura 3. 12 Gráfica del flujo plástico de Bingham.

La expresión matemática que responde a esta recta, se representa en la Ecuación (3.3):

$$\tau = \tau_0 + (\mu_p * \gamma) \quad 3.3$$

Dónde:

τ = esfuerzo de corte [lb/100ft²]

τ_0 = esfuerzo de corte a una velocidad de cero [lb/100ft²]

μ_p = viscosidad plástica [cp]

γ = velocidad de corte [1/s]

- Modelo Ley de Potencia: Hernández (2012), explica que 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 (3.4):

$$\tau = k \gamma^n \tag{3.4}$$

Dónde:

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]

La característica que define a este modelo, es que la proporcionalidad entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte (γ), se obtiene solamente en coordenadas logarítmicas cuando está en flujo laminar.

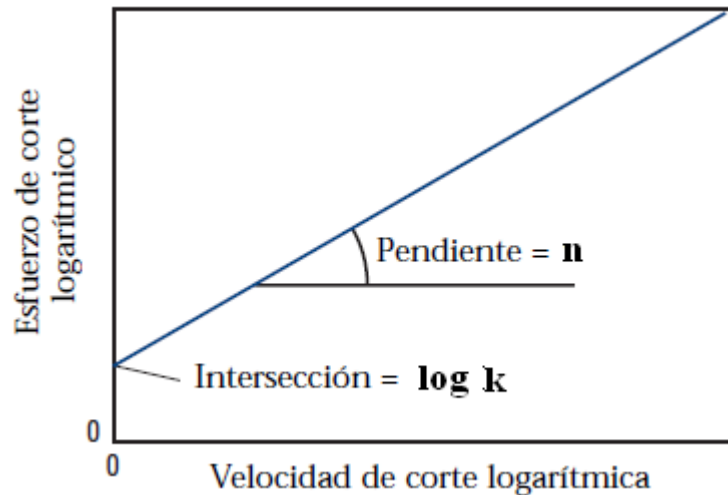


Figura 3. 13 Gráfico logarítmico del modelo de Ley de Potencia.

La expresión matemática expresada en la Ecuación (3.5) que responde a esta recta, es:

$$\log \tau = \log k + n \log \gamma \tag{3.5}$$

Prueba de pérdida de filtrado

Para conocer cuánto fluido perdía la lechada de cementación al ser expuesta contra la diferencial de 1000 psi, se procedió a colocar la lechada previamente acondicionada en la copa del equipo filtro prensa estático de alta presión y alta temperatura, el cual se encontraba precalentado a la temperatura circulante del fondo del pozo (97°F). Luego con la ayuda de un cilindro graduado se registró el valor de fluido recolectado durante un tiempo de 30 min dividido en los siguientes intervalos: 1 min, 5 min, 10 min, 15 min, 20 min y 30 min. Por último mediante la ecuación 3.1 se obtuvo la cantidad de filtrado que perdió la lechada hacia la formación, este valor debe ser menor o igual a 50 ml en 30 min.

Prueba de fluido libre

Para conocer la cantidad de fluido libre que se pudo haber separado de la lechada de cementación, se vertió la lechada en un cilindro graduado de 250 ml, se colocó el cilindro en una superficie libre de perturbaciones, se inclinó con un ángulo de 30° según los requerimientos y se mantuvo la lechada en esa posición durante 2 horas.

Prueba de sedimentación

Con el fin de determinar si existía o no una segregación de partículas o la sedimentación de ellas, se procedió a correr una prueba de sedimentación. Una celda bp (que simula el núcleo de cemento) se llenó con lechada previamente acondicionada. Mientras era llenada la celda, con la ayuda de un alambre se revolvió la lechada con el fin de liberar cualquier cantidad de aire que pudiese haber quedado atrapado. Luego se colocó en una cámara de curado a la temperatura estática del fondo del pozo (123°F) y a una presión de 500 lpc, donde permaneció durante 24 horas. Al pasar 24 horas se desmontó la celda y se procedió a cortar 2 cm en el tope y fondo de la muestra. Luego se dividió la muestra en 4 partes iguales, identificando cual es el tope la base y las secciones intermedias. Se registró el peso en el aire de cada una de las secciones y posteriormente fueron sumergidas en un *beaker* lleno de agua y registrado de nuevo el peso.

Aplicando el principio de Arquímedes, se calculó la densidad relativa de cada sección del núcleo de cemento a través de la Ecuación (3.6):

$$dr = \frac{ms}{ma} * \rho a \quad 3.6$$

Dónde:

dr = densidad relativa [lpg]

ms = masa de la sección en seco [g]

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

ρa = densidad del agua [lpg].

Finalmente se determinó el porcentaje de sedimentación de cada sección a través de la siguiente Ecuación (3.7):

$$\text{Porcentaje de sedimentación} = \left| \frac{(dr - \rho lc)}{\rho lc} \right| * 100 \quad 3.7$$

Dónde:

dr = densidad relativa [lpg]

ρlc = densidad de la lechada [lpg].

Es necesario resaltar que el porcentaje máximo de sedimentación establecido por la norma API RP10B-2 es de 5%.

Tiempo de espesamiento

Para determinar el tiempo de espesamiento de la lechada se realizó la misma preparación del equipo descrita durante la prueba de control de calidad en la fase II.

Una vez colocada la lechada en el equipo y preparado el mismo para iniciar la prueba, se estableció el siguiente programa en el Software del consistómetro presurizado:

- Exponer la lechada a condiciones atmosféricas durante 30 minutos (14 lpc y 90°F) para simular las condiciones durante el proceso de premezclado.
- Aumentar la temperatura de 90°F a 97°F (temperatura circulante) y la presión de 14 lpc a 1231 lpc (presión de fondo del pozo) en una rampa de tiempo de 40 minutos. Esto con el fin de simular los cambios de presión y temperatura que percibe la lechada durante su viaje hacia el fondo del pozo.
- Mantener 97°F y 1231 lpc hasta que la lechada alcance una consistencia de 70 Bc.

Resistencia a la compresión

Para conocer esta propiedad física de la lechada de cemento, se realizó una prueba sónica no destructiva en el equipo *Ultrasonic Cement Analyzer (UCA)*. 200cc de lechada mezclada y acondicionada se colocó en la celda de prueba, dejando un espacio de 6 mm por debajo del tope de la celda. Se agregó una pequeña cantidad de agua justo para alcanzar el indicador de la celda. Luego se colocó la celda dentro del equipo precalentado a la temperatura circulante del fondo del pozo, se conectó el cable del sensor inferior con el transductor, la línea de alta presión a la celda, el cable del sensor superior al transductor y por último al termocupla o sensor de temperatura.

Por último la prueba fue programada para que alcanzara la temperatura estática del fondo del pozo (123°F) en una rampa de tiempo de 240 min y permaneciera a esa temperatura y una presión de 3000 lpc durante 24 horas.

Esfuerzo de gel estático

Se realizó el mismo procedimiento de preparación y colocación de la muestra en el equipo descrito anteriormente para la prueba de resistencia a la compresión. Se programó una rata de calentamiento de 4°F/min, por ende la lechada de cementación se calentó de 97°F a 123°F en 6.5 min, y se mantuvo expuesta a esa temperatura hasta que la misma desarrolle un esfuerzo de gel estático de 1200 libras fuerza por cada cien pies cuadrados (lbf/100ft²).

Análisis de migración de fluido

Se realizó la prueba de análisis de migración de fluido con el fin de evaluar la capacidad de no permitir la percolación de fluidos no deseados gas y/o agua a través de la matriz del cemento cuando el diferencial de presiones entre la presión de formación y la presión de poro del cemento se hace cero, debido a que este es el punto crítico donde existe el máximo riesgo de migración de fluidos. Con ello se logró abarcar el objetivo específico de evaluar la capacidad del polímero del impedir la migración de gas hacia la lechada de cemento.

Se realizó el ensayo siguiendo detalladamente el procedimiento expuesto en el apéndice A.

Por último se realizó la misma serie de pruebas a la formulación tipo con cemento B.

Tabla 3. 7 Formulación tipo de una lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Código	Función	Concentración	Masa (g/600mL)
D902	CEMENTO B	70.1 % BVOB	458.29
D066	SÍLICA	36 % BWOC	164.98
D154	EXTENDEDOR	10 % BWOC	45.83
D400	ANTIMIGRATORIO	1.1 % BWOC	5.04
D202	DISPERSANTE	0.8 % BWOC	3.67
D201	RETARDADOR	0.2 % BWOC	0.92
D046	ANTIESPUMANTE	0.2 % BWOC	0.97

LEYENDA: BVOB = *By Volume Of Blend* ; BWOC = *By Weight Of Cement*

Fase V Análisis, conclusiones y recomendaciones

Última fase del trabajo especial de grado, donde se realizó una recopilación todos de los resultados arrojados por las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio de cementación. Posteriormente estos resultados fueron analizados con el fin de determinar si se alcanzó el objetivo de diseñar de manera eficiente una lechada de cementación con propiedades térmicas y antimigratorias. En esta fase se determinaron las ventajas de usar un aditivo controlador de migración de gas sólido frente a los usados frecuentemente en el área de estudio y se expusieron las conclusiones y las recomendaciones de la investigación.

CAPÍTULO IV

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se expone toda la información de carácter geográfico, geológico, estratigráfico y estructural, con el fin de realizar la descripción del área de estudio. Fue seleccionada como área de estudio la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, ubicada dentro de la cuenca petrolífera Maracaibo-Falcón (ver Figura 4.1) y conformada en la zona terrestre por los campos Cabimas, Tía Juana, Lagunillas, Bachaquero.



Figura 4. 1 Cuenas Petrolíferas de Venezuela. [Página web de Petróleos de Venezuela S.A]

UBICACIÓN DE LA SUBCUENCA DEL LAGO DE MARACAIBO

La cuenca petrolífera Maracaibo-Falcón se encuentra subdividida en dos subcuencas: La cuenca del Lago de Maracaibo y la cuenca de Falcón. En el presente trabajo concentra su estudio dentro de la cuenca del Lago de Maracaibo. Hernández 2012 ubica esta cuenca 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. Su estructura 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 (ver figura 4.2). Topológicamente se extiende sobre toda el área ocupada por las aguas del Lago de Maracaibo y los terrenos planos suavemente ondulados que la circundan.



Figura 4. 2 Límites estructurales de la cuenca del Lago de Maracaibo. [WEC, 1997]

Debido al volumen total de sedimentos alojados en ella, al número de campos que se han descubierto (ver Figura 4.3), la cantidad de petróleo que se ha producido y se produce de sus yacimientos y la historia petrolera que posee esta cuenca, González de Juana (1980) la catalogó en su momento como la primera en importancia en Sur América y una de las más importantes a escala mundial.

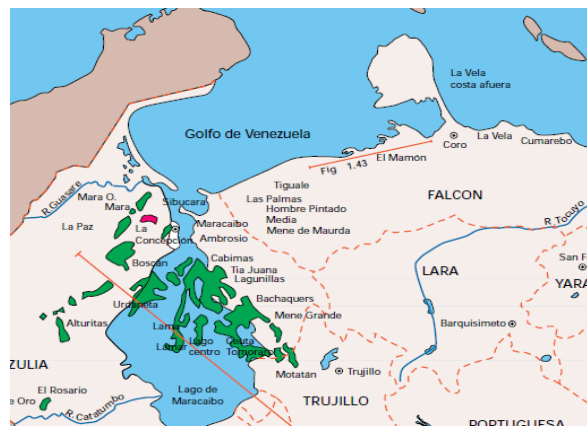


Figura 4. 3 Ubicación de los campos petroleros de la Cuenca del Lago de Maracaibo. [WEC, 1997]

La cuenca está dividida en cuatro áreas: costa oriental del lago, costa occidental del lago, centro del lago y Sur del lago-Trujillo. Es necesario destacar que el área de interés abarcada en esta investigación se ubica en la costa oriental del Lago de Maracaibo.

CAMPO COSTANERO DE BOLÍVAR

Según González de Juana (1980), en la costa oriental del lago, el Campo Costanero de Bolívar es la mayor extensión productora de toda la cuenca. Se extiende paralelamente a la costa oriental del lago, parcialmente en tierra y parcialmente en el agua, por una longitud de 95 km entre el extremo de Campo Ceuta al sur, hasta la desembocadura del río El Mene situado a 7 km al noreste de Punta de Icotea (ver Figura 4.4).

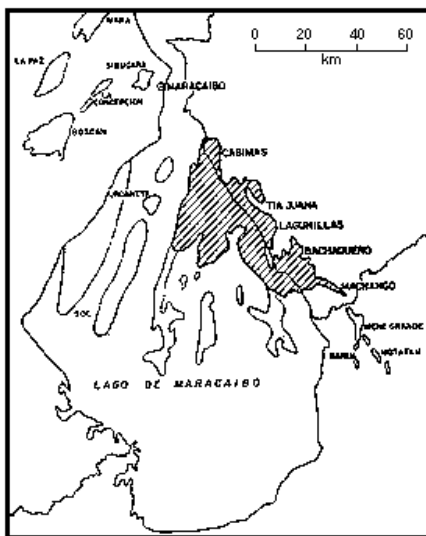


Figura 4. 4 Ubicación del Campo Costanero de Bolívar. [Almarza, 1998]

La extensión total del área productora de este Campo Costanero de Bolívar sobrepasa las 120.000 hectáreas.

