

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA INGENIERIA PETROLERA



PROYECTO DE GRADO

**“OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO
CONVENCIONAL CON LA ADICIÓN DE FIBRA DE POLIPROPILENO Y LA
RESINA DE POLIURETANO”**

Postulante: Mirko Franco Velasco Muñoz

Tutor: Ing. Marco Antonio Montesinos Montesinos

LA PAZ – BOLIVIA

2019



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mi madre Susana, quien nunca dejo de apoyarme y alentarme, a Irian quien representa mi inspiración y una persona muy importante en mi vida y finalmente a mi familia, que siempre estuvo presente brindándome el apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Un profundo agradecimiento a los docentes de la carrera de Ingeniería Petrolera quienes me brindaron su conocimiento y alentaron siempre a ser un gran profesional. Al ingeniero Marco Antonio Montesinos que me brindo su ayuda en todo momento. Al ingeniero Reynaldo Marin por su colaboración constante para la realización de este proyecto y durante toda la carrera. Al ingeniero Fernando Cuevas por brindarme siempre sus consejos.

Un agradecimiento a todos mis amigos, quienes estuvieron conmigo a lo largo de estos años, compartiendo momentos difíciles y también de mucha alegría.

RESUMEN

La efectividad de cualquier trabajo de cementación depende de llevar a cabo una preparación meticulosa y precisa de los equipos y materiales, así como del diseño y las pruebas del trabajo.

Los ensayos realizados en laboratorios para el cemento tienen la función de evaluar el desempeño y las características químicas de las lechadas, mediante la medición de ciertas propiedades bajo ciertas condiciones de fondo de pozo y el análisis cualitativo y cuantitativo de los componentes de las lechadas antes de ser mezclada.

La norma API RP 10B delinea las prácticas recomendadas para las pruebas de laboratorio que se llevan a cabo con las lechadas de cemento para pozos de petróleo, así como sus aditivos.

La importancia de optimizar las propiedades de las lechadas de cemento es un esfuerzo que garantiza el cumplimiento de los objetivos de estas. La adición de diferentes compuestos químicos ha demostrado en la práctica una mejora en las propiedades de la lechada de cemento incrementando sus características reológicas además de la optimización de tiempo y manejo de problemas en la operación de la perforación de pozos petroleros.

Los compuestos químicos: fibra de polipropileno y resina de poliuretano que se proponen en el presente proyecto no se alejan de la anterior afirmación por lo que se propone el uso de estos en la formulación de una lechada de cemento.

Un problema recurrente durante la cementación en la etapa de producción es que al variar las temperaturas o presiones internas la lechada suele tener problemas a la hora de fraguar, en ocasiones provoca pérdidas y en casos extremos la pérdida de la formación; es decir tiene que recurrirse a una segunda cementación a la cual se le conoce como cementación secundaria, que es donde se corrigen los errores producidos en la cementación primaria.

El principal propósito de una cementación es que se pueda producir un aislamiento efectivo para la vida del pozo, permitiendo que el petróleo o gas se pueda producir de manera segura y económica, por este motivo es muy importante que se realice un diseño de la lechada acorde a las propiedades de la formación, así mismo, que se sigan las buenas prácticas de cementación y se empleen todas las herramientas al alcance para que el trabajo sea exitoso; asegurando un buen aislamiento zonal, y alargando la vida útil del pozo.

INDICE

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS	6
CAPITULO 1	7
GENERALIDADES	7
1.1. INTRODUCCION.....	7
1.2. ANTECEDENTES	8
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.4. METODOLOGIA	10
1.5. OBJETIVOS.....	10
1.5.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
1.6. JUSTIFICACION.....	11
CAPITULO 2	12
MARCO TEORICO	12
2.1. CEMENTACION DE POZOS PETROLEROS	12
2.2. TUBERIAS DE REVESTIMIENTO	14
2.2.1. Tubería Conductora	14
2.2.2. Tubería Superficial	14
2.2.3. Tubería Intermedia	14
2.2.4. Tubería de Producción.....	14
2.2.5. Tubería de Revestimiento Corta (Liner)	15
2.3. DEFINICIÓN DE CEMENTO	16
2.3.1. CEMENTO PORTLAND.....	16
2.4. PRINCIPALES COMPUESTOS DEL CEMENTO Y SUS FUNCIONES	16
2.4.1. SILICATO TRICÁLCICO (3CaO.SiO ₂)	16
2.4.2. SILICATO DICÁLCICO (2CaO.SiO ₂)	17
2.4.3. ALUMINATO TRICÁLCICO (3CaO.AL ₂ O ₃).....	17
2.4.4. ALUMINOFERRITA TETRACÁLCICO (4CaO.AL ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃).....	17

2.5. CLASIFICACION DE LOS CEMENTOS.....	18
2.5.1. Cemento clase A.....	18
2.5.2. Cemento clase B.....	18
2.5.3. Cemento clase C.....	18
2.5.4. Cemento clase D.....	18
2.5.5. Cemento clase E y F.....	18
2.5.6. Cemento clase G y H.....	19
2.5.7. Cemento clase J.....	19
2.6. PROPIEDADES FISICAS DE LOS CEMENTOS	19
2.6.1. Gravedad específica (Ge)	20
2.6.2. Peso volumétrico (PV)	20
2.6.3. Finezas de los granos del cemento.....	20
2.6.4. Requerimiento de agua normal	20
2.6.5. Requerimiento de agua mínima	21
2.6.6. Densidad de la lechada	21
2.7. PROPIEDADES MECANICAS.....	21
2.8. PROPIEDAD ELASTICA	22
2.8.1. MODULO DE YOUNG.....	22
2.8.2. MODULO O RELACIÓN DE POISSON	24
2.10. ADITIVOS.....	26
2.10.1. ADITIVOS PARA LECHADAS DE CEMENTO CONVENCIONALES.....	26
2.11. ADICIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS AL CEMENTO PARA GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS	29
2.11.1. FIBRA DE POLIPROPILENO	30
2.11.2. RESINA DE POLIURETANO	32
CAPITULO 3	34
PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO SEGÚN API RP 10B	34
3.1. PREPARACION DE LA LECHADA DE CEMENTO	34
3.1.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO.....	34
3.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.....	35
3.1.3. PROCEDIMIENTO	37
3.2. DENSIDAD DE UNA LECHADA DE CEMENTO.....	40
3.2.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO.....	40

3.2.2. EQUIPO RECOMENDADO.....	41
3.2.3. PROCEDIMIENTO	42
3.3. EFECTO DE AGUA LIBRE EN UNA LECHADA DE CEMENTO	43
3.3.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO	43
3.3.2. PROCEDIMIENTO	44
3.3.3. ACONDICIONAMIENTO DE LA LECHADA	44
3.4. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA DE CEMENTO	46
3.4.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO	46
3.4.2. EQUIPO	47
3.4.3. PROCEDIMIENTO	49
3.4.4. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DEL ESFUERZO GEL	51
3.4.5. MODELADO DEL COMPORTAMIENTO REOLOGICO.....	52
3.4.6. MODELOS REOLOGICOS.....	53
3.4.7. SELECCIÓN DEL MODELO REOLOGICO.....	55
3.5. PERDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO EN UNA LECHADA DE CEMENTO	57
3.5.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO	57
3.5.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO.....	59
3.5.3. PROCEDIMIENTO	59
3.5.4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO	59
3.5.5. PROCEDIMIENTO PARA ACONDICIONAR LA LECHADA.....	59
3.5.6. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA A TEMPERATURAS MENORES DE 90° (194° F).....	60
CAPITULO 4	62
APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA PROPUESTA.....	62
4.1 Preparación de una lechada con Fibra de Polipropileno y Resina de Poliuretano	62
4.2 Determinación de la densidad.....	66
4.3 Obtención de reologías	66
4.4 Efecto de agua libre	72
4.5 Perdida de fluido por filtrado excesivo en una lechada de cemento	73
4.6 Resultados de laboratorio	74
4.7 Calculo de la lechada de cemento en el pozo Sábalo 9	74
4.8 Análisis de resultados.....	86

CAPITULO 5	87
ANALISIS DE RESULTADOS Y COSTOS	87
5.10 Análisis de costo beneficio	93
CAPITULO 6	94
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94
6.1 CONCLUSIONES	94
6.2 RECOMENDACIONES	95
ÍNDICE DE PALABRAS ABREVIADAS	96
BIBLIOGRAFIA	98
ANEXOS	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Cementación primaria	13
Figura 2. 2. Tuberías de revestimiento	15
Figura 2. 3. Módulo de Young	23
Figura 2. 4. Relación de Poisson	25
Figura 2. 5 Fibra de polipropileno	32
Figura 2. 6 Resina de poliuretano.....	33
Figura 3. 1 Aditivos especiales (deben ser pesados en una balanza digital), empleados en la formulación de diseños de lechadas.	35
Figura 3. 2 Balanza Granataria y Digital.	36
Figura 3. 3 Mezcladora Chandler con vaso de Mezclado.	37
Figura 3. 4 Mezcladora Chandler con la lechada mezclándose > 12,000 rpm.	40
Figura 3. 5 Balanza presurizada para Lechadas de Cemento.	42
Figura 3. 6 Medición de la densidad en la Balanza de Lodos Presurizada.	43
Figura 3. 7 Prueba de agua libre en pozos verticales y a 45°.	45
Figura 3. 8 Efectos de Agua Libre en diferentes pozos.	45
Figura 3. 9 Viscosímetro rotacional Fann 35-A.....	49
Figura 3. 10 Consistómetro atmosférico Fann modelo 165-AT.....	50
Figura 3. 11 Modelos reológicos.	55
Figura 3. 12 Aditivos especiales solidos pulverizados y líquidos.	58
Figura 3. 13 Autoclave con accesorios (izquierda), filtro prensa Fann (derecha)	59
Figura 4. 1 Materiales y aditivos.	62
Figura 4. 2 Mezcla de cemento y fibra de polipropileno.	63
Figura 4. 3 Mezcla de agua y resina de poliuretano.....	63
Figura 4. 4 Mezcla homogénea de agua y resina de poliuretano.	64
Figura 4. 5 Lechada de cemento homogénea con aditivos químicos.	64
Figura 4. 6 Balanza de lodos.	66
Figura 4. 7 Viscosímetro Fann.	67
Figura 4. 8 Muestras para efecto de agua libre.	73
Figura 4. 9 Prensa API	74

INDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Características de la hidratación de los compuestos del cemento.	17
Tabla 2. 2 Clasificación API del Cemento.	19
Tabla 2. 3 Ficha Técnica de la Fibra de polipropileno.....	31
Tabla 2. 4 Ficha técnica de la Resina de Poliuretano.....	32
Tabla 4. 1 Cantidad de material calculado para la elaboración de lechadas.....	65
Tabla 4. 2 Densidades de las muestras de lechada.....	66
Tabla 4. 3 Lecturas del viscosímetro Fann.	67
Tabla 4. 4 Resultados a partir de los datos del Viscosímetro Fann.	69
Tabla 4. 5 Comportamiento reológico de la muestra de lechada base.	70
Tabla 4. 6 Comportamiento reológico de la muestra MV-1	70
Tabla 4. 7 Comportamiento reológico de la muestra MV-2.	71
Tabla 4. 8 Comportamiento reológico de la muestra MV-3	71
Tabla 4. 9 Comportamiento reológico de la muestra MV-4	72
Tabla 4. 10 Resultados prueba Agua Libre.....	73
Tabla 4. 11 Resultados prueba de filtrado.	74
Tabla 4. 12 Comparación de resultados tramo 0 – 100 m.....	76
Tabla 4. 13 Balance de materiales tramo 0 – 100 m.....	76
Tabla 4. 14 Comparación de resultados tramo 100 – 800 m.....	78
Tabla 4. 15 Balance de materiales tramo 100 – 800 m.....	78
Tabla 4. 16 Comparación de resultados tramo 800 – 2000 m.....	80
Tabla 4. 17 Balance de materiales tramo 800 – 2000 m.....	80
Tabla 4. 18 Comparación de resultados tramo 2000 – 3510 m.....	82
Tabla 4. 19 Balance de materiales tramo 2000 – 3510 m.....	82
Tabla 4. 20 Comparación de resultados tramo 2000 – 3510 m.....	84
Tabla 4. 21 Balance de materiales tramo 2000 – 3510 m.....	84
Tabla 4. 22 Comparación de resultados entre el sistema MV-4 y convencional.....	86
Tabla 4. 23 Comparación de resultados “General”	86
Tabla 5. 1 Costos finales entre el sistema MV-4 y el convencional.....	92

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCION

Se ha evolucionado de una manera vertiginosa en la industria de ingeniería de cementaciones. En pocos años se ha logrado obtener grandes avances tecnológicos de manera que ha facilitado la cementación de pozos petroleros por medio de computadoras que simulan el comportamiento dentro del mismo.

La cementación es un proceso que consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua, para formar una lechada que es bombeada al pozo a través de la sarta de revestimiento y situarlo en el espacio anular entre el hoyo y el diámetro externo del revestidor.

El volumen a bombear es predeterminado para alcanzar las zonas críticas (alrededor del fondo de la zapata, espacio anular, formación permeable, hoyo desnudo, etc.). Luego se deja fraguar y endurecer, formando una barrera permanente e impermeable al movimiento de fluidos detrás del revestidor.

Entre los propósitos principales de la cementación se pueden mencionar los siguientes:

- Proteger y asegurar la tubería de revestimiento en el hoyo.
- Aislar zonas de diferentes fluidos.
- Aislar zonas de agua superficial y evitar la contaminación de las mismas por el fluido de perforación o por los fluidos del pozo.
- Evitar o resolver problemas de pérdida de circulación y pega de tuberías.
- Reparar pozos por problemas de canalización de fluidos.
- Reparar fugas en el revestidor.

Durante la construcción de un pozo petrolero el proceso de cementación es de vital importancia para el mismo, dado que una deficiente operación de cementación traería drásticas consecuencias; tales como incremento de los costos, riesgo de pérdida del pozo, riesgos hacia el ambiente, fuga de gases, grietas en la cuales haya fugas de agua y a la seguridad. Por tal motivo al momento de diseñar y cementar un pozo petrolero se deben

tomar en cuenta las nuevas técnicas, así como las mejores prácticas operacionales dirigidas al proceso de cementación.

La cementación tiene una gran importancia en la vida del pozo, ya que los trabajos de una buena terminación dependen directamente de una buena cementación.

Con este trabajo se hace hincapié en la generación de nuevas alternativas para la solución de los problemas ya antes mencionados.

Para tener una cementación exitosa se deben tomar en cuenta distintas variables tales como la temperatura, densidad y presión siendo la primera prioritaria ya que el ascenso o descenso de la misma provoca modificaciones en las propiedades de los aditivos.

Durante la cementación se tienen tres etapas, etapa primaria, etapa intermedia y la etapa de producción.

Tomando en cuenta lo anterior, el propósito de este proyecto es producir una lechada con propiedades adecuadas para cambios de temperatura, presión, densidad y formaciones rocosas, volviéndola adaptable a las distintas variaciones posibles y a su vez con la finalidad de prevenir y evitar posibles fallas del cemento; asegurando y alargando la vida útil de un pozo.

Se modificarán las propiedades mecánicas (Módulo de Young) para generar elasticidad en la lechada, necesaria para las cargas sometidas durante la vida del pozo y proveer una viscosidad uniforme incrementando su reología a base de un material elastómero, generando así una alternativa para la cementación de pozos petroleros.

1.2. ANTECEDENTES

Las pruebas que se realizan en el laboratorio tanto al cemento como a los materiales que se utilizan para cementar son una parte esencial del proceso integral de la cementación. Las pruebas inician en los lugares donde se fabrican el cemento y los aditivos para monitorear la calidad del producto; y continúan durante las etapas de diseño de la lechada en los laboratorios de las compañías de servicios cuando se desarrolla una formulación específica que posea las características necesarias para realizar la cementación en cuestión en las mejores condiciones de operación. La evaluación es frecuentemente realizada a muestras de

planta en el momento en que la mezcla es preparada, o a muestras tomadas de los silos de almacenamiento cuando el material es llevado a un lugar operativamente estratégico.

El laboratorio típico de campo está relacionado primordialmente con la evaluación del desempeño de los cementos a través de la medición física de las propiedades específicas de la lechada simulando las condiciones de fondo de pozo. Este tipo de evaluación se usa principalmente en las etapas de diseño de la lechada que va a utilizarse para efectuar la operación, y en las etapas de ejecución para monitorear la preparación adecuada de la mezcla en campo. La caracterización química normalmente incluye análisis cualitativos y cuantitativos de los componentes de la lechada antes de mezclarlos, para asegurar que sean adecuados para su uso.

Se utilizan técnicas de análisis para propósitos de control de calidad en el lugar de manufactura, para determinar que los componentes que integran el cemento seco estén presentes en las cantidades deseadas, y que son suficientemente mezcladas en la planta, tales técnicas se usan también para monitorear la calidad del agua de mezcla en la localización del pozo. La correcta aplicación de una amplia variedad de pruebas de laboratorio provee de información indispensable para alcanzar una cementación exitosa.

Las pruebas convencionales con lechadas de cemento y su elaboración recomendadas por el API (Instituto Americano del Petróleo), en su publicación correspondiente a las prácticas recomendadas para pruebas efectuadas a cementos utilizados en pozos petroleros que corresponden a las pruebas de control de calidad del cemento, así como los procedimientos operacionales diseñados para incluir todas las lechadas de cemento convencionales que son realizadas normalmente en los laboratorios instalados para tal fin en las zonas petroleras y centros de investigación. Esta descripción contiene también especificaciones para lechadas elaboradas con cemento, aditivos y agua.

Los procedimientos están diseñados para simular las condiciones de fondo de pozo para desarrollar las pruebas en un laboratorio de campo razonablemente equipado, teniendo en cuenta las diferencias entre las condiciones reales de fondo de pozo y las limitaciones prácticas para simular tales condiciones en el laboratorio.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Durante la perforación de un pozo existen varias etapas, una de las más importantes es la cementación ya que de acuerdo a la calidad con la que se haya elaborado dependerá el tiempo de vida del pozo. Siendo esta también una de las etapas más problemáticas durante la perforación, es necesario mejorar la calidad de la cementación y así evitar algunas de las fallas recurrentes, tales como:

- Falta de homogeneidad de la mezcla entre cementos y aditivos.
- Falta o concentración inadecuada de aditivos para controlar el tiempo de bombeabilidad, filtrado, reología, etc.
- Diseño de la lechada no adecuado para controlar las presiones polares elevadas.
- Deshidratación prematura de la mezcla de cemento.
- Densidad equivalente de circulación elevada que fractura la formación y ocasionan pérdidas.

Por tal motivo se desea obtener una alternativa de lechada de cemento mediante la aplicación de compuestos químicos que permitan modificar algunas propiedades de la lechada de cemento para corregir tales problemáticas.

1.4. METODOLOGIA

La metodología del presente proyecto es de carácter cuantitativo y experimental. De acuerdo a la norma API RP 10B existen procedimientos para la realización de la formulación de una propuesta de lechada de cemento, la cual se llevará a cabo en laboratorios especializados de cementación. El planeamiento de la realización es de carácter personal, por lo que la investigación y experimentación serán enteramente de acuerdo a la formulación de mi persona.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

Generar una nueva alternativa en la cementación cuyo enfoque de elaboración proponga una lechada con propiedades de elasticidad, resistencia y capacidad de moldearse a las propiedades del pozo.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Añadir a la lechada convencional de cemento, compuestos químicos tales como la fibra de polipropileno y la resina de poliuretano para optimizar las propiedades de la nueva lechada de cemento.
- Analizar las diferentes técnicas de laboratorio para la elaboración de lechadas de cemento a condiciones de pozo.
- Realizar el análisis de costos para comparar los beneficios económicos que la nueva lechada pueda brindar.

1.6. JUSTIFICACION

El propósito de la propuesta es generar una nueva alternativa de lechada de cemento cuyas propiedades mecánicas tales como el módulo de Young, las propiedades reológicas: densidad, viscosidad, punto cedente, etc. generen elasticidad en la lechada, necesaria para las cargas sometidas durante la vida del pozo y proveer una viscosidad uniforme optimizando su reología a base de un material elastómero, generando así una alternativa para la cementación de pozos petroleros.

Es conveniente llevar a cabo el proyecto para minorizar el costo de la operación de perforación de pozos de hidrocarburos y evitar maniobras de corrección como la cementación forzada debido a una mala formulación de la lechada de cemento, así como su aplicación en el pozo, de esta manera se espera otorgarle al pozo una mayor vida útil y una reducción de costo, dando una solución práctica a futuros problemas mencionados con anterioridad.