Almarza (1998) relata que menes activos indicaron desde muy temprano la acumulación de petróleo y condujeron a actividades de perforación que fueron iniciadas por la Venezuelan Oil Concessions, Ltd., con el pozo Santa Bárbara No. 1 (R1) en 1913. El pozo Santa Bárbara No. 2 (R-2) situado en el área de Punta Gorda,

al sur de Cabimas, encontró la primera producción comercial; aunque la perforación de este pozo comenzó en 1913 no fue terminado hasta el año 1917 como productor en la arenisca Santa Bárbara del Mioceno. Cinco años más tarde (1922) el pozo Barroso-2 (R-4) reventó sin control, arrojando 100.000 b/d de petróleo, lo cual dio estímulo al desarrollo en gran escala de esta enorme área petrolífera.

Después del descubrimiento, (Campo La Rosa), nuevos pozos exploratorios encontraron acumulaciones petrolíferas miocenas en Lagunillas (Lago-1, Gulf, 1926), Tía Juana (TJ-1, Lago, 1928) y Bachaquero (Lagunita-1, Gulf, 1930).

En 1939 el pozo LL-370, Creole, descubrió producción de las arenas "B" del Eoceno; El pozo LL- 1930, Creole, encontró en 1957 yacimientos cretácicos hacia el centro del Lago, y desde entonces se han definido excelentes acumulaciones de petróleo liviano en calizas fracturadas.

En las primeras fases del desarrollo, la perforación descubría acumulaciones muy separadas, y se les asignaron los nombres de Ambrosio, La Rosa, Icotea, Cabimas, Punta Benítez, Tía Juana, Taparito, Lagunillas, Pueblo Viejo, Bachaquero. Las extensiones y el desarrollo de los campos indicaron que se trataba realmente de una sola área, actualmente llamado Campo Costanero de Bolívar.

Estratigrafía

Por encima del Basamento existen rocas de edad Cretáceo, Paleoceno, Eoceno, Oligoceno y Mioceno (ver Figura 4.5). Sin embargo los pozos estudiados tienen como objetivo alcanzar las formaciones productoras de Lagunillas y La Rosa de edad Mioceno, por ende es de nuestro interés enfocarnos en la secuencia mioceno-oligoceno.

La secuencia mioceno-oligoceno pertenece a un gran complejo deltáico de un sistema de canales en dirección norte-sur y depósitos costeros asociados, con arenas poco consolidadas de espesor variable. Se subdivide, de abajo hacia arriba, en las siguientes formaciones: Icotea, La Rosa, Lagunillas, Isnotú y Betijoque. La

Formación Icotea (oligoceno) está compuesta principalmente de areniscas, limolitas y arcillitas. La Formación La Rosa consiste en lutitas marinas, fosilíferas, intercaladas con areniscas. Las formaciones Lagunillas, Isnotú y Betijoque están constituídas por arcillas interestratificadas con lutitas y areniscas porosas poco consolidadas, de grano fino a medio.

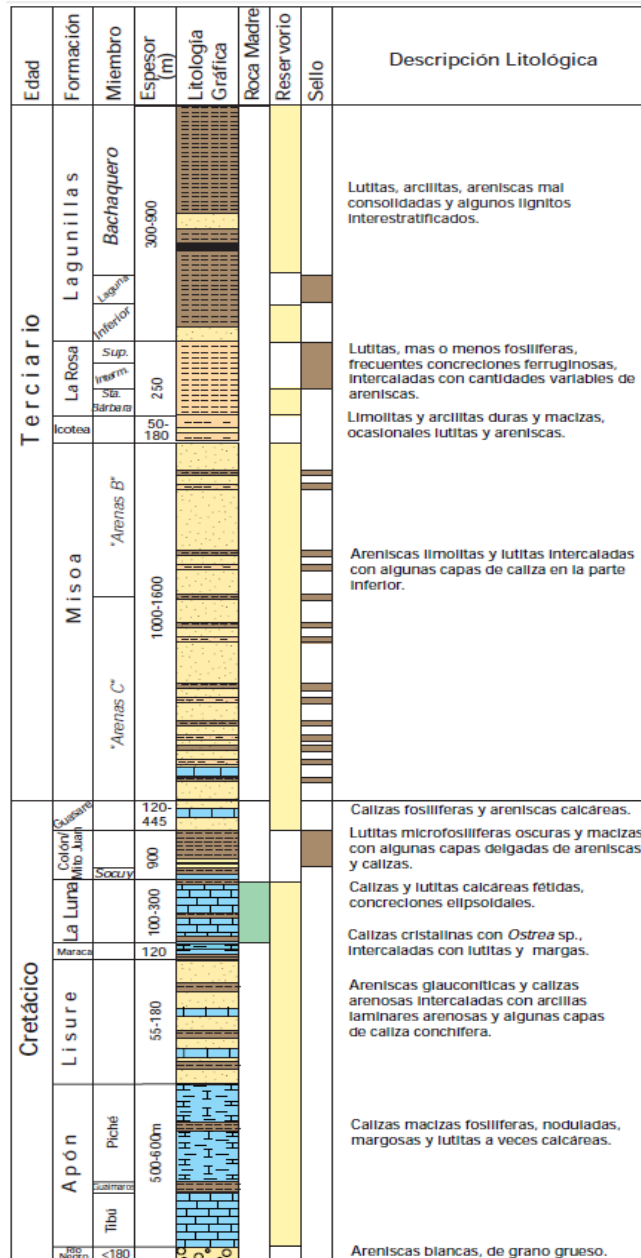


Figura 4. 5 Columna estratigráfica compuesta de la cuenca del Lago de Maracaibo. [WEC, 1997]

Estructura del Campo

Almarza (1998) identifica que el Eoceno y las formaciones más antiguas están intensamente plegadas y falladas, y toda la región fue erosionada a una penillanura antes del depósito del Oligo-Mioceno, con excepción del área de Pueblo Viejo, estructura activa aún durante el depósito del Mioceno. Las líneas estructurales en la discordancia de la base del Mioceno son por consiguiente una representación general de la estructura de los sedimentos del Mioceno. Esta estructura es homoclinal con buzamiento suave de $4-1^\circ$ hacia el sur y plegamientos locales. Se conocen estructuras miocenas de pequeño relieve, como los sinclinales de Cabimas y Ambrosio, y fallas que cortan el Mioceno, como la falla de Tía Juana.

Como se aprecia en la figura 4.6 las fallas mayores se encuentran en las capas eocenas y otras más antiguas, aunque varias de estas fallas se extienden y cortan los sedimentos Oligo-Miocenos; un ejemplo es la gran falla inversa, con 1.000 pies de salto vertical, en el flanco oeste del anticlinal de Pueblo Viejo. Se distinguen dos sistemas de fallamiento: un sistema mayor longitudinal de rumbo noreste y buzamiento alto, y otro sistema transversal de dirección noroeste-sureste.

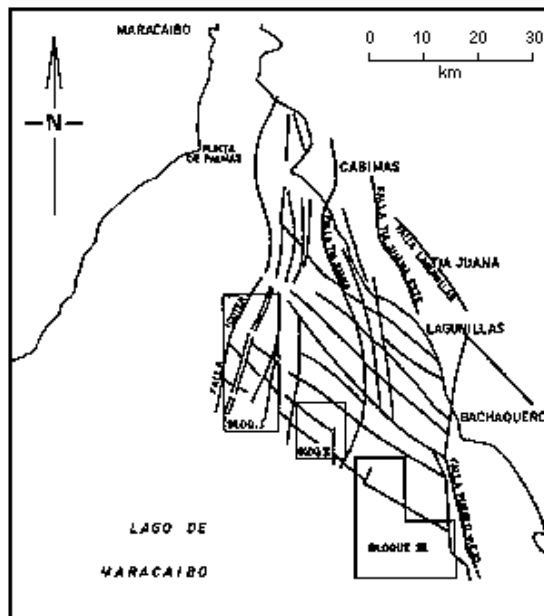


Figura 4. 6 Mapa de fallas del Campo Costanero de Bolívar. [Almarza, 1998]

Yacimientos del Campo

Bernys (1997) explica que en la zona terrestre se encuentran los campos de Cabimas, Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero que producen crudo pesado proveniente de las formaciones Lagunillas y La Rosa de edad Mioceno por encima de la discordancia del Eoceno(ver Figura 4.7).

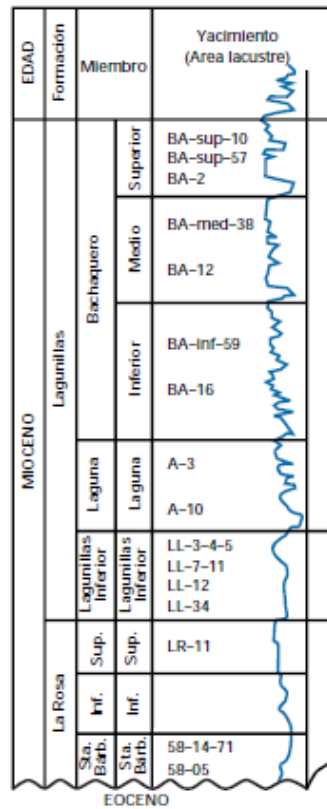


Figura 4. 7 Nomenclatura estratigráfica de los yacimientos del Mioceno-Costa del Distrito de Bolívar. [WEC, 1997]

Almarza (1998) agrega que la producción se obtiene de arenas miocenas de las formaciones Icotea, Santa Bárbara, La Rosa y Lagunillas; de los intervalos de arenas "B" y "C" de la Formación Misoa y en los últimos tiempos, petróleo más liviano y mayor rendimiento, de las calizas cretácicas.

El petróleo mioceno del área oriental varía entre 10.5 y 17° API, el de las arenas de Icoatea es de 20° API, el crudo del Eoceno entre 20 y 35° API y el Cretáceo de 35-40° API.

Diagramas mecánicos tipo

El Campo Costanero de Bolívar, es una vasta extensión que posee una diversidad de yacimientos y objetivos para la empresa operadora. Pueden existir diferentes diagramas mecánicos de pozo, de acuerdo a la ubicación del pozo (Cabimas, Tia Juana, Lagunillas o Bachaquero) y la arena que se pretende alcanzar. Por ende se presentarán dos diagramas mecánicos de pozos, uno en el Campo Tia Juana (ver Figura 4.8) y otro en el Campo Lagunillas (ver Figura 4.9).

El primero ubicado en el Campo Tia Juana, tiene como objetivo el yacimiento Lagunillas Inferior Campo Este, ubicado en el miembro Lagunillas Inferior de la formación Lagunillas.

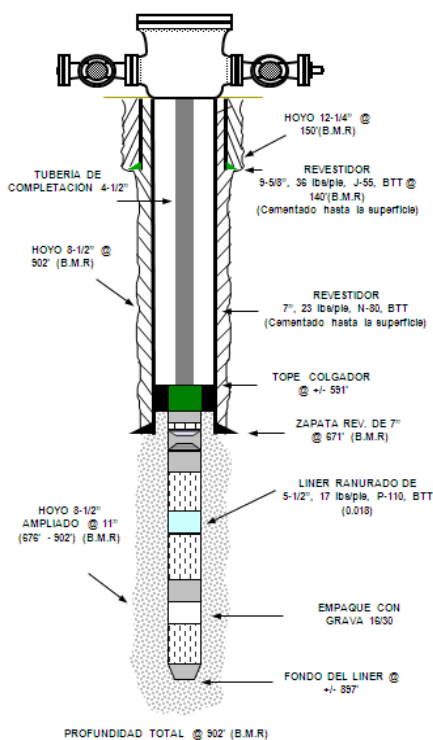


Figura 4. 8 Diagrama Mecánico tipo para pozos en el Campo Tia Juana. [Programa de Ingeniería de Perforación, 2013]

El segundo ubicado en el Campo Lagunillas, tiene como objetivo el yacimiento Laguna Superior Campo, ubicado en el miembro Bachaquero de la formación Lagunillas.

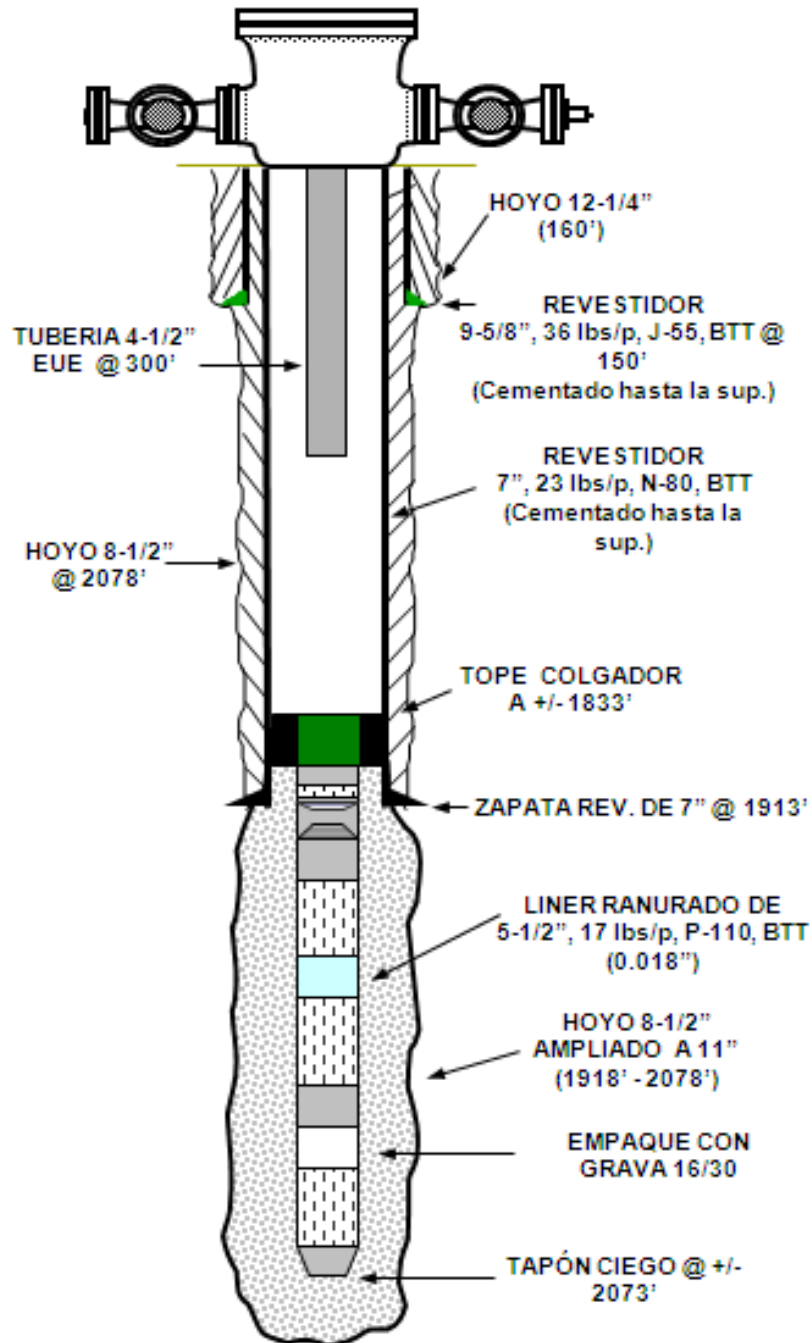


Figura 4. 9 Diagrama Mecánico tipo para pozos del área en estudio, [Programa de Ingeniería de Perforación, 2012]

CAPÍTULO V

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de un polímero como agente controlador de migración de gas en lechadas de cemento. Dicha evaluación, se realizó a través de un conjunto de pruebas y ensayos a nivel de laboratorio (explicadas detalladamente en capítulos anteriores), las cuales permitieron caracterizar físicamente las lechadas de cemento diseñadas y determinar su eficiencia a la hora de prevenir la migración de gas, proveniente de la formación hacia el espacio anular, bajo las condiciones operacionales establecidas.