Los datos obtenidos en el laboratorio generan resultados precisos que favorecen la implementación de la lechada según las características del pozo para su aplicación en cualquier campo petrolero en un futuro, su valor teórico incluso puede dar lugar a futuros proyectos y estudios, porque en nuestro medio no se han generado nuevas propuestas.

Por otro lado, al requerir materiales a industrias de aditivos químicos dirigidos únicamente a la construcción e ingeniería para hormigones, morteros, sellante, impermeabilizante, etc. la propuesta abrirá un nuevo campo a dichas entidades al utilizar la fibra de polipropileno y resina de poliuretano (poliol e isocianato) en el campo de la industria petrolera, dándole a la propuesta un carácter de relevancia social al país.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1. CEMENTACION DE POZOS PETROLEROS

Durante los años recientes, uno de los mayores esfuerzos de las compañías petroleras ha sido realizar investigaciones sobre la integridad de la cementación a largo plazo. Éste esfuerzo ha resultado en un procedimiento para diseñar un sistema de cementación específico para cada tipo de pozo que permita mantener la integridad del aislamiento durante su vida productiva.

El cemento puede ser diseñado para un máximo beneficio técnico y económico mediante una evaluación del riesgo de falla potencial asociado con diferentes escenarios y sistemas de cementación.

Para asegurar el aislamiento requerido durante la vida del pozo, existen dos factores críticos en el diseño de cementaciones que deben considerarse por el equipo de construcción de pozos:

- El cemento debe ser colocado en la totalidad del espacio anular mediante el desplazamiento eficiente del lodo de perforación y siguiendo todas las buenas prácticas operativas de cementación existentes.
- Las propiedades de los cementos deberán ser optimizadas de tal manera que puedan soportar los esfuerzos de las diferentes operaciones que se llevarán a cabo durante la vida del pozo.

El principal propósito de una cementación es que se pueda producir un aislamiento efectivo para la vida del pozo, permitiendo que el gas o petróleo pueda producir de manera económica y sobre todo segura.

Numerosas operaciones pueden efectuarse en pozos de petróleo y gas durante su vida productiva. Ejemplos de dichas operaciones son: pruebas de presión y producción, inducciones con nitrógeno, estimulaciones y producción de hidrocarburos.

Estas operaciones resultan en cambios de presión y temperaturas aplicadas durante la vida del pozo. La magnitud de dichos cambios dependerá de las condiciones operativas de cada

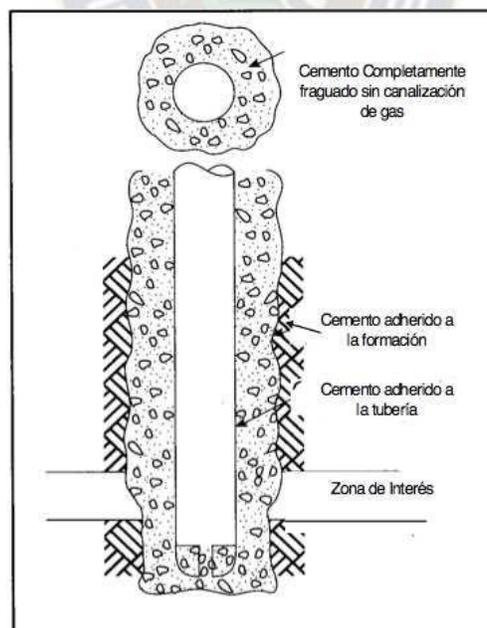
pozo, pero, en todos los casos generan una serie de esfuerzos que actúan sobre el cemento pudiendo perder su integridad original, de ahí la necesidad de considerar en la propuesta de diseño las operaciones que se llevarán a cabo en los pozos para proveer un aislamiento duradero.

Una vez realizado el estudio de las propiedades mecánicas que afectan la integridad del cemento a lo largo de su vida útil, el siguiente paso es elaborar una lechada de cemento y someterla a las diferentes pruebas de laboratorio, que permiten simular y determinar los esfuerzos a los que estará expuesto en el pozo.

Los resultados de las pruebas permitirán conocer si la lechada es óptima y aplicable para un pozo en particular.

Es necesario conocer los procedimientos para diseñar una lechada y las pruebas a las que será sometida, así como también los efectos que provocarán los aditivos una vez que se han mezclado con el agua y el cemento, sólo así se podrá diseñar una lechada que cumpla con los requerimientos de un pozo.

Figura 2. 1 Cementación primaria



Fuente: Manual Ingeniería de cementaciones

2.2. TUBERIAS DE REVESTIMIENTO

De acuerdo a las etapas de cementación las tuberías de revestimiento se clasifican en:

2.2.1. Tubería Conectora

Es la primera que se cementa al iniciar la perforación, la profundidad de asentamiento varía entre 90 y 150 ft, y en pocas ocasiones hasta 300 ft. Su objetivo principal es el de establecer un medio de circulación y control de los fluidos de perforación que retornan del pozo hacia el equipo de eliminación de sólidos y los tanques de tratamiento. Permite continuar perforando hasta alcanzar la profundidad de asentamiento del revestimiento superficial. El diámetro seleccionado de la tubería por emplear varía entre 16 y 30 in. Esto depende en gran parte de la profundidad total programada del pozo.

2.2.2. Tubería Superficial

Tiene por objeto instalar conexiones superficiales de control y al mismo tiempo proteger el pozo descubierto, aislando así flujos de agua y zonas de pérdida de lodo cercanas a la superficie. Estas tuberías se instalan entre 150 y 3500 ft, los diámetros se seleccionan de acuerdo a la profundidad total del pozo.

2.2.3. Tubería Intermedia

Se instalan con la finalidad de aislar zonas que contengan presiones normales de formación, flujos de agua, derrumbes y pérdidas de circulación. En sí, se utiliza como protección del pozo descubierto para tratar en la mayoría de los casos de incrementar la densidad de los fluidos de perforación y controlar las zonas de alta presión. Dependiendo de la profundidad del pozo o de los problemas que se encuentran durante la perforación, será necesario colocar una o más sargas de tuberías de revestimiento intermedias, que aislaran la zona del problema.

2.2.4. Tubería de Producción

Tienen como meta principal aislar el yacimiento de fluidos indeseables en la formación productora y de otras zonas del pozo, también se utilizan para la instalación de empacadores de producción y accesorios utilizados en la terminación del pozo.

Para la cementación de esta tubería es necesario utilizar lechadas de cemento con aditivos especiales de acuerdo a las condiciones del pozo como las altas temperaturas y presiones entre otros parámetros.

2.2.5. Tubería de Revestimiento Corta (Liner)

Constituye una instalación especial que evita utilizar una sarta desde la superficie al fondo del pozo.

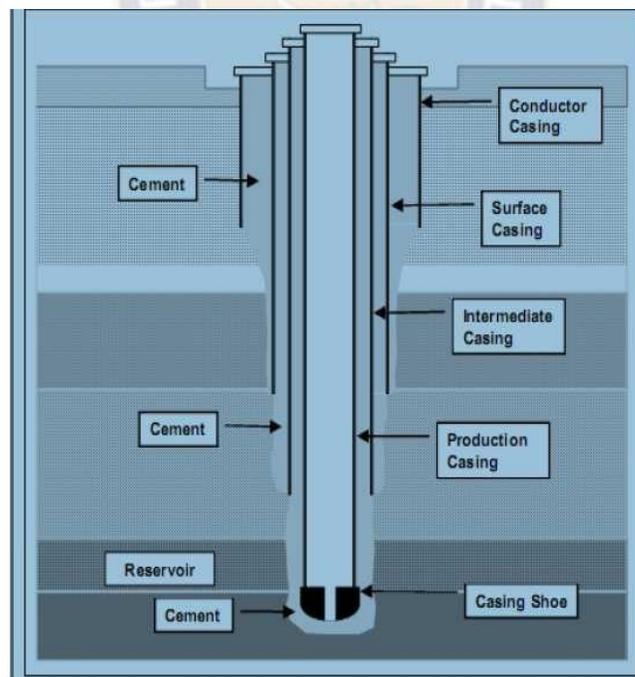
La longitud de esta tubería permite cubrir el pozo descubierto, quedando una parte traslapada dentro de la última tubería que puede variar entre 150 a 450 ft y en ocasiones se emplea una longitud mayor, dependiendo del objetivo.

Estas tuberías cortas pueden colocarse en el intervalo deseado mucho más rápido que las normales.

Al continuar con la perforación existe un desgaste de la tubería de revestimiento, por lo tanto, estas tuberías cortas ayudan a corregir este desgaste.

Evita volúmenes muy grandes de cemento, debido a que estas tuberías no son cementadas hasta la superficie.

Figura 2. 2. Tuberías de revestimiento



Fuente: Energy Halliburton Cementing Manual, 1962

2.3. DEFINICIÓN DE CEMENTO

Se denomina cemento a un conglomerante hidráulico que, mezclado con agregados pétreos (árido grueso o grava, más árido fino o arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece al reaccionar con el agua, adquiriendo consistencia pétreo, denominado hormigón o concreto.

2.3.1. CEMENTO PORTLAND

Es una mezcla compleja de caliza (u otros materiales con alto contenido de carbonato de calcio), sílice, hierro y arcilla, molidos y calcinados, que fragua y se endurece al reaccionar con el agua.

Los componentes que forman el cemento son óxidos superiores de oxidación lenta. Esto significa que terminan su grado de oxidación al estar en contacto con el aire al enfriarse.

El cemento Portland es, además, el ejemplo típico de un cemento hidráulico; fragua y desarrolla resistencias a la compresión como resultado de la hidratación, la cual involucra reacciones químicas entre el agua y los componentes presentes en el cemento.

De todos los cementos, el Portland es el más importante en cuanto a términos de calidad, desarrollo de resistencia a la compresión, tensión y a los sulfatos; por lo cual es el material idóneo para las operaciones de cementación de pozos petroleros.

Cabe mencionar que algunos cementos Portland se fabrican de manera especial debido a que las condiciones de los pozos difieren significativamente entre sí al variar su profundidad, temperatura, ubicación geográfica; etc. El fraguado y endurecimiento se presenta si el cemento se coloca en agua.

El cemento fraguado tiene baja permeabilidad y es insoluble en agua, de tal forma que expuesto a ésta no se destruyen sus propiedades. Tales atributos son esenciales para que un cemento obtenga y mantenga el aislamiento entre las zonas del subsuelo.

2.4. PRINCIPALES COMPUESTOS DEL CEMENTO Y SUS FUNCIONES

2.4.1. SILICATO TRICÁLCICO ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

Habitualmente conocido como C3S, es el componente más abundante en la mayoría de los cementos y, además, el factor principal para producir la resistencia temprana o inmediata (1

a 28 días) Reacciona rápido con el agua, liberando calor y formando silicato de calcio hidratado (CSH).

Generalmente, los cementos de alta consistencia inmediata contienen en mayor concentración este compuesto.

2.4.2. SILICATO DICÁLCICO ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)

Conocido como C2S, es un compuesto de hidratación lenta para formar el mismo tipo de compuestos que el C3S (CSH), que proporciona una ganancia gradual de resistencia; esto ocurre en un período largo: después de 28 días.

2.4.3. ALUMINATO TRICÁLCICO ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$)

Se lo conoce también como C3A y tiene influencia en el tiempo de bombeabilidad de la lechada. Es responsable de la susceptibilidad al ataque químico de los sulfatos sobre los cementos. Esta susceptibilidad se clasifica en moderada y alta resistencia al ataque químico, cuando contienen este compuesto en un 8% y 3% respectivamente.

Reacciona muy rápido y libera mucho calor al hidratarse. Contribuye a resistencia a muy temprana edad, pero poco a la resistencia final.

Los cementos resistentes a sulfatos deben limitar el contenido de este compuesto, lo que se logra añadiendo óxido férrico transformándolo en C4AF.

2.4.4. ALUMINOFERRITA TETRACÁLCICO ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$)

También conocido como C4AF, reacciona rápido con el agua, pero no produce mucho calor de hidratación y resistencia a la compresión; influye en la reología del cemento, formación de geles, y durabilidad.

Tabla 2. 1 Características de la hidratación de los compuestos del cemento.

Componente	Velocidad de Reacción	Cantidad de calor liberada	Contribución a la resistencia del cemento
C ₃ S	Moderada	Moderada	Alta
C ₂ S	Lenta	Baja	Inicialmente
C ₃ A+C ₃ H ₂	Rápida	Muy alta	Baja
C ₄ AF+C ₃ H ₂	Moderada	Moderada	baja

Fuente: Basic Cement Chemistry, BJ Services Company, 2001

2.5. CLASIFICACION DE LOS CEMENTOS

El American Petroleum Institute (API) ha identificado nueve tipos de cementos de acuerdo a su composición química y propiedades físicas, y estos son:

- API Clase A y B
- API Clase C
- API Clase D, E y F
- API Clase G y H
- API Clase J

2.5.1. Cemento clase A

Diseñado para utilizarlo hasta una profundidad de 6000 ft, con temperaturas de hasta 170°F, donde no se requieran propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permiten. No brinda ninguna resistencia a los sulfatos.

2.5.2. Cemento clase B

Diseñado para emplearse hasta una profundidad de 6000 ft, con temperaturas de hasta 170°F, donde no se requieran propiedades especiales y las condiciones del pozo lo permite, brinda una moderada resistencia a los sulfatos.

2.5.3. Cemento clase C

Se emplea hasta una profundidad de 6000ft, con temperaturas de hasta 170°F, puede emplearse donde se requiere alta resistencia a la compresión temprana; genera una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

2.5.4. Cemento clase D

Es empleado hasta una profundidad de 12000 ft, con temperaturas entre 170°F y 230°F, y puede soportar una presión moderada. Tiene una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

2.5.5. Cemento clase E y F

Este cemento se emplea en profundidades entre 14000 ft y 16000 ft, con temperaturas entre 170°F Y 230°F, puede soportar altas presiones. Genera una moderada y alta resistencia a los sulfatos.

2.5.6. Cemento clase G y H

Comúnmente conocidos como cementos petroleros, pueden emplearse desde la superficie hasta profundidades de 10000 ft, tal como se fabrican; y pueden modificarse con aceleradores y retardadores para usarlos en un amplio rango de condiciones de presión y temperatura.

En cuanto a su composición química son similares al cemento API Clase B. Están fabricados con especificaciones más rigurosas tanto físicas como químicas, por ello son productos más uniformes.

2.5.7. Cemento clase J

Se quedó en fase de experimentación y fue diseñado para usarse a temperatura estática de 351°F de 16.000 ft de profundidad, sin necesidad del empleo de arena sílica, que evite la regresión de la resistencia a la compresión. En la tabla 2.2 se detalla propiedades importantes de los cementos API de acuerdo a su clasificación.

Tabla 2. 2 Clasificación API del Cemento.

Clase de Cemento	Requerimiento de agua (gal/sk)	Densidad de la mezcla (lb/gal)	Profundidad recomendada (ft)	Temperatura estática (°F)
A	5,2	15,6	6.000	60-170
B	5,2	15,6	6.000	60-170
C	6,3	14,8	6.000	60-170
D	4,3	16,4	12.000	170-230
E	4,3	16,4	14.000	170-230
F	4,3	16,4	16.000	230-320
G	5,0	15,8	10.000	60-200
H	4,3	16,4	10.000	60-200
J	-	-	16.000	351

Fuente: Ingeniería de cementaciones, BJ Cervices Company

2.6. PROPIEDADES FISICAS DE LOS CEMENTOS

Las propiedades de los cementos usados en diferentes campos de petróleos varían de acuerdo a los siguientes factores:

- Ubicación geográfica
- Condiciones del fondo del pozo
- Tipo de trabajo de cementación
- Tipo de lechada

Las propiedades del cemento pueden ser modificadas mediante la utilización de aditivos y así cumplir los requerimientos para realizar un trabajo en particular.

Los cementos de clasificación API tienen propiedades físicas específicas para cada clase de cemento, mismas que básicamente definen sus características.

Algunas de sus propiedades físicas son:

2.6.1. Gravedad específica (Ge)

Denota el peso por unidad de volumen, sin tomar en consideración otros materiales, tales como el aire o el agua, es decir el peso en gramos del cemento específicamente; sus unidades g/cm^3 , kg/L , ton/m^3 .

2.6.2. Peso volumétrico (PV)

Denota el volumen por unidad de masa. Se toma en consideración el aire contenido entre los gramos de cemento; sus unidades g/cm^3 , kg/L , ton/m^3 .

2.6.3. Finezas de los granos del cemento

Indica el tamaño de los granos del cemento. Su mayor influencia se da sobre el requerimiento de agua para la preparación de la lechada. Esta característica es un factor determinante, pero no único, para la clasificación de los cementos.

Sus unidades son cm^2/g , m^2/kg . Representa el área expuesta al contacto con el agua y se determina como una función de permeabilidad al aire.

2.6.4. Requerimiento de agua normal

Es el agua necesaria para la lechada con cemento solo. Debe dar 11 unidades de consistencia Bearden (Bc) a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

2.6.5. Requerimiento de agua mínima

Denota el agua necesaria para la lechada de cemento. Debe dar 30 Bc a los 20 minutos de agitarse en el consistómetro de presión atmosférica a temperatura ambiente; se expresa en por ciento por peso de cemento.

2.6.6. Densidad de la lechada

Es la relación entre la masa de la lechada de cemento y su volumen, y está en función de la cantidad de agua requerida; sus unidades g/cm^3 , lb/gal , ton/m^3 .

2.7. PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de los materiales se refieren a la capacidad de los mismos de resistir acciones de cargas o fuerzas. Podemos decir que las propiedades mecánicas se clasifican en: Por acción:

- **Estáticas:** Las cargas o fuerzas actúan constantemente o creciendo poco a poco.
- **Dinámicas:** Las cargas o fuerzas actúan momentáneamente, tienen carácter de choque.
- **Cíclicas o de signo variable:** Las cargas varían por valor, por sentido o por ambos simultáneamente.

Las propiedades mecánicas principales son: dureza, resistencia, elasticidad, plasticidad y resiliencia, aunque también podrían considerarse entre estas a la fatiga y la fluencia.

- **Cohesión:** Resistencia de los átomos a separarse unos de otros.
- **Plasticidad:** Capacidad de un material a deformarse ante la acción de una carga, permaneciendo la deformación al retirarse la misma. Es decir, es una deformación permanente e irreversible.
- **Maleabilidad:** Facilidad a deformarse en láminas. Es una variación plástica ante la aplicación de carga o fuerza.
- **Ductilidad:** Facilidad a deformarse en hilos.
- **Dureza:** es la resistencia de un cuerpo a ser rayado por otro. Opuesta a duro es blando. El diamante es duro porque es difícil de rayar. Es la capacidad de oponer resistencia a la deformación superficial por uno más duro.

- **Resistencia:** Se refiere a la propiedad que presentan los materiales para soportar las diversas fuerzas. Es la oposición al cambio de forma y a la separación, es decir a la destrucción por acción de fuerzas o cargas.
- **Elasticidad:** Se refiere a la propiedad que presentan los materiales de volver a su estado inicial cuando se aplica una fuerza sobre él. La deformación recibida ante la acción de una fuerza o carga no es permanente, volviendo el material a su forma original al retirarse la carga.
- **Higroscopicidad:** se refiere a la propiedad de absorber o exhalar el agua
- **Hendibilidad:** Es la propiedad de partirse en el sentido de las fibras o laminas.
- **Resiliencia:** Es la capacidad de oponer resistencia a la destrucción por carga dinámica.

2.8. PROPIEDAD ELASTICA

2.8.1. MODULO DE YOUNG

Cuando a un cuerpo se le aplica una fuerza, este normalmente reacciona contra esa fuerza deformadora, dado que tiende a tener una forma estable debido a su estructura molecular. Estas fuerzas de reacción suelen llamarse elásticas, y podemos clasificar los cuerpos según el comportamiento frente a la deformación.

Muchos cuerpos pueden recuperar su forma al desaparecer la acción deformadora, otros cuerpos no pueden recuperar su forma después de la deformación y son los llamados plásticos. Evidentemente un cuerpo es elástico hasta cierto punto, más allá de un valor determinado de la fuerza deformadora, la estructura interna del material queda tan deteriorada que le es imposible recuperarse. Hablaremos tanto, de un límite elástico y más allá de un límite de ruptura, sobre la cual se deteriora completamente la estructura del material, rompiéndose.