Básicamente durante esta etapa de la investigación se desea discutir si los resultados obtenidos satisfacen los requerimientos de diseño establecidos por la empresa operadora (cliente), normas API / ISO y por el grupo de ingeniería de la empresa de servicio (Schlumberger).

Por ende, antes de presentar los resultados, es necesario recordar cuales son los requerimientos que se pretenden satisfacer (ver Tabla 5.1 y 5.2).

REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES OPERACIONALES

Tabla 5. 1 Requerimientos para el diseño de las lechadas de cementación. [Sardi, 2015]

REQUERIMIENTOS	
Densidad	14.5 lb/gal
Tiempo de espesamiento	4:00 – 4:30 h:min
Premezclado @90°F	30 min
Pérdida de Filtrado	< 50 ml/30min
Fluido Libre @30°	0

Continuación Tabla 5. 2 Requerimientos para el diseño de las lechadas de cementación. [Sardi, 2015]

REQUERIMIENTOS	
Resistencia a la Compresión (UCA)	≥ 1500 psi @24h
Esfuerzo de Gel Estático (SGSA)	Requerida
Viscosidad Plástica (VP)	>30 Cp
Punto Cedente (Ty)	30-60 lb/100pies ²

Tabla 5. 3 Condiciones operacionales para el diseño de las lechadas de cementación. [Sardi, 2015]

CONDICIONES OPERACIONALES	
Temperatura de superficie: 90°F	Tipo de Trabajo: Rev 7"
Temperatura estática de fondo: 123 °F	Profundidad Medida: 1714 pies
Temperatura circulante de fondo: 97 °F	Profundidad Verdadera: 1714 pies
Tiempo para condiciones: 40 min	Presión de fondo del pozo: 1231 lpc

DISEÑOS DE LAS LECHADAS DE CEMENTACIÓN

Una vez conocidos los requerimientos y las condiciones bajo las cuales iban a ser sometidas las lechadas de cemento para su evaluación, se procedió a recopilar distintos diseños de lechadas de cementación en artículos técnicos de otras latitudes, con el fin de establecer una formulación tipo. Por disponibilidad de cemento, se estableció como primer diseño del proyecto una lechada con cemento clase H. Adicionalmente, con el fin de brindar flexibilidad operacional a la celda de cementación, se realizó el diseño de una lechada con cemento clase B.

El presente estudio busca la manera de reducir el uso de aditivos químicos en estado líquido para las operaciones en tierra y minimizar la preparación de agua de mezcla. Por ende se estableció como parte fundamental del diseño utilizar sólo aditivos químicos en estado sólido que pudieran ser mezclados con el cemento seco, generando un *blend* que brinda flexibilidad operacional y elimina el riesgo de padecer situaciones indeseadas que pueden presentarse al manejar aditivos líquidos mezclados con agua, como son el ataque de

bacterias, la degradación, el envejecimiento y contaminación del sistema durante su manipulación, transporte y posterior uso.

La columna vertebral del diseño es la utilización de un polímero como agente controlador de migración de gas, debido a que la caracterización geológica, geofísica y la experiencia en la explotación del área de estudio, indican una potencial presencia de gas en las formaciones que comprenden la sección intermedia de los pozos, lo cual genera un importante riesgo de migración de este fluido hacia el espacio anular.

Adicionalmente la formulación requiere contar con una concentración de sílica de 43% para las lechadas con cemento H y 45% para las lechadas con cemento B. Esto se debe a la necesidad de evitar el fenómeno de retrogresión del cemento, cuando el mismo sea expuesto a altas temperaturas generadas por la inyección de vapor. Es necesario resaltar que en el Campo Costanero de Bolívar se utiliza la inyección de vapor con el objetivo de mejorar la movilidad del hidrocarburo y de esta manera incrementar el factor de recobro de crudo pesado alojado en este campo.

Se definió la formulación tipo de una lechada con cemento H (ver Tabla 5.3), y se realizó su evaluación y caracterización física. A través de pruebas de laboratorio fueron medidas sus propiedades físicas y comparadas con los requerimientos. Al no cumplir los requerimientos se realizó el cambio en la concentración de algunos aditivos, optimizando de esta manera el diseño. En total se realizó la preparación de cuatro lechadas con cemento tipo H.

El diseño final que cumplió con todos los requerimientos indicados en la Solicitud de Análisis de Laboratorio (SAL), fue el siguiente:

Tabla 5. 4 Formulación definitiva de la lechada con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Función	Concentración	Masa (g/600mL)
CEMENTO H	71.28 % BVOB	464.29
SÍLICA	34 % BWOC	157.86
EXTENDEDOR	10 % BWOC	46.43
ANTIMIGRATORIO	1.1 % BWOC	5.11
DISPERSANTE	0.8 % BWOC	3.71
RETARDADOR	0.2 % BWOC	0.93
ANTIESPUMANTE	0.2 % BWOC	0.93

FASE HÚMEDA (Total = 363.2 g) / **FASE SECA** (Total = 679.2 g) / **VFS** = 38.91%

LEYENDA: BVOB = *By Volume Of Blend* ; BWOC = *By Weight Of Cement* ;

VFS = *Volume fraction of solids*

En la table 5.4 se puede comparar los 4 diseños realizados para las lechadas con cemento clase H, apreciando los cambios sucesivos que se produjeron en su composición y de qué manera esto afecto a cada una de las propiedades evaluadas en el laboratorio.

Tabla 5. 4 Tabla comparativa de las lechadas con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Función	Lechada #1 (%)BWOC	Lechada #2 (%)BWOC	Lechada #3 (%)BWOC	Lechada #4 (%)BWOC
Cemento H	100	100	100	100
Silica	34	34	36.7	34
Extendedor	10	10	7	10
Antimigratorio	1.5	1.5	0.7	1.1
Dispersante	0.2	0.5	0.3	0.8
Retardador	0.2	0.2	0.2	0.2
Antiespumante	0.2	0.2	0.2	0.2
Propiedades				
Reología PV (cP)	-	-	34.92	63.53
Reología Ty (lb/ft ²)	-	-	34.57	49.75
Perdida de Filtrado (ml/30min)	-	-	34	26
Tiempo de Espesamiento (70Bc@h:mm)	-	-	-	4:30
Resistencia a la compresión (UCA)	-	-	-	50 psi @ 4:42:30 500 psi @ 11:05:00 1523 psi@24:47:30
Esfuerzo de Gel Estático (SGSA)	-	-	-	100 Lbf/100ft ² @ 1:36:30 500 Lbf/100ft ² @ 2:08:00 1200 Lbf/100ft ² @ 2:25:00
FMA	-	-	-	Migración = 2.73 atm-ml Perdida de fluido = 9.82 ml

Una vez obtenida la formulación final con cemento clase H, se procedió a sustituir únicamente el mismo, por cemento clase B. Sin embargo el tiempo de espesamiento sobrepasó el requerimiento, lo cual, obligó a realizar una optimización de la formulación. En total se realizó la preparación de tres lechadas con cemento tipo B, expuestas en la Tabla 5.5.

Tabla 5. 5 Tabla comparativa de las lechadas con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Función	Lechada #1 (%)BWOC	Lechada #2 (%)BWOC	Lechada #3 (%)BWOC
Cemento H	100	100	100
Silica	36	36	36
Extendedor	10	10	10
Antimigratorio	1.1	1.1	1.1
Dispersante	0.8	0.8	0.8
Retardador	0.2	-	0.1
Antiespumante	0.2	0.2	0.2
Propiedades			
Reología PV (cP)	66.69	-	67.66
Reología Ty (lb/ft ²)	43.42	-	64.78
Perdida de Filtrado (ml/30min)	22	-	22
Tiempo de Espesamiento (70 Bc @h:mm)	6:10	3:47	4:07
Resistencia a la compresión (UCA)	-	-	50 psi @ 6:29:30 500 psi @ 12:13:30 1674 psi @ 27:04:00
Esfuerzo de Gel Estático (SGSA)	-	-	100 Lbf/100ft ² @ 1:14:30 500 Lbf/100ft ² @ 1:43:30 1200 Lbf/100ft ² @ 2:00:00

El diseño final de la lechada con cemento clase B que cumplió con todos los requerimientos indicados en la Solicitud de Análisis de Laboratorio (SAL), es presentado en la Tabla 5.6:

Tabla 5. 6 Formulación definitiva de la lechada con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Función	Concentración	Masa (g/600mL)
CEMENTO B	70.1 % BVOB	458.56
SÍLICA	36 % BWOC	157.86
EXTENDEDOR	10 % BWOC	45.86
ANTIMIGRATORIO	1.1 % BWOC	5.04
DISPERSANTE	0.8 % BWOC	3.67
RETARDADOR	0.1 % BWOC	0.46
ANTIESPUMANTE	0.2 % BWOC	0.98

FASE HÚMEDA (Total = 362.8 g) / **FASE SECA** (Total = 679.6 g) / **VFS** =39.0%

LEYENDA: BVOB = *By Volume Of Blend* ; BWOC = *By Weight Of Cement* ;

VFS = *Volume fraction of solids*

CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO PETROLERO

La empresa de servicios, somete al cemento manufacturado por Venezolanas de Cemento S.A.C.A a diferentes pruebas de control de calidad, con el fin de determinar si este producto es apto para su aplicación en pozos petroleros, y cuenta con las propiedades y requerimientos establecidos por la norma ISO10426-2 / API 10A.

En la tabla 3.2, expuesta en el capítulo III se indicaron cuáles son los requerimientos que el cemento H y B deben cumplir. Por ende en la presente sección se exponen los resultados de las pruebas de control de calidad realizadas por el personal de laboratorio a los cementos antes mencionados (densidad, fluido libre, tiempo de espesamiento, resistencia a la compresión) y se comparan dichos resultados, con los requerimientos establecidos.

Resultados del control de calidad del cemento clase H

En la Figura 5.1 se concentran los resultados de las pruebas de control de calidad efectuadas a la lechada con cemento clase H.