Robert Hooke estableció una ley fundamental que relaciona la fuerza aplicada y la deformación producida. Para deformaciones que no sean muy grandes, es decir, que no superen el límite elástico, que cumple que:

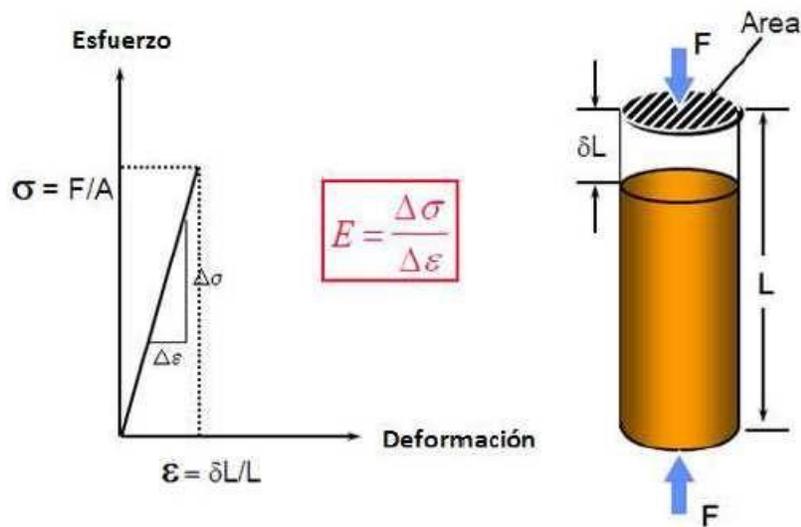
$$F = K \cdot x$$

2.1

Dónde: F es la fuerza deformadora aplicada y x es la deformación relativa.

Por lo tanto, el módulo de Young o módulo de elasticidad, es determinado por el cambio en la longitud de un material que resulta cuando el material está sujeto a una fuerza de tensión o de compresión. Este módulo es básicamente una medida de la rigidez del material.

Figura 2. 3. Módulo de Young



Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Bj Services Company

Donde:

- E : Es el módulo de elasticidad secante.
- $\Delta\sigma$: Es la variación del esfuerzo aplicado
- $\Delta\epsilon$: Es la variación de la deformación unitaria

Entonces cuando un material tiene un módulo de elasticidad grande, posee también una rigidez relativamente grande, es decir que lo que debemos obtener en relación a nuestro análisis es que los cementos a diseñar tengan módulos de Young menores a los que se tiene con los cementos convencionales.

2.8.2. MODULO O RELACIÓN DE POISSON

Siempre que un cuerpo se somete a la acción de la fuerza, se deformará en la dirección de la fuerza. Sin embargo, siempre que se producen deformaciones en la dirección de la fuerza aplicada, también se producen deformaciones laterales.

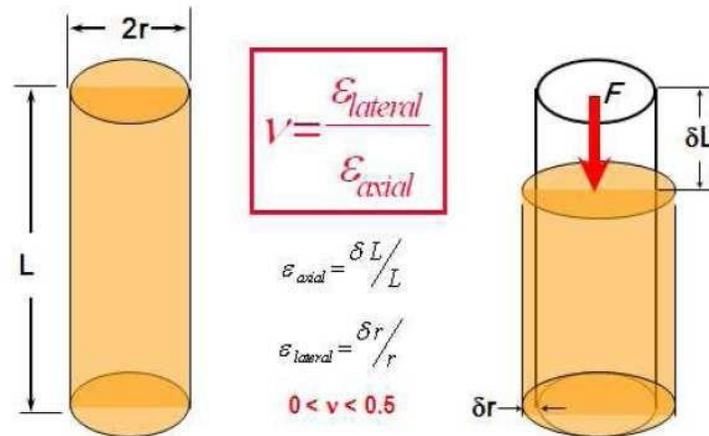
Las deformaciones laterales que se producen tienen una relación constante con las deformaciones axiales o longitudinales. Mientras que el material se mantenga dentro del rango elástico de esfuerzos, esta relación es constante:

$$\nu = \frac{\text{deformación lateral}}{\text{deformación axial}} \quad 2.2$$

En general, el valor de ν está comprendido entre 0 y 0.5 pero para la mayoría de los materiales está entre 0.25 y 0.35. La única excepción es cuando se impide que se efectúe libremente el movimiento lateral.

Un material que, bajo un esfuerzo, se deforma lateralmente tanto como lo hace longitudinalmente debería tener una relación de Poisson de 0.5, si un material no se deforma lateralmente bajo una carga longitudinal debería tener una relación de Poisson de 0.

Figura 2. 4. Relación de Poisson



Fuente: Documento técnico, Mecánica de rocas, Boj Services Company

Donde:

ν : Es el cociente de Poisson de la deformación

$f_{lateral}$: Es la deformación transversal

f_{axial} : Es la deformación axial

En la industria petrolera, específicamente en la cementación de pozos, el cemento es confinado dentro de un pozo entre el casing y la formación, por lo tanto; lo que nos interesa es conseguir módulos de Poisson altos ya que estos soportan mayores cargas.

2.9. PROPIEDADES DE LA LECHADA DE CEMENTO

Una vez realizado el estudio de las propiedades mecánicas que afectan la integridad del cemento a lo largo de su vida útil, el siguiente paso es elaborar una lechada de cemento y someterla a las diferentes pruebas de laboratorio, que nos permiten simular y determinar los esfuerzos a los que estará expuesto en el pozo.

Los resultados de las pruebas nos permitirán conocer si la lechada es óptima y aplicable para un pozo en particular.

2.10. ADITIVOS

La temperatura y presión a la cual está sometido un pozo, son algunos de los parámetros que influyen en el diseño de una lechada que sea capaz de adecuarse a las condiciones de un pozo específico. Para adecuarlas existen compuestos que se agregan a la mezcla y que modifican las propiedades de la misma. A estos compuestos se les llama aditivos, que permiten que la lechada llegue a la zona de interés, y que el cemento cumpla con la función para la cual fue diseñado.

A continuación, se mencionarán algunos de los aditivos más utilizados en la industria petrolera.

2.10.1. ADITIVOS PARA LECHADAS DE CEMENTO CONVENCIONALES

Este tipo de aditivos son utilizados para obtener lechadas de cemento que nos permitan cubrir los requerimientos de un pozo.

Las características más comunes a ser afectadas por estos aditivos son:

- Densidad
- Resistencia a la compresión
- Propiedades de fluido (reología)
- Agua libre
- Pérdida de fluido
- **Aceleradores**

Los aditivos aceleradores de cemento cumplen con la función de acortar el tiempo de fraguado y reducir el tiempo de espera para el fraguado del cemento (WOC).

Los aceleradores son ampliamente usados en tuberías superficiales, pozos poco profundos y tapones de cemento. Los más comunes son:

Cloruro de calcio (CaCl_2)

- El más comúnmente usado
- De un 2 a 4% por peso de cemento
- Resiste temperatura circulante de 50 a 100 °F

- En bajas concentraciones disminuye la viscosidad
- Incrementa la viscosidad y la pérdida por filtrado a altas concentraciones

Cloruro de sodio (NaCl)

- Resiste temperaturas circulantes de 50 a 120 °F
- 1 a 5% por peso de cemento
- Incrementa pérdida por filtrado
- Reduce la viscosidad

- Densificantes

El propósito de los densificantes es el contrarrestar altas presiones de formación. Estos aditivos son utilizados para obtener lechadas con densidades mayores a 18 lb/gal las cuales tienen un bajo requerimiento de agua y tienen tamaño de partícula uniforme. Los densificantes son aditivos químicamente inertes y compatibles con otros aditivos.

Barita

- Requiere agua adicional de mezcla (0.0264 gal/lb)
- Resiste temperaturas de 80 a 500 °F
- Puede causar asentamiento e incremento de la viscosidad
- Reduce la resistencia a la compresión.

- Retardadores

En algunos pozos profundos y de altas temperaturas, el fraguado puede ocurrir antes de llegar a la zona de interés; para evitar esto, se agregan retardadores que hacen que la lechada fragüe en tiempos más largos; aunque reducen la resistencia a la compresión.

Algunas de las características que pueden tener este tipo de aditivos son:

- Ambientalmente amigable
- Buen desarrollo de resistencia temprana
- Mejora el control de filtrado a altas temperaturas
- Resiste un rango de temperatura de 80 a 220 °F

- Concentraciones de entre 0.1 a 2% BWOC
- **Controladores de pérdida de fluido**

Este tipo de aditivos tiene como propósito evitar la deshidratación de la lechada de cemento durante el bombeo cuando pasa frente a zonas permeables, donde se presenta el proceso de filtración.

Estos aditivos funcionan evitando el flujo de agua desde la lechada hacia la formación.

Algunas características de estos aditivos son:

- Efectivo a altas temperaturas
- Biodegradable
- Resiste temperaturas de entre 100 y 400 °F
- Viscosifica ligeramente
- **Dispersantes o retardadores de fricción**

Este tipo de aditivos son diseñados para mejorar la lechada de cemento y mejorar las propiedades de flujo. Bajan la viscosidad y pueden ser bombeados en régimen turbulento a bajas presiones. Con esto se minimiza la potencia requerida y se disminuyen las posibilidades de pérdida de circulación y deshidratación prematura.

Algunas de las propiedades que poseen estos aditivos son:

- Reduce la viscosidad aparente y mejora las propiedades reológicas
- Concentraciones entre 0.3-1% BWOC
- Resiste un rango de temperatura mayor a 60°F
- Biodegradable
- Puede producir segregación
- **Controlador de gas**

Una de las preocupaciones es la migración de gas a través del cemento. Las lechadas de cemento son capaces de transmitir presión hidrostática y mantener el control de presiones mientras está en estado fluido. El cemento tiende a tomar una consistencia de gel cuando se encuentra en estado estático y antes de endurecerse podría también perder una cantidad

pequeña de filtrado en zonas porosas resultado de una reducción de volumen. El camino de esta migración de gas es permanente y existe incluso después de que el cemento se haya endurecido totalmente.

Para combatir este problema se adicionan a la lechada este tipo de aditivos con la finalidad de minimizar el tiempo en el que el cemento se encuentra en estado de gel.

Algunas de las propiedades de este aditivo son:

- Resiste temperaturas entre 60 y 230°F
- Disminuye la pérdida de filtrado
- Aumenta ligeramente la viscosidad
- **Antiespumantes**

Este tipo de aditivos es utilizado para evitar la formación de espuma, la cual aparece durante la agitación mientras se está preparando la lechada de cemento. Este aditivo es capaz de funcionar a altas temperaturas.

Algunas de las propiedades de estos aditivos:

- Ayuda a controlar la formación de espuma en las lechadas de cemento
- Puede emplearse en cementos con látex
- Concentraciones de 0.005 gal/sk

2.11. ADICIÓN DE COMPUESTOS QUÍMICOS AL CEMENTO PARA GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS

Después de una importante investigación acerca de la cementación de pozos petroleros se introduce la utilización de nuevos componentes para la elaboración de lechadas.

Un compuesto importante para esta nueva lechada es la fibra de polipropileno, utilizada comúnmente en la construcción. Esta fibra se agrega al concreto y forma una red de refuerzo tridimensional que se distribuye uniformemente y detiene la formación de grietas microscópicas causadas tanto por la migración de agua de la exudación a la superficie como por la contracción del concreto.

Funciona sin afectar la hidratación química del cemento, su acción es mecánica y no química, por lo que es apropiada para cualquier diseño de lechada, o para utilizarla con otros aditivos.

La fibra de polipropileno proporciona resistencia en grandes construcciones y mejora las propiedades del cemento, es donde surge la idea de utilizarla en la cementación de pozos y generar el mismo tipo de resistencia obtenido en construcciones para evitar fallas y pérdidas durante la vida del pozo.

Otro compuesto del cual se analizó su comportamiento fue la resina de poliuretano, la cual es utilizada en la fabricación de suela de zapato, haciéndola un material resistente y de larga duración.

Se obtiene por un proceso de condensación entre dos monómeros complementarios, o estableciendo enlaces entre uretanos y poliésteres. Se pueden lograr tres tipos distintos de resinas: rígidas, muy duras, lustrosas, indicadas para recubrimientos que deban presentar una elevada resistencia a los disolventes; las blandas y elásticas, en forma de cauchos resistentes a la abrasión; y la espuma que puede ser flexible o rígida.

La resina de poliuretano resiste temperaturas entre 180 y 320°C, lo cual la hace ideal para las temperaturas registradas en el interior del pozo.

Al utilizar estos dos compuestos se pretende desarrollar un sistema capaz de modificar el Módulo de Young de la lechada convencional entre otras propiedades, para evitar las posibles fallas del cemento; asegurando y alargando la vida productiva del pozo.

2.11.1. FIBRA DE POLIPROPILENO

Son fibras de monofilamentos de polipropileno, es un material elastomérico el cual modifica las propiedades mecánicas del cemento fraguado. Afecta principalmente al Módulo de Young y Relación de Poisson.

Aplicaciones

- Las operaciones de cementación primaria o de rehabilitación en la pérdida de circulación
- Pérdida de las operaciones de compresión de la circulación o el enchufe.

- Alta permeabilidad o fracturado de formaciones.

Tabla 2. 3 Ficha Técnica de la Fibra de polipropileno.

Aspecto	Fibra blanca
Rango de temperatura	Hasta 300°F (149°C) BHST
Rango de densidades de mezcla	12,5 A 16,5 puntos por partido (1498 a 1977 kg/m ³)
Intervalo de concentraciones	1/8 a 1/2 lb./sk (0,056 hasta 0,23 kg/sk)
Peso específico	0.92
Densidad aparente	15.0 lb/ft ³ (240,3 kg/m ³)
Volumen absoluto	0,1303 gal/lb (1,0874 L)
Tamaño de las partículas	1/2 pulgada (13 mm) de largo, 18 micras de diámetro.

Fuente: Roka® Fibra Gunita P, Fibra de Polipropileno Para Shotcrete, 2013

Ventajas:

- Reduce considerablemente la formación de grietas o fisuras (en un 76.6%)
- Hace que el concreto sea menos permeable, las fibras interrumpen la formación de capilares continuos en el concreto durante su proceso de secado haciéndolo menos permeable.
- Son fáciles de mezclar porque tienen mono filamentos cuya característica de concentración las hace perfectas para bombear y pulverizar sin obstruir el pulverizado o bombeado.
- Reduce la migración del agua a la superficie.
- Las fibras de polipropileno no son metálicas, esto evita la corrosión por la humedad y formación de hongos.

- No altera de forma apreciable las propiedades de la mezcla de cemento.
- Puede ayudar a soportar las cargas cíclicas de cemento y ayuda a prevenir la migración de gas.

Figura 2. 5 Fibra de polipropileno



Fuente: Roka® Fibra Gunita P, Fibra de Polipropileno Para Shotcrete, 2013

2.11.2. RESINA DE POLIURETANO

La resina de poliuretano se conoce como “spandex” como un nombre genérico. La propia resina es elástica y fuerte como el caucho, resistente al envejecimiento la cual es una de las propiedades que buscamos para la durabilidad del pozo.

Tabla 2. 4 Ficha técnica de la Resina de Poliuretano.

Aspecto	Líquido
Color	Beige o blanco
Densidad a 20°C	1.47 ± 0.5 g/cm ³
pH (1:1 solución acuosa)	2.7 ± 0.5
Viscosidad	750 ± 2.5 MPa
Estabilidad térmica	+5°C a 35°C
Contenido de cloruros	< 0.1%

Fuente: D.S. Ingeniería, 2018

Ventajas

- Brinda elasticidad y cuerpo a la lechada de cemento.
- Es resistente a altas temperaturas.
- Es resistente a la abrasión
- Buena durabilidad y resistencia final
- Es un producto líquido y por ello es de fácil manejo, facilitando la dosificación en el concreto
- Proporciona excelente penetración en microfisuras
- Es resistente a hongos, gases y químicos.

Usos

- En construcción de carreteras y puentes, ya que brinda soporte.

Figura 2. 6 Resina de poliuretano



Fuente: D.S. Ingeniería, 2018

CAPITULO 3

PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO SEGÚN API RP 10B

3.1. PREPARACION DE LA LECHADA DE CEMENTO

3.1.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO

Sustancias:

- 1 kg de cemento de Construcción (Cemento Normal o Portland).
- 1 litro de agua.
- Ningún aditivo a utilizar.

Material y equipo necesario:

- Frasco de vidrio con tapa plástica con capacidad de 1 kg, o bolsa de plástico.
- Cucharón de plástico para cementos.
- Espátula de acero.
- Cuchara metálica de acero inoxidable.
- Mezcladora Chandler.
- Balanza granataria o mecánica.
- Jeringa.
- Guantes y cubre bocas
- Jarra de plástico con capacidad para 2 lt.
- Bata para protección y Goggles de seguridad.

La evaluación correcta de los materiales no es posible a menos que la prueba sea desarrollada usando una muestra representativa de los mismos. El empleo de métodos apropiados de almacenamiento es particularmente importante para prevenir la exposición del cemento a la humedad y/o al bióxido de carbono en el aire.

La preparación de lechadas de cementos varía según la relación sólido/líquido empleada en la mezcla, debido a la naturaleza propia del cemento. El tiempo y la velocidad de corte son factores importantes en el mezclado de lechadas de cemento. Se ha demostrado que el

desarrollo de las propiedades de la lechada, se ve afectado si se hacen variar estos parámetros. El procedimiento descrito es recomendado para la preparación de lechadas en el laboratorio, que no requieran condiciones especiales de mezclado.

Esta prueba es básica, ya que la facilidad con la que se mezcle la lechada a condiciones de laboratorio es un indicativo de la facilidad o dificultad con la que se realizará la mezcla de cemento, agua y aditivos durante la cementación en campo.

3.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

Balanza electrónica

El peso indicado en la pantalla de la balanza deberá tener una exactitud de + 0.1 por ciento del peso indicado y deberá tener la capacidad necesaria para pesar por lo menos 1.5 kg. La balanza deberá ser calibrada con suficiente frecuencia para asegurar su precisión, como mínimo, una vez al año.

Figura 3. 1 Aditivos especiales (deben ser pesados en una balanza digital), empleados en la formulación de diseños de lechadas.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

Balanza granataria o Mecánica

Al igual que la balanza electrónica, esta deberá tener una exactitud de + 0.1 por ciento del peso indicado.

Figura 3. 2 Balanza Granataria y Digital.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

Mezcladora Chandler

La mezcladora utilizada en la preparación de lechadas debe tener un vaso con capacidad de 0.95 L (¼ de gal), rotor en el fondo y espas tipo licuadora.

El vaso de mezclado, así como las espas, deberán estar contruidos de algún material resistente a la corrosión. El ensamble de mezclado deberá estar contruido de tal manera que las espas puedan ser retiradas fácilmente de éste. Debido a que las lechadas de cemento son muy abrasivas, es esencial un cuidadoso monitoreo de las condiciones de las espas; por tal razón, éstas deberán retirarse del ensamble y ser pesadas antes de su uso; en caso de que hayan perdido el 10% de su peso original deberán ser reemplazadas por unas nuevas. Las espas también deberán ser inspeccionadas visualmente para detectar algún daño, para reemplazarlas en caso necesario. Durante el proceso de mezclado, el vaso deberá ser observado para detectar posibles fugas. Si fuese el caso, deberá ser descargado el contenedor, y desecharse la mezcla para reparar el daño y reiniciar el proceso.

Figura 3. 3 Mezcladora Chandler con vaso de Mezclado.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

3.1.3. PROCEDIMIENTO

Cálculos de la Densidad y el Volumen en el Laboratorio.

Un volumen de lechada de aproximadamente 600 ml debe ser suficiente para desarrollar la mayoría de las pruebas de laboratorio sin sobrellenar el vaso de mezclado.

Los requerimientos de laboratorio para la mezcla pueden ser calculados usando las siguientes fórmulas.

$$V_s = V_c + V_w + V_a \quad 3.1$$

$$M_s = M_c + M_w + M_a \quad 3.2$$

$$D_s = \frac{M_c}{V_s} \quad 3.3$$

$$V_c = \frac{M_c}{D_c} \quad 3.4$$

$$V_w = \frac{M_w}{D_w} \quad 3.5$$

$$V_a = \frac{M_a}{D_a} \quad 3.6$$

Donde:

V_s = volumen de la lechada (ml)

V_c = volumen de cemento (ml)

V_w = volumen de agua (ml)

V_a = volumen de aditivos (ml)

D_s = densidad de la lechada (gr/ml)

M_s = masa de la lechada (gr)

M_c = masa del cemento (gr)

M_w = masa del agua (gr)

M_a = masa del aditivo (gr)

Con el propósito de realizar estos cálculos, se asume que la gravedad específica es igual a la densidad en gr/cm³.