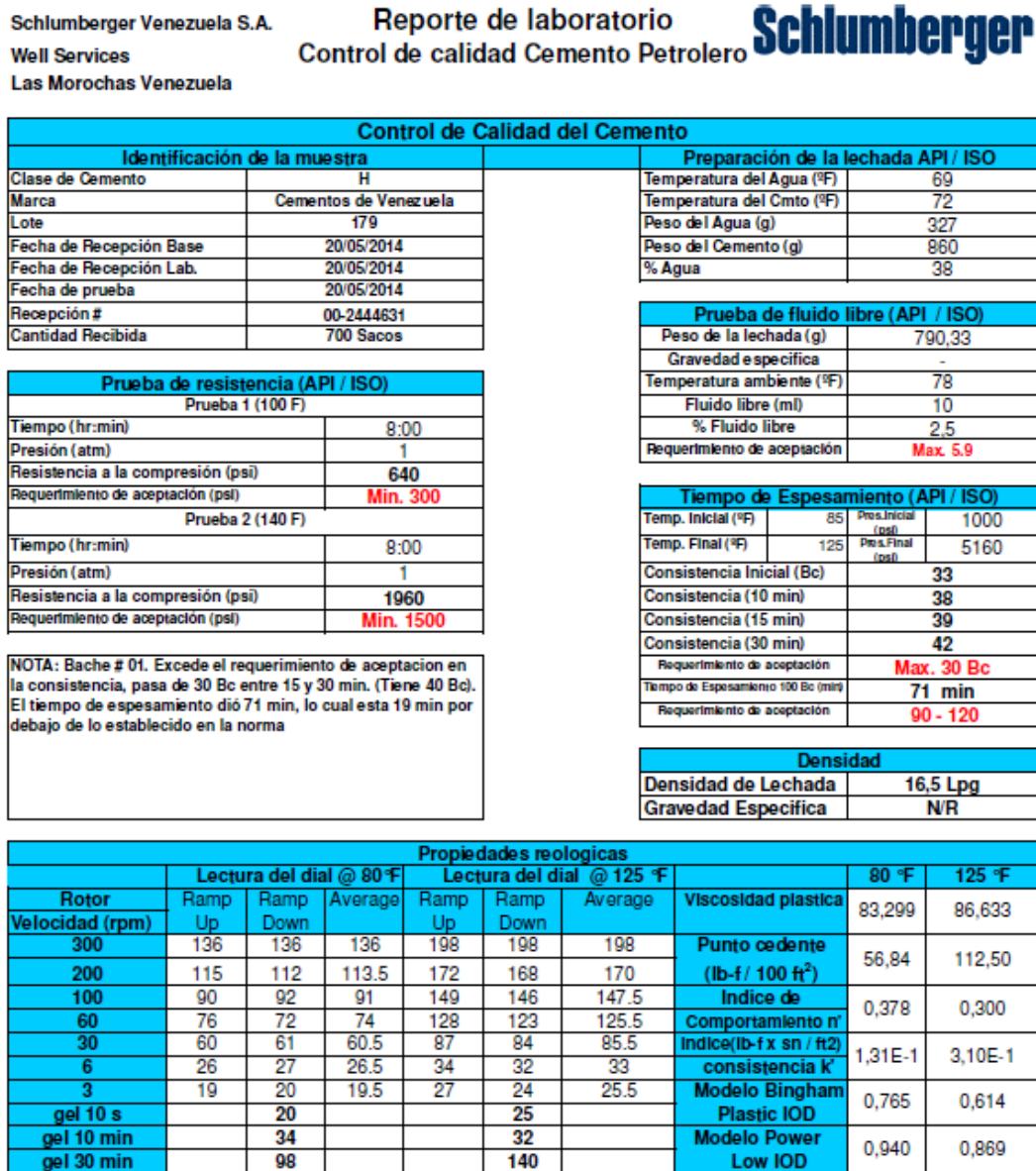


Figura 5. 1 Reporte de Laboratorio, control de calidad del cemento petrolero H. [Sardi, 2015]

Como se observa en el reporte de control de calidad del cemento petrolero, la prueba de fluido libre realizada al lote 179 de cemento H, arrojó un valor de fluido libre de 10 ml. Utilizando la ecuación 3.2, se pudo calcular el porcentaje de fluido libre de la

muestra, el cual tuvo un valor de 2,5 % y se ubicó por debajo del límite establecido por las normas de 5,9 %.

Con respecto al tiempo de espesamiento, la norma establece que para cementos clase H, la lechada debe poseer un valor de consistencia entre los 15 y 30 minutos menor a 30 Bc y alcanzar un valor de consistencia de 100 Bc, entre los 90 y 120 minutos. Sin embargo, como se observa en la gráfica de la prueba de tiempo de bombeabilidad (ver Figura 5.2) y en reporte de laboratorio, la lechada de cementación excede el valor máximo de la consistencia requerida entre los 15 y 30 min al presentar un valor de 42 Bc. Aunado a esto, la lechada alcanzó un valor de consistencia de 100 Bc a los 71 minutos de haber comenzado la prueba, 19 minutos por debajo del establecido en la norma.

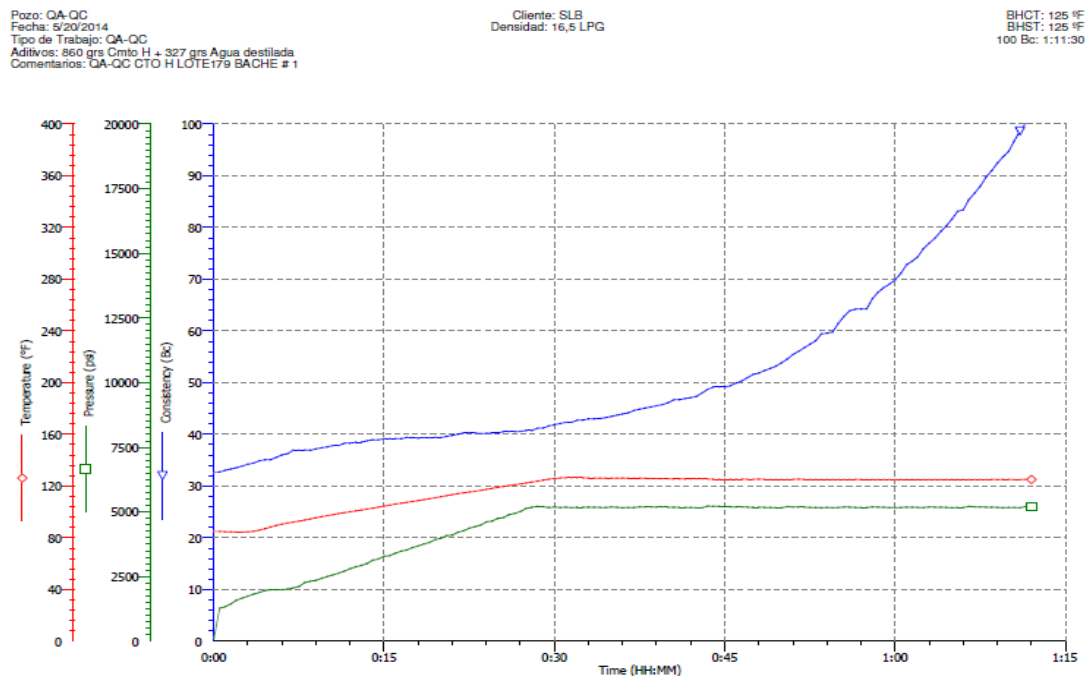


Figura 5. 2 Curva del tiempo de espesamiento de la lechada con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Por ende, se notificó al departamento de ingeniería sobre los resultados de control de calidad fuera de especificación, obtenidos con respecto al tiempo de espesamiento de la lechada con cemento clase H.

Se realizaron dos pruebas destructivas de resistencia a la compresión. La primera, en la cual 3 cubos fueron expuestos a un periodo de curado durante 8 horas a 100 °F, antes de ser llevados a la prensa mecánica. Dicha prueba arrojó un valor promedio de resistencia a la compresión de 640 psi, teniendo como valor mínimo establecido por la norma 300 psi. En la segunda prueba, 3 cubos fueron expuestos a la temperatura de 140 °F durante el mismo periodo de tiempo que la primera prueba, y se obtuvo un valor promedio de resistencia a la compresión de 1960 psi, es decir, 460 psi por encima del valor mínimo requerido por la norma (1500 psi). Por consiguiente, la lechada de cementación con cemento clase H, cumple con los requerimientos establecidos en la norma.

Resultados del control de calidad del cemento clase B

La lechada con cemento clase B, obtuvo valores de consistencia dentro de los requerimientos establecidos en las normas ISO10426-2 / API 10-A, al obtener un valor máximo de consistencia de 19 Bc (< 30 Bc) entre los 15 y 30 minutos de transcurrida la prueba, y alcanzar los 100 Bc a los 160 minutos (> 90 minutos) (ver Figura 5.3).

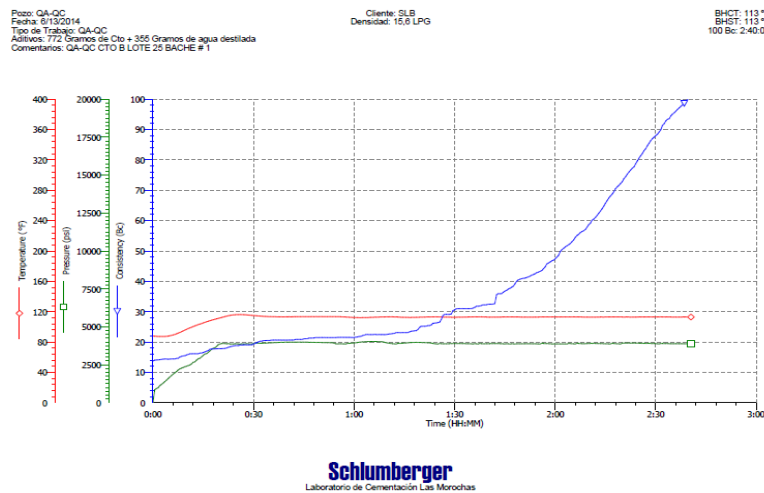


Figura 5. 3 Curva del tiempo de espesamiento de la lechada con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Por otro lado, la lechada con cemento clase B obtuvo valores de resistencia a la compresión, por encima de los mínimos establecidos en la norma (200 psi para la

primera prueba y 1500 psi para la segunda prueba). En la primera prueba, donde los cubos antes de ser llevados a la prensa mecánica fueron sometidos a una temperatura de 100 °F durante un periodo de tiempo de 8 horas, arrojó como valor promedio de resistencia a la compresión 560 psi. La segunda prueba, consistió en la exposición de los cubos a una temperatura de 100 °F durante 24 horas, y posteriormente al ser llevados a la prensa mecánica y efectuar el ensayo destructivo de las mismas, se obtuvo un valor promedio de resistencia a la compresión de 1880 psi.

Los resultados de los ensayos de control de calidad e información de interés del cemento B son concentrados en reporte de control de calidad del cemento petrolero B (ver figura 5.4).


Schlumberger Venezuela S.A. Well Services Las Morochas Venezuela		Reporte de laboratorio Control de calidad Cemento Petrolero							
Control de Calidad del Cemento									
Identificación de la muestra			Preparación de la lechada API / ISO						
Clase de Cemento	B		Temperatura del Agua (°F)	68					
Marca	Cementos de Venezuela		Temperatura del Cmto (°F)	72					
Lote	25		Peso del Agua (g)	355 ± 0.5					
Fecha de Recepción Base	13/06/2014		Peso del Cemento (g)	772 ± 0.5					
Fecha de Recepción Lab.	13/06/2014		% Agua	46					
Fecha de prueba	13/06/2014								
Recepción #	00-2854413								
Cantidad Recibida	760 Sacos								
Prueba de resistencia (API / ISO)									
Prueba 1 (100 F)									
Tiempo (hr:min)	8:00								
Presión (atm)	1								
Resistencia a la compresión (psi)	560								
Requerimiento de aceptación (psi)	Min. 200								
Prueba 2 (100 F)									
Tiempo (hr:min)	24:00								
Presión (atm)	1								
Resistencia a la compresión (psi)	1880								
Requerimiento de aceptación (psi)	Min. 1500								
NOTA: Consistencia maxima entre 15-30 BC= 18 BC. Bache # 01									
Prueba de fluido libre (API / ISO)									
Peso de la lechada (g)	-								
Gravedad específica	-								
Temperatura ambiente (°F)	-								
Fluido libre (ml)	-								
% Fluido libre	-								
Requerimiento de aceptación	-								
Tiempo de Espesamiento (API / ISO)									
Temp. Inicial (°F)	88	Pres. Inicial (atm)	750						
Temp. Final (°F)	113	Pres. Final (atm)	3870						
Consistencia Inicial (Bc)	14								
Consistencia (10 min)	16								
Consistencia (15 min)	17								
Consistencia (30 min)	19								
Requerimiento de aceptación	Max. 30 Bc								
Tiempo de Espesamiento 100 BC (min)	160 min								
Requerimiento de aceptación	> 90								
Densidad									
Densidad de Lechada	15.6								
Gravedad Especifica	N/R								
Propiedades reologicas									
Rotor	Lectura del di 80 °F			Lectura del dial 113			Viscosidad plastica	80 °F	113 °F
	Ramp Up	Ramp Down	Average	Ramp Up	Ramp Down	Average		37,730	39,669
Velocidad (rpm)							Punto cedente (lb-f / 100 ft ²)	45,65	49,39
300	82	82	82	90	90	90	Indice de	0,279	0,328
200	71	72	71.5	73	74	73.5	Comportamiento n'	1,46E-1	1,18E-1
100	60	57	58.5	64	65	64.5	consistencia k'	0,716	0,663
60	54	55	54.5	57	56	56.5	Modelo Bingham Plastic IOD	0,905	0,902
30	47	46	46.5	45	43	44	Modelo Power Low IOD		
6	21	20	20.5	18	16	17			
3	15	14	14.5	13	14	13.5			
gel 10 s		16			15				
gel 10 min		27			20				
gel 30 min		64			68				

Figura 5. 4 Reporte de Laboratorio, control de calidad del cemento petrolero B. [Sardi, 2015]

Por ende, pudimos concluir que el cemento clase B del lote 25 cumple con los parámetros de control de calidad establecidos en las normas antes mencionadas.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

En esta etapa del capítulo, se exponen todos los resultados obtenidos al realizar las distintas pruebas que comprenden la evaluación física de una lechada de cementación, como son: medición de densidad, medición de los parámetros reológicos, prueba de pérdida de filtrado, prueba de fluido libre, prueba de sedimentación, medición del tiempo de espesamiento, prueba de resistencia a la compresión no destructiva y la medición del desarrollo del esfuerzo de gel estático.

Evaluación de las propiedades físicas de la lechada antimigratoria con cemento clase H

Se realizaron las pruebas antes mencionadas bajo las condiciones operacionales establecidas (tabla 5.2) a la lechada de cementación resultante de la formulación definitiva (tabla 5.3). Los resultados obtenidos en los distintos ensayos, se presentan a continuación:

Medición de densidad

En base a los requerimientos del cliente, se realizó el diseño teórico de una lechada que alcanzara una densidad de $14,5 \text{ lb/gal} \pm 0,1 \text{ lb/gal}$ (mínima apreciación del instrumento). En la práctica, una vez realizado el cálculo de masa, el pesaje de aditivos, la mezcla de la lechada y la medición en una balanza presurizada, se obtuvo un valor de densidad de $14,6 \text{ lb/gal}$, lo cual indica que la lechada cumple con el valor de densidad requerido.