Temperatura del Agua y el Cemento

La temperatura del agua de mezcla, el cemento seco o mezclado; así como la de los instrumentos utilizados para la mezclarlos, deben ser representativas de las condiciones de mezcla en el campo. Si se desconocen dichas condiciones, la temperatura del agua de mezcla y el cemento seco debe ser de 22.8 ± 1.1 °C (73 ± 2 °F) inmediatamente antes de mezclar. Cuando la prueba se realiza con fines de investigación, la temperatura de agua de mezcla y cemento seco deberán medirse y documentarse.

Agua de Mezcla

La composición del agua puede afectar el desempeño de la lechada. Para la preparación de ésta deberá utilizarse el agua que se usará para prepararla en el campo. Si el agua del campo no está disponible, se deberá usar un agua de composición similar. Si se desconoce la composición del agua de campo, deberá utilizarse agua des ionizada, agua destilada o agua blanda. El agua de mezcla y cualquier aditivo líquido deberá medirse en un vaso de mezclado limpio y seco. No debe añadirse una cantidad adicional de agua para compensar la evaporación o la humedad.

Mezclado de Cemento y Agua

Los materiales secos a utilizar en la preparación de la lechada deben ser pesados y mezclados uniformemente en un recipiente con tapa, o en una bolsa de plástico que impida la salida de material cuando se agiten manualmente, antes de ser añadidos al fluido de la mezcla. Para realizar el control de calidad de una muestra de cemento tipo H debe elaborarse una lechada que contenga 861 ± 0.5 gr de cemento y 327 ± 0.5 gr de agua.

El vaso de mezclado con el peso requerido de agua y aditivos líquidos debe colocarse en la base de la mezcladora, verificando que se encuentre con su tapa en la posición correcta a efecto de que no se derrame líquido cuando inicie el movimiento de rotación de las aspas. Realizado lo anterior, se debe activar el control de encendido y asegurarse que el control de velocidad esté en automático y que esté activado el botón de la velocidad de mezclado 1. El motor debe encenderse a $4,000 \pm 200$ rpm (velocidad de mezclado 1), al mismo tiempo, debe activarse el cronómetro de la mezcladora. Si existen aditivos líquidos en el agua de mezcla, agitar a la velocidad rotacional mencionada para dispersarlos completamente antes de añadir el cemento con los aditivos sólidos.

En ciertos casos, el orden de adición de los aditivos en el agua de mezcla puede ser crítico, por esta razón, los procedimientos y tiempos especiales de mezclado deberán documentarse. Una vez que los aditivos líquidos están perfectamente dispersos, se debe retirar la tapa del vaso. Concluido lo anterior, el cemento o la mezcla de cementos y aditivos secos deberán añadirse al vaso de la mezcladora cuando ésta se encuentre a la velocidad constante de mezclado 1, en no más de 15 segundos si es posible. Algunos diseños de lechadas pueden requerir un tiempo mayor para mojar completamente la mezcla de cemento y aditivos secos, sin embargo, el tiempo requerido para añadir la mezcla debe reducirse al mínimo.

Cuando todos los aditivos secos se han añadido al agua de mezcla, debe colocarse nuevamente la tapa del vaso mezclador. Acto seguido, la velocidad de agitación se incrementa a $12,000 \pm 500$ rpm (velocidad de mezclado 2) por 35 ± 1 segundos.

Figura 3. 4 Mezcladora Chandler con la lechada mezclándose > 12,000 rpm.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

Una vez que se alcanzan los 50 segundos en el cronómetro de la mezcladora, el motor se desactiva. Debe oprimirse el botón de velocidad de mezcla 1 y apagar el control maestro de la mezcladora.

3.2. DENSIDAD DE UNA LECHADA DE CEMENTO

3.2.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO

Sustancias:

- 1 kg de cemento Clase H (Cemento Petrolero clasificación API).
- 1 litro de agua.
- Ningún aditivo a utilizar.

Material y equipo necesario:

- Frasco de vidrio con tapa plástica con capacidad de 1 kg, o bolsa de plástico.
- Cucharón de plástico para cementos.
- Espátula de acero.
- Cuchara metálica de acero inoxidable.

- Mezcladora Chandler.
- Balanza granataria o mecánica.
- Guantes, Jeringa y cubre bocas.
- Balanza presurizada para cementos.
- Jarra de plástico con capacidad para 2 lt.
- Bata para protección y Goggles de seguridad.

La densidad es una de las propiedades más importantes de una lechada de cemento, ya que de ella depende la presión hidrostática que se ejerza sobre la formación. En zonas de baja presión de formación, deberá ser lo suficientemente ligera para no fracturar o causar daño a la formación; y en zonas con alta presión de poro, deberá generar la presión hidrostática necesaria para controlar la presión de formación, impidiendo que la formación aporte fluidos sin que se genere un daño. La densidad de la lechada debe ser igual o ligeramente superior a la del fluido de perforación, considerando no rebasar el gradiente de fractura.

El incremento de la densidad se logra empleando un agente densificante de alto peso específico que no requiera la adición de agua, tal como la hematita y la limadura de fierro. Otro material densificante es la barita, sulfato de bario, el cual es empleado comúnmente en los lodos de perforación para darle peso al fluido; pero para usarlo en las lechadas es poco recomendable por su bajo grado de pureza. Estos materiales densificantes se emplean a porcentajes relativamente altos con respecto a los aditivos comunes, siempre calculando que se tenga el peso de lechada deseado mediante balance de materiales. También se puede efectuar el incremento de densidad mediante la disminución del agua de mezcla. En estos casos, se incrementa el porcentaje del agente dispersante para contrarrestar el incremento de la viscosidad.

3.2.2. EQUIPO RECOMENDADO

El método recomendado para determinar la densidad de una lechada de cemento se lleva a cabo utilizando la balanza presurizada para densidad de fluidos. Este aparato es de operación similar a la balanza de lodos convencional, la diferencia estriba en que la lechada puede ser colocada en una copa para muestra de volumen fijo bajo presión.

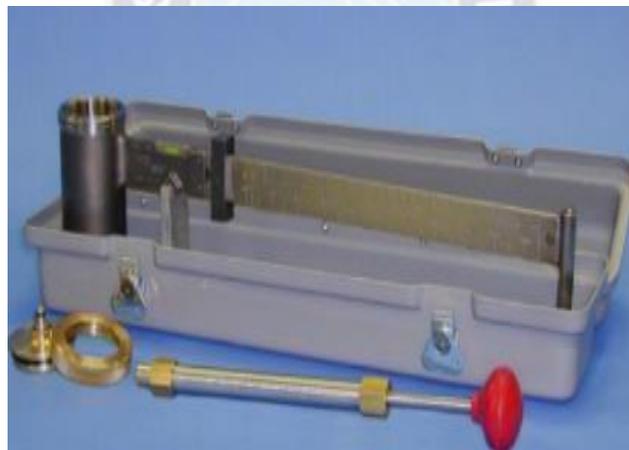
Calibración

El aparato debe ser verificado para calibración colocando agua o un fluido más pesado de densidad conocida en la copa, o introduciendo en ésta pesos manufacturados para densidades equivalentes.

3.2.3. PROCEDIMIENTO

La lechada debe prepararse siguiendo el procedimiento descrito en la práctica número 1 de este manual, pero con la diferencia que ahora se trabajara con cemento clase H (Clasificación API), tomando en cuenta y de manera cautelosa los parámetros de: requerimiento de agua normal (por ciento de agua) y gravedad específica del cemento H que deberán ser proporcionados.

Figura 3. 5 Balanza presurizada para Lechadas de Cemento.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

La lechada debe colocarse en la copa de la balanza para lodos y de esta manera cerrar con la tapa dejando que el exceso salga por el orificio que se encuentra en la parte superior.

Una vez la lechada es colocada dentro la copa, se procede a medir la densidad mediante la regla fijada haciendo un equilibrio con el peso para determinar la densidad de la lechada.

La figura 3.6 muestra el equipo completo de la balanza utilizada para la medición de la lechada de cemento.

Figura 3. 6 Medición de la densidad en la Balanza de Lodos Presurizada.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

3.3. EFECTO DE AGUA LIBRE EN UNA LECHADA DE CEMENTO

3.3.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO

Sustancias:

- 1 kg de cemento de Construcción (Cemento Normal o Portland).
- 1 litro de agua.
- Ningún aditivo a utilizar.

Material y equipo necesario:

- Frasco de vidrio con tapa plástica con capacidad de 1 kg, o bolsa de plástico.
- Cucharón de plástico para cementos.
- Espátula de acero.
- Cuchara metálica de acero inoxidable.
- Mezcladora Chandler.
- Balanza granataria o mecánica.
- Jeringa.
- Guantes y cubre bocas
- Jarra de plástico con capacidad para 2 lt.
- Goggles de Seguridad

- Probeta de plástico graduada de 250 ml.
- Porción de bolsa de plástico (para tapar la boca de la probeta).
- 1 liga o cinta (de aislar o masking tape)
- Bata para protección.

En los procedimientos del API se incluye una prueba para determinar el volumen de agua libre. Cuando la lechada se deja en reposo, el agua libre se recolecta en la parte superior de la lechada como resultado de la precipitación de partículas de cemento dentro de la lechada. Conforme se sedimentan las partículas, estas tienden a puentearse. Justo debajo de cualquier área de puenteo, se encuentra una grieta o hendidura que no contiene partículas de cemento, las cuales permanecen después de que el cemento ha fraguado. Si hay un gran número de ellas en la columna de cemento, formaran un canal que puede causar que el cemento ya fraguado falle cuando sea sometido a presión.

3.3.2. PROCEDIMIENTO

La lechada de cemento debe prepararse como se describe en el apartado 3.1.

3.3.3. ACONDICIONAMIENTO DE LA LECHADA

PRUEBA DE AGUA LIBRE CON PERIODO ESTÁTICO, A TEMPERATURA AMBIENTE

Colocar 250 ml de lechada previamente acondicionada, dentro de una probeta de vidrio graduada de 250 ml. La porción graduada de 0 a 250 ml no deberá tener menos de 232 ni más de 250 mm de longitud, con incrementos de graduación de por lo menos 2.0 ml.

La lechada debe agitarse con una espátula mientras se vacía en la probeta, para asegurarse de que sea uniforme. El periodo de prueba de 2 horas inicia cuando la lechada es vaciada dentro de la probeta. La boca de la probeta debe sellarse con una película de plástico o un material equivalente para prevenir la evaporación, y puede inclinarse para simular la desviación del pozo. Se deben tomar las precauciones necesarias para que la probeta quede libre de todo tipo de vibraciones.

Después de 2 horas, medir el agua libre (clara o turbia) que quede en la cima de la lechada). La medición del volumen de agua libre deberá hacerse con una precisión de ± 2 ml.