Reología

En la Tabla 5.7, se aprecian las medidas realizadas en el laboratorio, con el fin de determinar la manera en que la lechada de cementación va a fluir bajo diversas condiciones como son: temperatura, presión y esfuerzo de corte.

Para lograr una operación eficiente, se requiere que la lechada de cementación, posea un punto cedente (T_y) entre 30 y 60 lb/100pies² y una viscosidad plástica (VP) mayor a 30 Cp. Esto permite respetar la jerarquización de los fluidos bombeados dentro del pozo y asegurar una remoción eficiente de los fluidos de perforación usados comúnmente en el área de estudio.

Tabla 5. 7 Parámetros reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Velocidades (rpm)	Promedio de Lecturas	γ [1/s]	τ [lbf/100pies ²]	log [γ]	log [τ]
3	30,5	5,12	32,54	0,709	1,512
6	37	10,23	39,48	1,010	1,596
30	53,5	51,15	57,08	1,709	1,757
60	63,5	102,30	67,75	2,010	1,831
100	74,5	170,50	79,49	2,232	1,900
200	94	341,00	100,30	2,533	2,001
300	111	511,50	118,44	2,709	2,073

Con el objetivo de describir la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte que presenta la lechada de cementación, se realizó la caracterización reológica de la misma, a través de los modelos reológicos: Plástico de Bingham y Ley de Potencia.

En la Tabla 5.8, se expresan los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del Modelo Plástico de Bingham y los valores del índice de consistencia (k) y del índice de ley de potencia (n), del Modelo de Ley de Potencia. Al observar los valores reológicos obtenidos, podemos concluir que la lechada de cementación antimigratoria con cemento clase H, cubre los requerimientos reológicos.

Tabla 5. 8 Valores de los modelos reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100pies ²]	k [lbfsn/pies ²]	n	Coef. correlación
Plástico de Bingham	75,93	43,72	-	-	,9334
Ley de Potencia	-	-	20,45	0,2707	0,9912

Al realizar el análisis de la representación del comportamiento de la lechada por los modelos reológicos evaluados, encontramos que el modelo reológico de Ley de Potencia presenta un coeficiente de correlación con los datos medidos en el laboratorio de 0,9912. Esto indica que dicho modelo, es el que mejor describe el cambio del esfuerzo de corte que sufre la lechada, al variar la velocidad de corte (ver Figura 5.5).

Sin embargo, esta conclusión se puede apreciar de manera gráfica, al observar el solapamiento a lo largo de la variación de la tasa de corte, entre la curva azul, que representa los valores de esfuerzo de corte registrados en el laboratorio y la curva verde, que representa los valores de esfuerzo de corte calculados a través de la ecuación del modelo de Ley de Potencia.

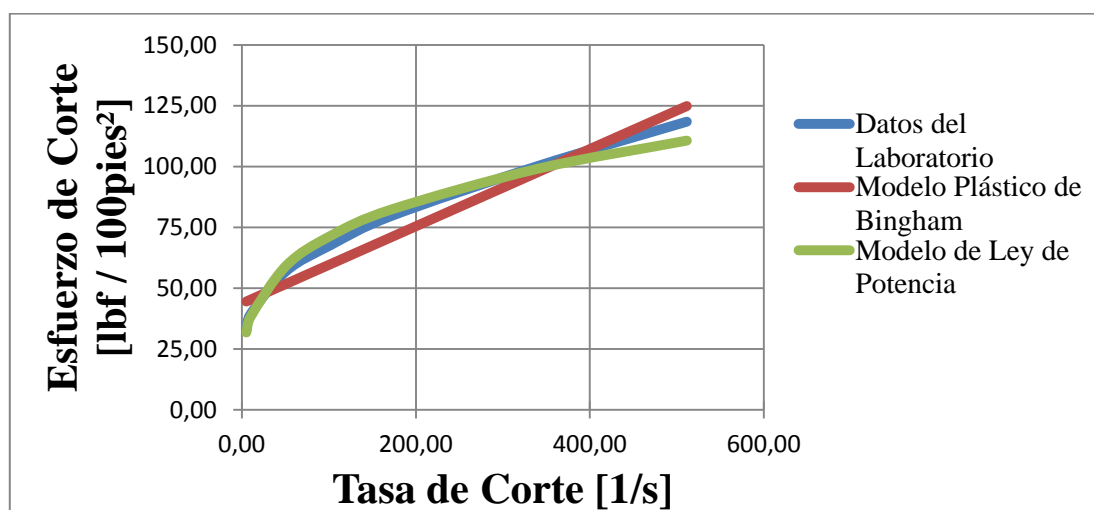


Figura 5. 5 Gráfica de modelos reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Perdida de filtrado

Durante la prueba de perdida de filtrado, se obtuvo un volumen de filtrado de 13 ml, el cual al aplicar la ecuación 3.1 arrojó un volumen de perdida de filtrado de 26 ml/30min. Para el diseño de lechadas antimigratorias que serán aplicadas en el área de estudio, se requieren lechadas que posean un volumen de filtrado menor a 50 ml/30 min. Por ende el diseño planteado en este estudio con cemento de clase H, cumple en este aspecto con los requerimientos de la empresa operadora.

Prueba de fluido libre

Al ser colocada la lechada de cementación en un cilindro graduado de 250 ml, con una inclinación de 30°, durante un periodo de dos horas, no se observó la separación de volumen de fluido libre de la lechada. Por ende, se expresa que la lechada de cementación tiene 0 % de fluido libre y este resultado ratifica que no existe una segregación de las partículas de los distintos aditivos y es idóneo para evitar la creación de canales preferenciales a la migración de fluidos.

Prueba de sedimentación

Con el fin de determinar si existía o no una segregación de partículas o la sedimentación de ellas, se procedió a correr una prueba de sedimentación, con el objetivo de evaluar la homogeneidad de la lechada una vez fraguada.

El porcentaje máximo de sedimentación establecido por la norma API RP10B-2 es de 5%.

Como se puede observar en la Tabla 5.9, la densidad promedio de los 4 segmentos originados en la prueba de sedimentación es 14,452 lb/gal y al compararlo con la densidad teórica de 14,5 lb/gal y calcular a través de la ecuación 3.7 el porcentaje de sedimentación obtenemos un valor de 0,33%. Este resultado es de suma importancia, dado que garantiza la transmisión por parte de la lechada de cementación, de una presión hidrostática uniforme a lo largo de toda la columna de cemento.

Tabla 5. 9 Resultados de la prueba de sedimentación en lechada con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Segmentos	Peso	Peso desplazado	Gravedad Específica	Densidad
Tope	29,22	16,90	1,729	14,403
1	28,49	16,47	1,730	14,409
2	27,09	15,59	1,738	14,475
Fondo	30,82	17,68	1,743	14,521
Promedio	28,91	16,66	1,735	14,452

Prueba del tiempo de espesamiento

Al revisar los datos suministrados por la empresa operadora (necesidades y requerimientos), y las condiciones operacionales de 8 pozos ubicados en el área de estudio, se estableció como meta del diseño alcanzar un tiempo de espesamiento entre 4 horas y 4 horas y 30 minutos.

Como se observa en la gráfica de tiempo de espesamiento, la lechada alcanzó a las 5 horas una consistencia de 70 Bc, el cual se considera el valor máximo de consistencia bombeable. Esta gráfica incluye un periodo de 30 minutos que simula la exposición de la lechada a condiciones atmosféricas (14 lpc y 90°F) durante el proceso en superficie de premezclado. Por ende al restarle el tiempo de premezclado (30 minutos) al tiempo en el cual la lechada alcanza una consistencia de 70 Bc (5 horas), obtenemos un tiempo de espesamiento de 4 horas y 30 minutos (ver Figura 5.6).

También podemos observar en la gráfica, la realización de una parada de una duración de 10 minutos a los 80 minutos de haber iniciado la prueba, con el fin de determinar el comportamiento de la lechada, al ser detenido el bombeo de la misma por cualquier circunstancia operacional (soltar un tapón, parado repentino de las bombas, etc). Una vez transcurrido los 10 minutos de parada y reanudando el bombeo

es de vital importancia observar que no se registran altos valores de consistencia, lo cual es un indicativo que le lechada luego de estar en reposo, no presenta mayor resistencia a continuar con el proceso de bombeo y esta no genera excesivos geles.

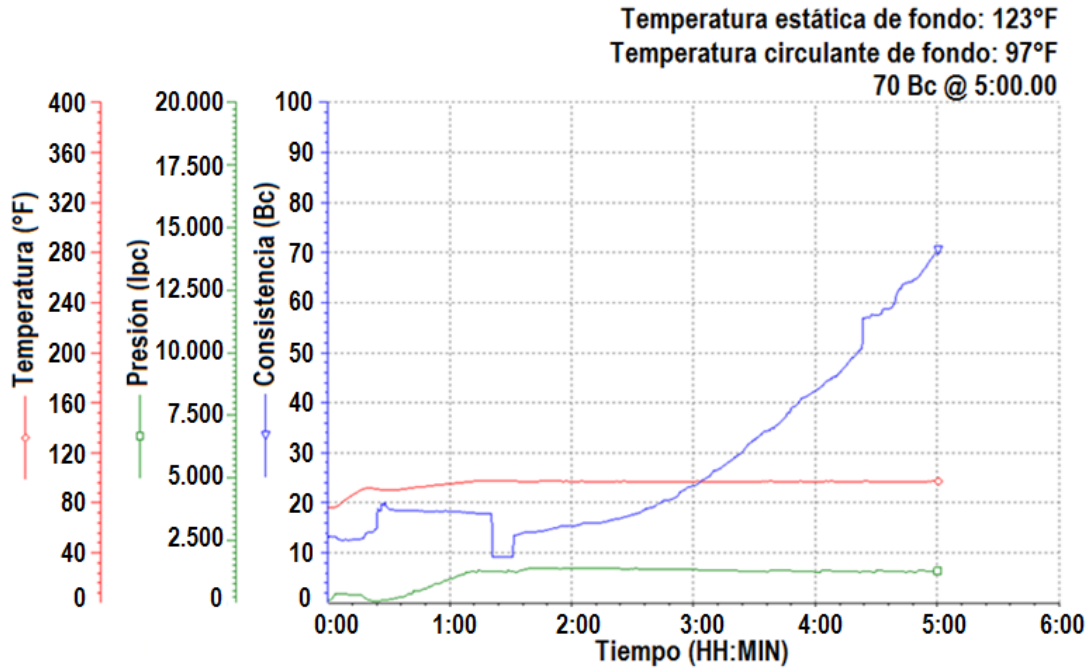


Figura 5. 6 Curva del tiempo de espesamiento de la lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Resistencia a la compresión: prueba sónica no destructiva

Se realizó una prueba sónica no destructiva, la cual consistió en medir el tiempo de transito de una onda ultrasónica a través de la matriz de cemento a condiciones estáticas. Dicha medición a través de una correlación realizada por el software del equipo utilizado (Analizador de cemento ultrasónico), arroja un valor de resistencia a la compresión. Se puede observar en la Figura 5.7, que la lechada de cementación alcanza una resistencia a la compresión de 1523 lpc a las 24 horas de haber iniciado la prueba. Este valor es 23 lpc superior al requerido por el cliente en este periodo de tiempo, lo cual satisface las necesidades de la empresa operadora de utilizar una lechada que genere una resistencia a la compresión que permita la continuidad de las operaciones de perforación en un lapso de tiempo menor.

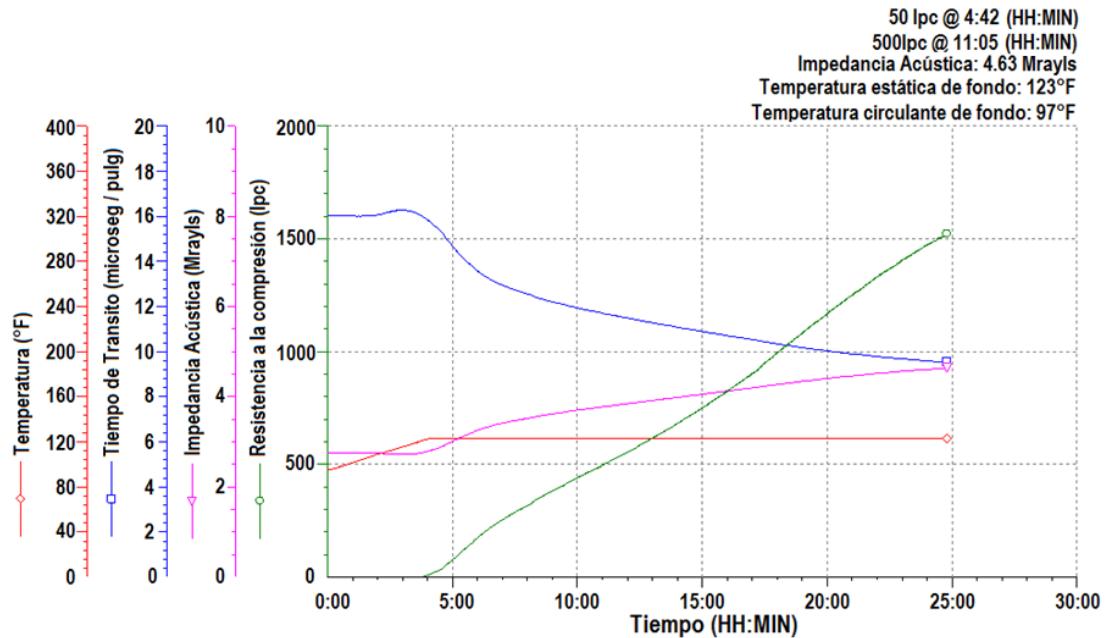


Figura 5. 7 Gráfica de resistencia a la compresión de la lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

Medición del desarrollo del esfuerzo de gel estático

En lechadas antimigratorias, esta prueba es de vital importancia y nos permite cuantificar el desarrollo del esfuerzo de gel estático por parte de la lechada de cementación. El periodo de tiempo comprendido en el cual la lechada genera un esfuerzo de gel entre 100 lbf/100 pies² y 500 lbf/100 pies², es conocido como el tiempo de transición. Este es la medida del tiempo entre el cual la lechada de cementación cambia de estado líquido a sólido bajo las condiciones estáticas del pozo. Como podemos observar en la gráfica (ver Figura 5.8), el tiempo de transición de la lechada es cercano a los 32 minutos. A pesar que la norma no establece un tiempo de transición mínimo, la lógica teórica establece que mientras más corto sea este tiempo, menor va a ser la exposición de la lechada de cementación en estado líquido al frente de gas proveniente de la formación. A su vez la experiencia en el área y los requerimientos del cliente, establecen como tiempos de transito aceptables aquellos cercanos a los 30 minutos.

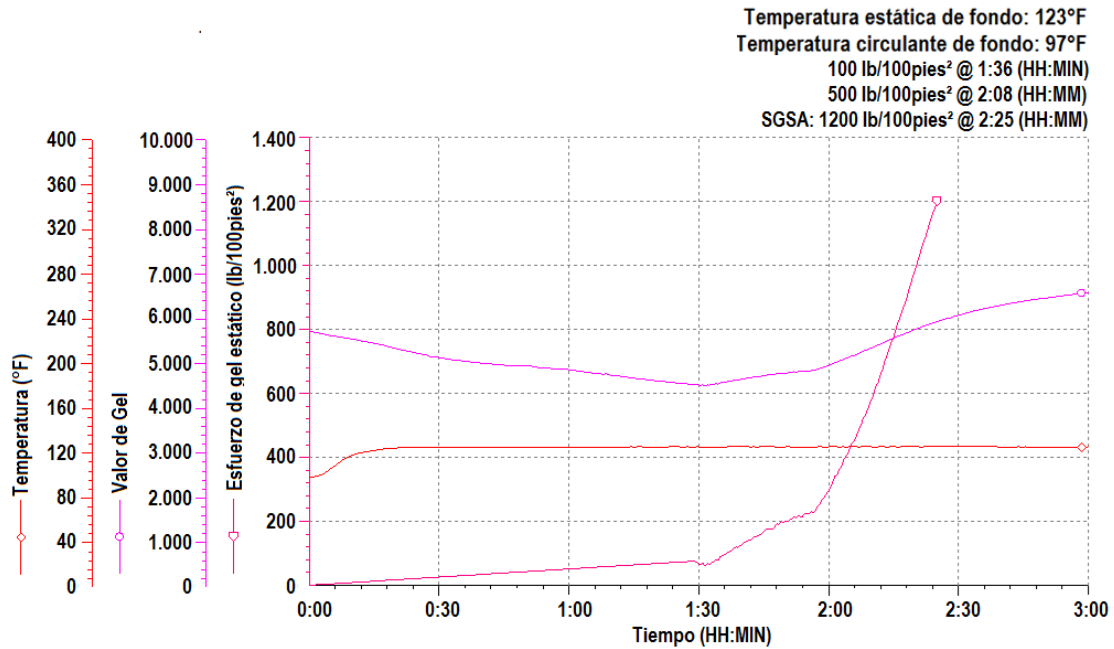


Figura 5. 8 Desarrollo del esfuerzo de gel estático de la lechada antimigratoria con cemento clase H. [Sardi, 2015]

En conclusión podemos observar que el diseño de la lechada de cementación antimigratoria con cemento clase H, posee un desarrollo eficiente del esfuerzo de gel estático, que deriva en la generación de un tiempo de transito corto, el cual previene la migración de gas durante la etapa de mayor vulnerabilidad de la lechada de cementación, es decir, cuando esta se encuentra en estado líquido.

Evaluación de las propiedades físicas de la lechada antimigratoria con cemento clase B

Medición de densidad

En base a los requerimientos del cliente, se realizó el diseño teórico de una lechada que alcanzara una densidad de 14,5 lb/gal \pm 0,1 lb/gal (mínima apreciación del instrumento). En la práctica, una vez realizado el cálculo de masa, el pesaje de aditivos, la mezcla de la lechada y la medición en una balanza presurizada, se obtuvo un valor de densidad de 14,5 lb/gal, lo cual indica que la lechada cumple con el valor de densidad requerido.

Reología

Con la finalidad de determinar, la manera en que la lechada de cementación va a fluir bajo diversas condiciones (temperatura, presión y esfuerzo de corte), se realizó la medición del esfuerzo de corte que sufre la lechada de cementación a distintas velocidades. Los datos obtenidos en el laboratorio se presentan en la Tabla 5.10:

Tabla 5. 10 Parámetros reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Velocidades (rpm)	Promedio de Lecturas	$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [lbf/100pies ²]	log [$\dot{\gamma}$]	log [τ]
3	30,5	5,12	32,54	0,709	1,512
6	37	10,23	39,48	1,010	1,596
30	53,5	51,15	57,08	1,709	1,757
60	63,5	102,30	67,75	2,010	1,831
100	74,5	170,50	79,49	2,232	1,900
200	94	341,00	100,30	2,533	2,001
300	111	511,50	118,44	2,709	2,073

En la siguiente Tabla 5.11, se expresan los valores obtenidos de viscosidad plástica y punto cedente, característicos del Modelo Plástico de Bingham y los valores del índice de consistencia (k) y del índice de ley de potencia (n), que conforman el Modelo de Ley de Potencia.

Tabla 5. 11 Valores de los modelos reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Modelo reológico	μ [cP]	τ_0 [lbf/100pies ²]	k [lbfsn/pies ²]	n	Coef. correlación
Plástico de Bingham	80,43	59,28	-	-	0,923
Ley de Potencia	-	-	31,85	0,2238	0,966

Al observar los valores reológicos obtenidos, podemos concluir que la lechada de cementación antimigratoria con cemento clase B, cubre los requerimientos

reológicos. Esto permite respetar la jerarquización de los fluidos bombeados dentro del pozo y asegurar una remoción eficiente de los fluidos de perforación usados comúnmente en el área de estudio. Al realizar el análisis de la representación del comportamiento de la lechada por los modelos reológicos evaluados, encontramos que el modelo reológico de Ley de Potencia presenta un coeficiente de correlación con los datos medidos en el laboratorio de 0,966. Esto indica que dicho modelo, es el que mejor describe el cambio del esfuerzo de corte que sufre la lechada, al variar la velocidad de corte.

Sin embargo, esta conclusión se puede apreciar de manera gráfica, al observar el solapamiento a lo largo de la variación de la tasa de corte, entre la curva azul, que representa los valores de esfuerzo de corte registrados en el laboratorio y la curva verde, que representa los valores de esfuerzo de corte calculados a través de la ecuación del modelo de Ley de Potencia (ver Figura 5.9).

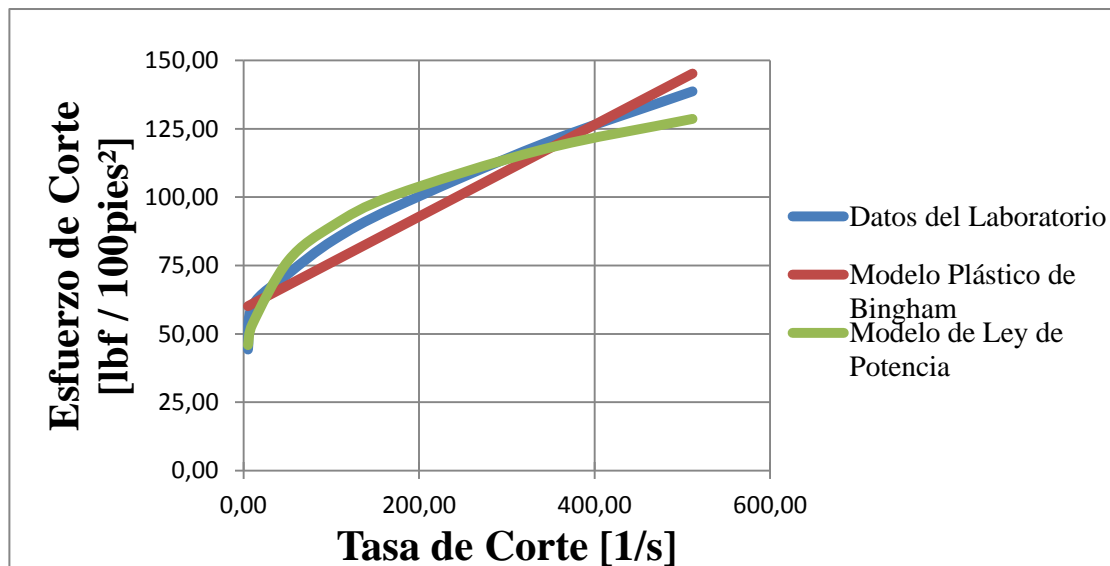


Figura 5. 9 Gráfica de modelos reológicos de la lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015].

Perdida de filtrado

Durante la prueba de pérdida de filtrado, se obtuvo un volumen de filtrado de 11 ml, el cual al aplicar la Ecuación (3.1) arrojó un volumen de pérdida de filtrado de 22

ml/30min. Para el diseño de lechadas antimigratorias que serán aplicadas en el área de estudio, se requieren lechadas que posean un volumen de filtrado menor a 50 ml/30 min. Por ende el diseño planteado en este estudio con cemento de clase B, cumple en este aspecto con los requerimientos de la empresa operadora.

Prueba de fluido libre

Al ser colocada la lechada de cementación en un cilindro graduado de 250 ml, con una inclinación de 30°, durante un periodo de dos horas, no se observó la separación de volumen de fluido libre de la lechada. Por ende, se expresa que la lechada de cementación tiene 0 % de fluido libre y este resultado ratifica que no existe una separación de la fase acuosa de la lechada de cementación, lo cual es idóneo para prevenir la creación de canales preferenciales a la migración de fluidos y el la perdida de eficiencia de las propiedades mecánicas.

Prueba de sedimentación

Como se puede observar en la Tabla 5.12, la densidad promedio de los 4 segmentos originados en la prueba de sedimentación es 14,206 lb/gal y al compararlo con la densidad teórica de 14,5 lb/gal y calcular a través de la ecuación 3.7 el porcentaje de sedimentación obtenemos un valor de 2,03 %.

Tabla 5. 12 Resultados de la prueba de sedimentación en lechada con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Segmentos	Peso	Peso desplazado	Gravedad Específica	Densidad
Tope	26,48	15,70	1,687	14,050
1	26,92	15,94	1,689	14,068
2	27,92	16,08	1,736	14,464
Fondo	28,16	16,47	1,710	14,242
Promedio	27,37	16,05	1,705	14,206

Este resultado es inferior al límite establecido en la norma API RP10B-2 de 5% y es de suma importancia, dado que garantiza la transmisión por parte de la lechada de cementación, de una presión hidrostática uniforme a lo largo de toda la columna de cemento.

Prueba del tiempo de espesamiento

Como se puede apreciar en la Figura 5.10, la lechada antimigratoria formulada con cemento clase B, alcanza un valor de consistencia de 70 Bc cercano a las 4 horas y 38 minutos. Esta gráfica incluye un periodo de 30 minutos que simula la exposición de la lechada a condiciones atmosféricas (14 lpc y 90°F) durante el proceso en superficie de premezclado. Por ende al restarle el tiempo de premezclado (30 minutos) al tiempo en el cual la lechada alcanza una consistencia de 70 Bc (4 horas y 38 minutos), obtenemos un tiempo de espesamiento de 4 horas y 8 minutos.

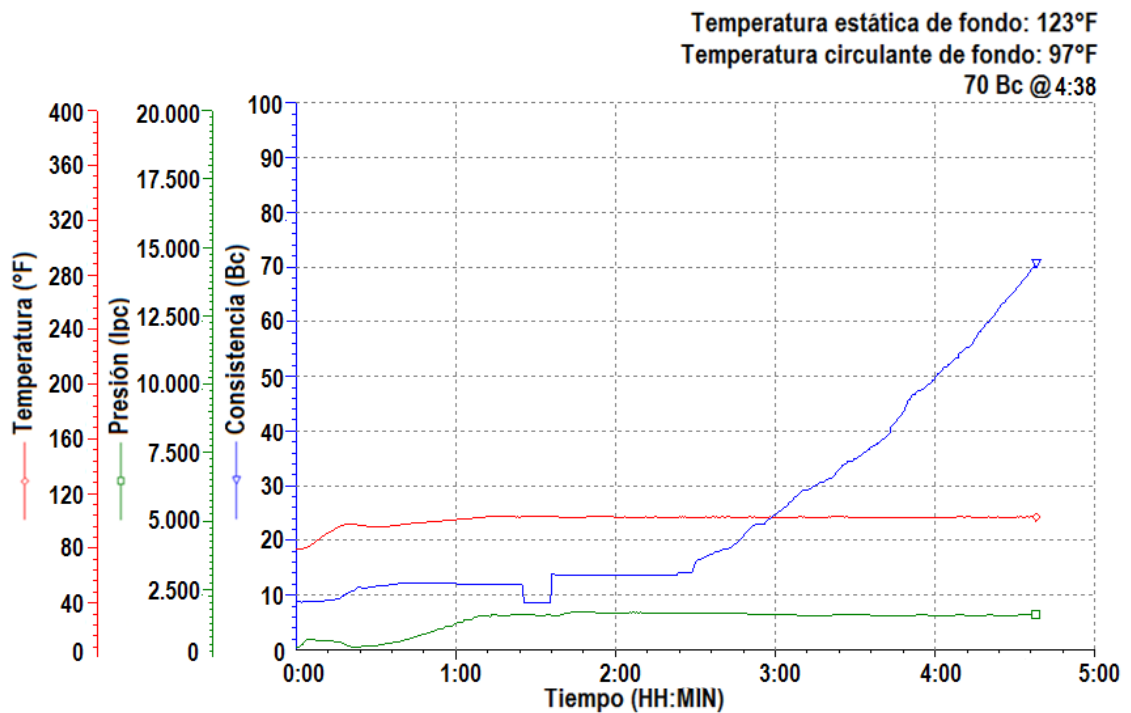


Figura 5. 10 Curva del tiempo de espesamiento de la lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015]

También podemos observar en la gráfica, la realización de una parada de una duración de 10 minutos a los 80 minutos de haber iniciado la prueba, con el fin de

determinar el comportamiento de la lechada, al ser detenido el bombeo de la misma por cualquier circunstancia operacional (soltar un tapón, parado repentino de las bombas, etc). Una vez transcurrido los 10 minutos de parada y reanudando el bombeo es de vital importancia observar que no se registran altos valores de consistencia, lo cual es un indicativo que le lechada luego de estar en reposo, no presenta mayor resistencia a continuar con el proceso de bombeo y esta no genera excesivos geles.

Resistencia a la compresión: prueba sónica no destructiva

Con respecto al desarrollo de resistencia a la compresión de la lechada antimigratoria con cemento clase B, podemos apreciar que la misma genera un valor de resistencia de 50 lpc en un periodo de tiempo de 6 horas y 30 minutos y alcanza un valor de 500 lpc a las 12 horas con 13 minutos.

A través de esta prueba se logró registrar el cumplimiento del requerimiento por parte de la lechada de cementación, al generar una resistencia a la compresión cercana a las 1500 lpc al transcurrir 24 horas de haber comenzado la prueba. Al detener la prueba se obtuvo un valor final de 1674 lpc al transcurrir 27 horas y 4 minutos.

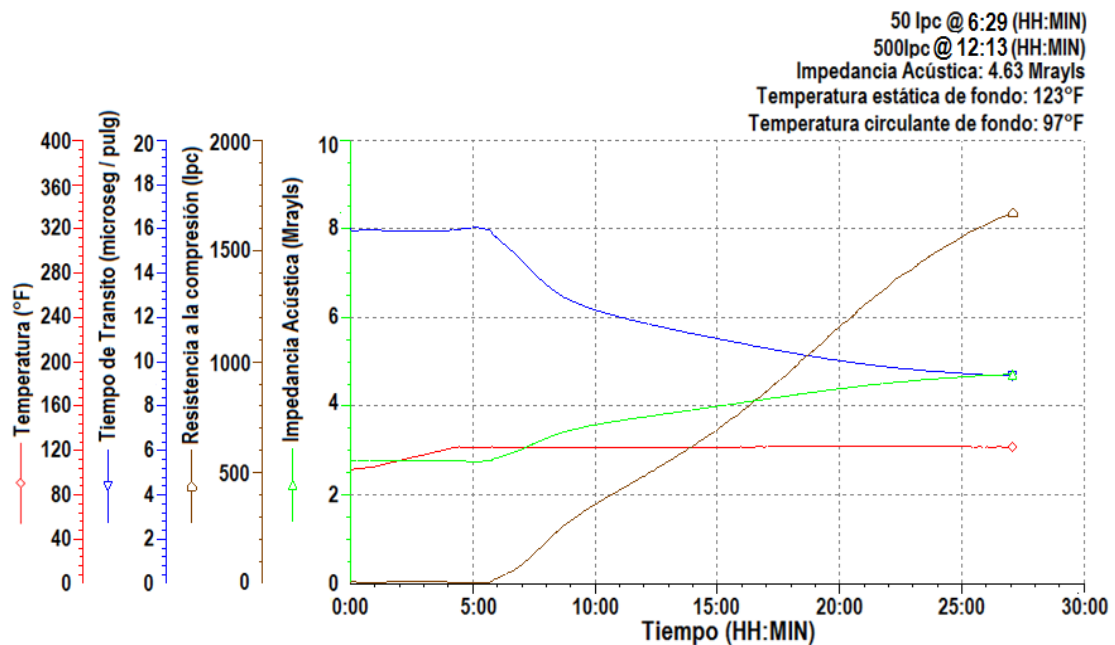


Figura 5. 11 Gráfica de resistencia a la compresión de la lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015]

Medición del desarrollo del esfuerzo de gel estático

El tiempo de transición, entre el cual la lechada antimigratoria con cemento clase B cambia de estado líquido a sólido bajo las condiciones estáticas del pozo, es de 29 minutos, y es representado en la gráfica como el periodo de tiempo comprendido en el cual la lechada genera un esfuerzo de gel entre 100 lbf/100 pies² y 500 lbf/100 pies² (ver Figura 5.12).

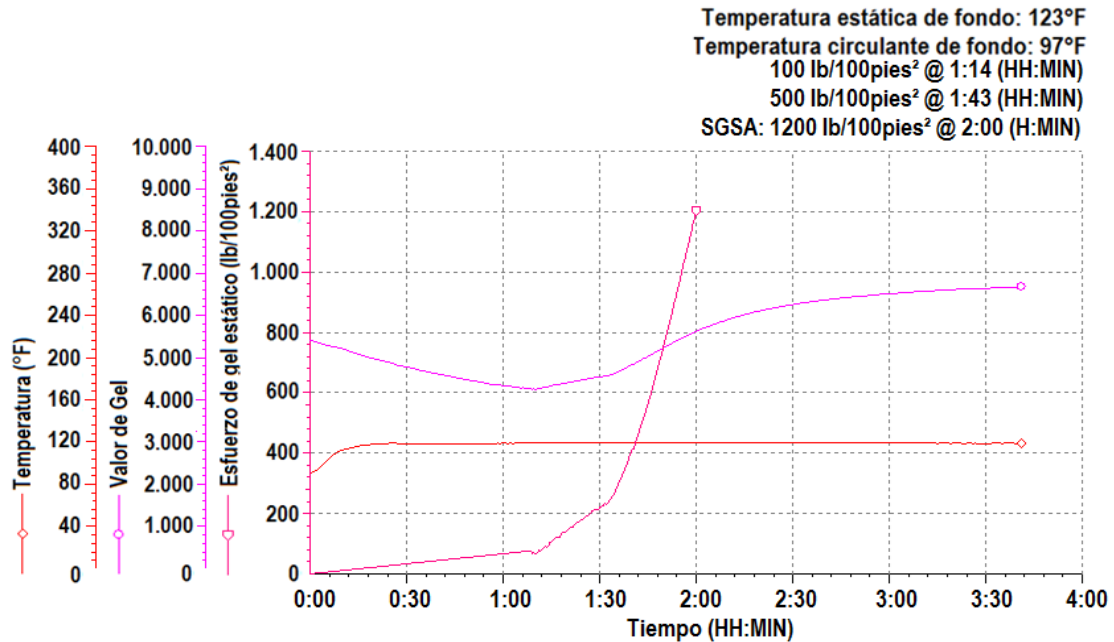


Figura 5. 12 Desarrollo del esfuerzo de gel estático de la lechada antimigratoria con cemento clase B. [Sardi, 2015]

En conclusión podemos observar que el diseño de la lechada, posee un desarrollo eficiente de esfuerzo de gel estático, que deriva en la generación de un tiempo de transito corto (menor a 30 minutos), el cual previene la migración de gas durante la etapa de mayor vulnerabilidad de la lechada de cementación, es decir, cuando esta se encuentra en estado líquido.

EVALUACIÓN DEL AGENTE ANTIMIGRATORIO

Se realizó la prueba de migración de fluidos por caída de presión, a la lechada térmica antimigratoria con cemento clase H, la cual fue propuesta y establecida como el diseño principal para su utilización en los pozos someros de la zona en estudio, con el

fin de evaluar la capacidad de la misma de impedir la percolación de fluidos no deseados a la matriz de cemento, cuando el diferencial de presiones entre la presión de la formación y la presión de la columna de cemento se hace cero, debido a que este es el punto crítico en el cual existe mayor riesgo de migración de fluidos.

En la Figura 5.13, se observa la gráfica arrojada por el software del equipo utilizado para correr esta prueba: Analizador de Migración de Fluidos (FMA).

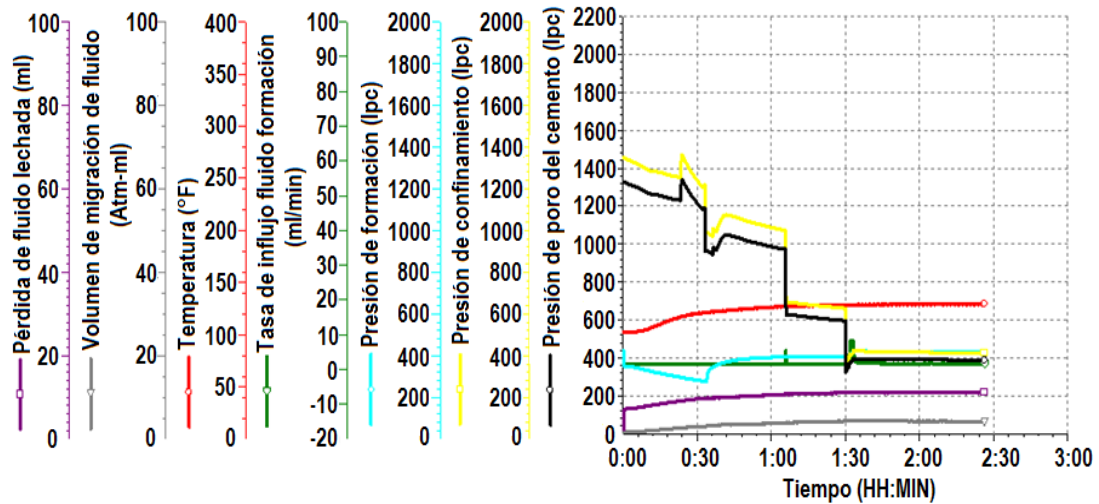


Figura 5. 13 Gráfica de la prueba de migración de fluidos por caída de presión. [Sardi, 2015]

Línea Roja: representa la temperatura estática de la lechada.

Línea Verde: representa el influjo de gas de la formación.

Línea Azul Celeste: representa la presión de poro de la formación.

Línea Amarilla: representa la presión de confinamiento en el tope del cemento.

Línea Negra: representa la presión de poro del cemento.

Línea Gris: representa el volumen de migración de fluido.

Para realizar esta prueba es vital tener a la disposición los resultados del tiempo de transición de la lechada generados en la prueba de desarrollo de esfuerzo de gel estático.

Por ende, se observa en la gráfica el cruce entre la presión de la columna de cemento y la presión de la formación al alcanzar un tiempo de prueba de 1 hora y 30 minutos (mismo tiempo en el cual la lechada desarrolla un valor de esfuerzo de gel 100 lbf/100 pies²). En este momento se inicia la inyección de gas a la columna del cemento y se extiende durante más de 50 minutos, sin observar un incremento abrupto o significativo del volumen de migración de fluido registrado. Al finalizar la prueba se obtuvo un volumen de migración de fluido de 2,73 atm-ml y un volumen de pérdida de fluido de 9,82 ml.

Este resultado, nos permite concluir, que el diseño de la lechada de cementación cumple satisfactoriamente con el objetivo de evitar la migración de fluidos no deseados hacia la matriz de cemento, mientras esta se encuentra en la etapa de mayor vulnerabilidad.

VENTAJAS DEL DISEÑO

En este capítulo se exponen los resultados del análisis económico efectuado a los diseños de las lechadas de cementación propuestas, determinando de esta manera la rentabilidad de utilizar los mismos en operaciones de campo. También se indicarán las ventajas desde el punto de vista logístico y operacional que representa el uso y preparación de una lechada de cementación que solo use aditivos químicos en estado sólido.

Análisis económico de los diseños propuestos

El análisis económico se basa en la comparación del costo de producción entre la lechada térmica antimigratoria usada convencionalmente en el área de estudio y las lechadas térmicas antimigratorias propuestas.

Se calculó para producir un volumen de un barril de lechada, la masa de aditivos en libras o en galones por saco en el caso de aditivos químicos líquidos requeridos según el diseño de cada lechada.

La formulación de aditivos de cada una de las lechadas y las cantidades requeridas se presenta a continuación en la Tabla 5.13:

Tabla 5. 13 Cantidad de aditivos requeridos en el diseño de la lechada convencional. [Sardi, 2015]

ADITIVO	CONCENTRACIÓN	CANTIDAD
SÍLICA	34 (% BWOC)	92,736 lbs
EXTENDEDOR	10 (% BWOC)	27,275 lbs
ANTIMIGRATORIO LÍQUIDO	1.6 gal/sk	4,643 gal
DISPERSANTE LÍQUIDO	0.02 gal/sk	0,058 gal
RETARDADOR LÍQUIDO	0.01 gal/sk	0,029 gal
ANTIESPUMANTE LÍQUIDO	0.03 gal/sk	0,087 gal
Rendimiento: 1,95 pies³/saco		Volumen: 1 Bbl

Como se observa en el diseño de la lechada térmica antimigratoria convencional para atender la demanda de los pozos someros del campo Costanero Bolívar, en el área Tierra Este Pesado, se utiliza 4 aditivos químicos en estado líquido.

Los diseños propuestos (ver Tabla 5.14 y 5.15), sustituyen estos aditivos químicos en estado líquidos, por otros aditivos que cumplan la misma función y que se encuentren en estado sólido, pudiendo mezclarlos de esta manera con el cemento seco y formar el llamado *blend*.

Tabla 5. 14 Cantidad de aditivos requeridos en el diseño de la lechada con cemento clase H. [Sardi, 2015]

ADITIVO	CONCENTRACIÓN	CANTIDAD (lbs)
SÍLICA	34 % BWOC	92,217
EXTENDEDOR	10 % BWOC	27,123
ANTIMIGRATORIO SÓLIDO	1.1 % BWOC	2,984
DISPERSANTE SÓLIDO	0.8 % BWOC	2,17
RETARDADOR SÓLIDO	0.2 % BWOC	0,542
ANTIESPUMANTE SÓLIDO	0.2 % BWOC	0,542
Rendimiento: 1,95 pies³/saco		Volumen: 1 Bbl

Es necesario destacar que en ambas formulaciones (con cemento clase H y cemento clase B) se utiliza los mismos aditivos químicos en estado sólido.

Tabla 5. 15 Cantidad de aditivos requeridos en el diseño de la lechada con cemento clase B. [Sardi, 2015]

ADITIVO	CONCENTRACIÓN	CANTIDAD (lbs)
SÍLICA	36 % BWOC	96,650
EXTENDEDOR	10 % BWOC	26,847
ANTIMIGRATORIO SÓLIDO	1.1 % BWOC	2,953
DISPERSANTE SÓLIDO	0.8 % BWOC	2,148
RETARDADOR SÓLIDO	0.1 % BWOC	0,268
ANTIESPUMANTE SÓLIDO	0.2 % BWOC	0,537
Rendimiento: 1,97 pies³/saco		Volumen: 1 Bbl

Una vez obtenido la cantidad de aditivo necesario para producir un volumen de un barril de lechada de acuerdo a las 3 formulaciones planteadas, se solicitó a la gerencia el costo de cada aditivo en \$/lb y \$/gal, dependiendo de su estado para calcular el costo de producción de ese volumen.

Debido a motivos de confidencialidad adquiridos con la empresa de servicios petroleros donde se desarrolló el presente trabajo, no se puede exponer el costo de producción por barril.

Sin embargo se puede expresar el porcentaje de ahorro que percibe la empresa, por la reducción del costo de producción de los diseños de lechadas plateadas, en comparación con el costo de producción de la lechada convencional.

El costo de producción de un barril de lechada térmica antimigratoria propuesta utilizando cemento petrolero clase H, representa un 36,98 % de ahorro con respecto al costo de producción de un barril de lechada térmica antimigratoria convencional.

Mientras que el costo de producción de un barril de lechada térmica antimigratoria propuesta utilizando cemento petrolero clase B, representa un 37,03 % de ahorro con

respecto al costo de producción de un barril de lechada térmica antimigratoria convencional.

Por ende, el uso del polímero como agente controlador de migración de gas en estado sólido y el diseño de una lechada de cementación cuya formulación estuviera compuesta por un extendedor, dispersante, retardador y un agente antiespumante, todos en estado sólido, es viable desde el punto de vista económico al proveer un ahorro cercano al 37 % a la empresa.

Ventajas logísticas y operacionales

- Reducción del uso de equipos y personal necesario: se elimina la necesidad de realizar la mezcla de volúmenes de agua de mezcla (agua + aditivos químicos en estado sólido) en la locación, y por ende no es necesario la movilización en el caso que lo ameritará de personal que manejen equipos como plataformas de transporte de aditivos líquidos (ver Figura 5.14), montacargas, y en caso que el cliente no requiera realizar el premezclado de la lechada o el contrato establezca la posibilidad de realizar el bombeo de la lechada al vuelo, se podría ahorrar la utilización de un recirculador.



Figura 5. 14 Utilización de una plataforma para el transporte de aditivos en estado líquido.
[www.labsa-sles.com]

- Flexibilidad operacional: con esta formulación es posible tener preparado una gran cantidad de *blend* almacenado en la planta de cemento, listo para ser

utilizado en cualquier pozo que presente características similares, brindando la capacidad de respuesta más rápida por parte de la compañía de servicios petroleros. Esta flexibilidad no puede ser obtenida al usar aditivos químicos en estado líquido, debido a que al pasar los días el agua de mezcla puede presentar situaciones indeseadas como ataque de bacterias, degradación, envejecimiento y contaminación.

- Optimización de los controles de calidad antes de la ejecución del trabajo: este sistema puede ser preparado con todos los aditivos que lo componen con suficiente tiempo de anticipación a la ejecución del trabajo. Por ende el *blend* puede ser fácilmente enviado al laboratorio de cementación para correr las pruebas finales, conocidas también como pruebas de tanque, con el fin de asegurar que la lechada sea capaz de satisfacer los requerimientos del cliente.
- Reducción de riesgos: como no es necesario preparar volúmenes de agua de mezcla, los riesgos inherentes en esta operación son reducidos, porque el proceso, el personal y los equipos involucrados para desarrollar esta actividad no serán necesarios.

CONCLUSIONES

1. Los dos diseños propuestos en este es trabajo, cumplen con todos los requerimientos técnicos establecidos por el cliente y por las condiciones operacionales del área en estudio.
2. Se evaluó la eficiencia de un polímero en estado sólido como agente controlador de migración de gas, verificando su capacidad de impedir la percolación de fluidos no deseados a la matriz de cemento.
3. Ambos diseños generan un desarrollo eficiente del esfuerzo de gel estático, que deriva en la generación de un tiempo de transito corto, el cual previene la migración de gas durante la etapa de mayor vulnerabilidad de la lechada de cementación, es decir, cuando esta se encuentra en estado líquido.
4. Los sistemas propuestos, representan soluciones tecnológicas para el control de migración de gas, durante la cementación de pozos petroleros y gasíferos.
5. Las lechadas diseñadas, desarrollan la resistencia a la compresión requerida por la empresa operadora, para continuar con la perforación de la siguiente sección del pozo, en un lapso de tiempo menor a 24 horas.
6. El uso del polímero en estado sólido, como agente controlador de migración de gas y el diseño de una lechada de cementación cuya formulación está compuesta por un extendedor, dispersante, retardador y un agente antiespumante, todos en estado sólido, es viable desde el punto de vista económico al proveer un ahorro cercano al 37 % a la empresa de servicios petroleros.
7. Cuando existe una alta actividad repetitiva (trabajos de cementación para pozos con condiciones similares) u operaciones que requieren la preparación de grandes volúmenes de lechada, la utilización de aditivos sólido representa la mejor opción, debido a que constituyen sistemas más económicos.

8. Los diseños propuestos, proveen una reducción de riesgos para la empresa de servicios petroleros, al eliminar la necesidad de preparar volúmenes de agua de mezcla, y por ende evitar los riesgos inherentes a esta operación.
9. Optimización de los controles de calidad antes de la ejecución del trabajo, debido a que los sistemas pueden ser preparados con todos los aditivos que los componen con suficiente tiempo de anticipación al desarrollo de la cementación, permitiendo de esta manera correr las pruebas finales (pruebas de tanque), antes de partir a la locación.
10. Las formulaciones propuestas, brindan una flexibilidad operacional y rapidez de respuesta por parte de la compañía de servicios petroleros, al proveer la posibilidad de preparar y almacenar una gran cantidad de *blend*, listo para ser utilizado en cualquier pozo que presente características similares, sin presentar situaciones indeseadas propias de sistemas que usan aditivos en estado líquido.

RECOMENDACIONES

1. Realizar una prueba de campo con las soluciones tecnológicas propuestas para la cementación de pozos petroleros y gasíferos del área en estudio.
2. Reducir el uso de aditivos químicos en estado líquido, para operaciones de cementación terrestres de alta repetitividad y que involucren grandes volúmenes de lechadas.
3. Extender la evaluación económica de esta tecnología, a otros parámetros aparte del costo de producción (Valor Presente Neto, Tasa Interna de Retorno, *Return on Sales*).
4. Capacitar al personal que labora en la planta de cemento de la empresa de servicio, con el fin de garantizar una mezcla homogénea y eficiente del *blend*.
5. Evaluar la gama de aditivos químico en estado sólido (extendedores, aceleradores, antiespumantes, dispersantes) que puedan ser compatibles con el polímero controlador de gas evaluado en este estudio.
6. Realizar pruebas térmicas al cemento fraguado, resultante de los diseños propuestos, con el fin de determinar si es afectado por el fenómeno de retrogresión del cemento y evaluar cómo se ven afectadas sus propiedades mecánicas bajo altas temperaturas, ocasionadas por la inyección de vapor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Elmarsafawi, Y. (2013). *CEM 5.1 Gas Migration*. Sugar Land, Texas: Schlumberger Dowell. [Documento privado]
- [2] Hernández, R. (2012). *Evaluación de surfactantes como agente dispersante del Litecem® en lechadas de cemento de baja densidad bajo las condiciones operacionales del campo Tía Juana*. Caracas, Venezuela: Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.
- [3] Coci, F. (2011). *D400 EasyBLOK Batch Mixing Procedure from Argentina with OXY*. Argentina: Schlumberger. [Documento privado]
- [4] Arangath, R. y Zhukin, A. (2009). *Cementing Challenging Shallow Gas Wells in Central Asia*. Jakarta, Indonesia: Paper SPE-121824-MS, Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition.
- [5] Salazar, J. (2007). *EasyBLOK (D400) field test report from USL, Canada and Russia*. Clamart, Francia: Schlumberger. [Documento privado]
- [6] Balestrini, M. (2006). *Como se elabora el proyecto de investigación*. 7ma ed. Caracas, Editorial Consultores Asociados.
- [7] Nelson, E. y Guillot, D. (2006). *Well Cementing: Vol 2*. Sugar Land, Texas: Schlumberger Dowell.
- [8] Hernández, O. (2006). *Desarrollo de programa de computación para diseños de cementaciones primarias en pozos petroleros*. Maracaibo, Venezuela: Trabajo de Grado, Universidad del Zulia.
- [9] Americam Petroleum Institute. (2005). *Recommended Practice for Testing Well Cements*. Washington: Americam Petroleum Institute.
- [10] González, F. (2003). *Pozos I*. Caracas, Venezuela: Guía de estudios para la materia Pozos I. Universidad Central de Venezuela.
- [11] Marqués, G. (2002). *Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas*. Caracas, Venezuela: Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.

- [12] Barberii, E. (2001). *El Pozo Ilustrado*. Caracas: Editorial del Centro Internacional de Educación y Desarrollo (FONCIED).
- [13] Martínez, A. (2000). *Cronología del petróleo venezolano*. Octava Edición. Fondo Editorial del CIED.
- [14] Schlumberger (1997). *Well Evaluation Conference Venezuela - Evaluación de Pozos*. Cap 1 y 2.
- [15] Bourgoyne, A. y otros. (1991). *Applied Drilling Engineering*. Texas: Society of Petroleum Engineers.
- [16] Murillo, J. (s.f). *Métodos de investigación de enfoque experimental*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.

BIBLIOGRAFÍA

American Petroleum Institute. (2005). *Recommended Practice for Testing Well Cements*. Washington: American Petroleum Institute.

Arangath, R. y Zhukin, A. (2009). *Cementing Challenging Shallow Gas Wells in Central Asia*. Jakarta, Indonesia: Paper SPE-121824-MS, Asia Pacific Oil and Gas Conference & Exhibition.

Balestrini, M. (2006). *Como se elabora el proyecto de investigación*. 7ma ed. Caracas, Editorial Consultores Asociados.

Bannister, C.E. y otros. (1984). *Critical Design Parameters To Prevent Gas Invasion During Cementing Operations*. Calgary, Alberta: PETSOC-84-35-106, Annual Technical Meeting, June 10 - 13

Barberii, E. (2001). *El Pozo Ilustrado*. Caracas: Editorial del Centro Internacional de Educación y Desarrollo (FONCIED).

Barberii, E. (1989). *La industria venezolana de los hidrocarburos*. Caracas, Ediciones del CEPET.

Bourgoyne, A. y otros. (1991). *Applied Drilling Engineering*. Texas: Society of Petroleum Engineers.

Coci, F. (2011). *D400 EasyBLOK Batch Mixing Procedure from Argentina with OXY*. Argentina: Schlumberger. [Documento privado]

Elmarsafawi, Y. (2013). *CEM 5.1 Gas Migration*. Sugar Land, Texas: Schlumberger Dowell. [Documento privado]

González, F. (2003). *Pozos I*. Caracas, Venezuela: Guía de estudios para la materia Pozos I. Universidad Central de Venezuela.

Hernández, O. (2006). *Desarrollo de programa de computación para diseños de cementaciones primarias en pozos petroleros*. Maracaibo, Venezuela: Trabajo de Grado, Universidad del Zulia.

Hernández, R. (2012). *Evaluación de surfactantes como agente dispersante del Litecem® en lechadas de cemento de baja densidad bajo las condiciones operacionales del campo Tía Juana*. Caracas, Venezuela: Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.

Marquéz, G. (2002). *Evaluación de materiales cementantes para pozos de petróleo y/o gas con propiedades antimigratorias de gas*. Caracas, Venezuela: Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela.

Martinez, A. (2000). *Cronología del petróleo venezolano*. Octava Edición. Fondo Editorial del CIED.

Murillo, J. (s.f). *Métodos de investigación de enfoque experimental*. Madrid, España: Universidad Autónoma de Madrid.

Nelson, E Nelson, E. (1990). *Well Cementing*. Schlumberger Dowell, Sugar Land. Texas.

Ness, I. y Gatti, A. (1995). *Gas Migration Remediation Process Development*. Calgary, Canada: 95-87 PETSOC Conference Paper, Annual Technical Meeting, June 7 - 9

Salazar, J. (2007). *EasyBLOK (D400) field test report from USL, Canada and Russia*. Clamart, Francia: Schlumberger. [Documento privado]

Schlumberger (2007). *Jet Manual 14 Introduction to Cementing*. Well Services Training & Development, IPC. [Documento privado]

Schlumberger (1997). *Well Evaluation Conference Venezuela - Evaluación de Pozos*. Cap 1 y 2.