Figura 3. 7 Prueba de agua libre en pozos verticales y a 45°.

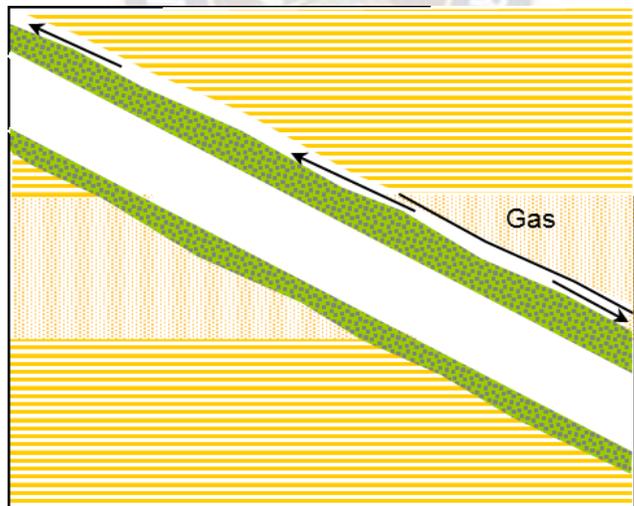


Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

El porcentaje de agua libre se calcula con la siguiente formula:

$$\% \text{ de Agua Libre} = \frac{(\text{ml de agua libre})(100)}{\text{ml de lechada}} \quad 3.9$$

Figura 3. 8 Efectos de Agua Libre en diferentes pozos.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

3.4. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE UNA LECHADA DE CEMENTO

3.4.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO

Sustancias:

1 kg de cemento Clase H (Cemento Petrolero clasificación API).

1 litro de agua.

Ningún aditivo a utilizar.

Material y equipo necesario:

- Frasco de vidrio con tapa plástica con capacidad de 1 kg, o bolsa de plástico. Cucharón de plástico para cementos.
- Espátula de acero.
- Cuchara metálica de acero inoxidable. e) Mezcladora Chandler.
- Balanza granataria o mecánica. g) Jeringa.
- Guantes y cubre bocas
- Jarra de plástico con capacidad para 2 lt. j) Consistómetro Atmosférico 165 AT.
- Viscosímetro Rotacional FANN 35a con resorte #1. l) Cronómetro o temporizador.
- Termómetro de Hg.
- Bata para protección y Goggles de seguridad.

Las lechadas de cemento son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua. El contenido de sólidos en una lechada de cemento puede llegar hasta un 70%. La reología de la lechada de cemento está relacionada con la del líquido de soporte, la fracción volumétrica de los sólidos (volumen de partículas/volumen total) y la interacción entre las partículas. Por lo tanto, la reología de la lechada difiere de la reología del agua. Los sólidos en una lechada están en función directa a su densidad.

Cuando se mezclan cemento en polvo y agua, se forma una estructura de gel en toda la lechada, que impide flujos con esfuerzo cortante menor al esfuerzo de corte dado por el valor de cedencia. Esto es resultado de la interacción electrostática entre las partículas. A esfuerzos

de corte menores al valor de cedencia, la lechada se comporta como un sólido. Esto puede originar algunas deformaciones finitas de compresión o, eventualmente, de deslizamiento; pero no fluye.

Experimentalmente, las curvas de esfuerzo cortante y velocidad de corte son aproximadamente lineales; la pendiente de la línea es la viscosidad plástica y su ordenada al origen es el valor de cedencia. Sin embargo, la viscosidad aparente; representada por la relación entre el esfuerzo de corte/velocidad de corte, no es una constante; en su lugar ésta disminuye con el incremento del esfuerzo de corte.

Una vez que el valor de cedencia es rebasado, la lechada ya no se comporta como unidad; se rompe en partes y agregados de partículas que se mueven entre unas y otras. Estos agregados contienen agua intersticial, lo que da como resultado que el volumen efectivo de la fase dispersa sea mayor que el volumen de los granos de cemento. El volumen de la fase dispersa es el factor clave para determinar la reología de la dispersión.

3.4.2. EQUIPO

El equipo que debe utilizarse para determinar las propiedades reológicas de las lechadas de cemento es el viscosímetro rotacional. Con este tipo de viscosímetro, la muestra es confinada entre dos cilindros concéntricos de radios R_1 y R_2 ($R_2 > R_1$), uno de los cuales, el rotor, está girando a una velocidad rotacional constante Ω . El movimiento del rotor en presencia de una muestra de lechada produce un torque que generalmente es medido en la pared del cilindro interior; pero también predomina en la pared del cilindro exterior. El radio del cilindro deberá ser tal que la muestra sea homogénea, y el esfuerzo de corte sea tan uniforme como sea posible.

Descripción y especificaciones de un viscosímetro rotacional típico

Este viscosímetro es un instrumento de indicación directa movido por un motor, con o sin una caja reductora de velocidades. El cilindro exterior o camisa está girando a una velocidad rotacional constante para cada una del rpm (r/s). La rotación de la camisa sobre la lechada de cemento produce una deflexión sobre la cara interior de ésta, que a su vez es transmitida al bob o péndulo. La torsión de un resorte reprime el movimiento del péndulo, y un disco con

escala, sujeto al resorte, mide el desplazamiento del péndulo. Las especificaciones son las siguientes:

Camisa

Diámetro interior: 36.83 mm (1.450 pg).

Longitud total: puede variar ligeramente según el fabricante.

Línea grabada 58.4 mm (2.30 pg) arriba del fondo.

Dos líneas de agujeros de 3.18 mm (1/8 de pg), espaciados 120 grados (2.09 radianes) alrededor de la camisa rotatoria, y centrados 1/8 y 3/8 de pulgada debajo de la línea grabada.

Péndulo

Diámetro: 34.49 mm (1.358 pg).

Longitud del cilindro: 38.00 mm (1.496 pg).

El péndulo consta de una base plana, y una cima cónica con un ángulo de 60°.

Cuando se usa este instrumento, la velocidad nominal de corte y el esfuerzo de corte pueden calcularse directamente de los datos del instrumento usando las expresiones:

$$\gamma = 1.075 * \Omega \quad 3.10$$

$$\tau \left(\frac{lb_f}{100ft^2} \right) = 1.0678 * F * \theta \quad 3.11$$

Donde:

$\Omega =$ Velocidad del viscosímetro en rpm $\left(\frac{r}{s} \right)$

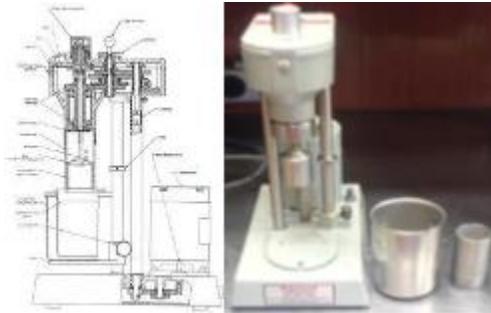
$\gamma =$ Velocidad nominal de corte en $\frac{1}{s}$

$\theta =$ Lectura del viscosímetro en grados

$F =$ Factor de torsión del instrumento

$$\tau = \text{Esfuerzo de corte en } lb_f/100ft^2$$

Figura 3. 9 Viscosímetro rotacional Fann 35-A.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

3.4.3. PROCEDIMIENTO

Este procedimiento se desarrolló después de un cuidadoso análisis en muchos parámetros que afectan el comportamiento reológico de las lechadas de cemento. La mayoría de datos fueron recabados utilizando lechadas no dispersas; sin embargo, también se evaluaron algunos datos de lechadas dispersas. Los resultados de este análisis mostraron que las lechadas altamente dispersas generalmente proporcionan información menos confiable con este procedimiento, debido posiblemente a la ocurrencia de asentamiento mientras se efectúa la prueba.

La lechada de cemento debe prepararse según el procedimiento descrito en el punto 3.1

La lechada, una vez que ha sido preparada, debe vaciarse inmediatamente en la copa del consistómetro atmosférico para pre acondicionarla. La copa deberá estar a temperatura ambiente, para evitar la posibilidad de un choque térmico en los aditivos sensibles a la temperatura. La lechada será entonces calentada a la temperatura de prueba deseada superior a 87 °C (189 °F) en el consistómetro atmosférico. Para lechadas que no sufren choque térmico, la copa puede precalentarse a la temperatura de prueba [± 2 °C (± 5 °F)] o a otra temperatura seleccionada por el operador, antes de verter la lechada dentro de la copa.

Figura 3. 10 Consistómetro atmosférico Fann modelo 165-AT.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

La lechada de cemento debe agitarse durante 20 minutos después de que la temperatura de prueba deseada ha sido alcanzada, e inmediatamente después, debe vaciarse dentro del vaso del viscosímetro hasta alcanzar la marca.

Con la camisa girando a la velocidad mínima, la copa debe levantarse hasta que el nivel de líquido alcance la línea grabada en la camisa. Esta operación reducirá la gelificación de la lechada y asegurará una distribución uniforme de la lechada.

Debe registrarse la temperatura de la lechada antes de tomar la primera lectura. La lectura inicial deberá realizarse después de 10 segundos de rotación continua a la velocidad más baja. Las demás lecturas deben realizarse primero en orden ascendente, y posteriormente en orden descendente; después de una rotación continua de 10 segundos a cada velocidad. El cambio a la velocidad siguiente debe hacerse inmediatamente después de tomar cada lectura. Una vez que se han tomado todas las lecturas, debe registrarse la temperatura de la lechada en la copa del viscosímetro.

La relación de las lecturas ascendentes y descendentes debe calcularse para cada velocidad. Esta relación puede utilizarse para ayudar a clasificar ciertas propiedades de las lechadas:

Cuando existen diferencias significativas en las lecturas es indicativo de que la lechada no es estable; por ejemplo, puede ser propensa a un asentamiento extremo o una gelificación excesiva. Cuando esto ocurra deben realizarse ajustes en la composición de la lechada.

Las lecturas reológicas de la lechada deben reportarse como el promedio de las lecturas ascendentes y las descendentes, tomadas a una temperatura promedio de prueba.

Temperatura inicial de la lechada: 67 °C

Temperatura final de la lechada: 63 °C

Temperatura promedio de la lechada: 65 °C

Para mejorar la confiabilidad de las mediciones, puede repetirse el procedimiento completo muchas veces utilizando una muestra de lechada fresca cada vez. De ser así, las mediciones deben reportarse como el promedio de todas las lecturas aceptables.

3.4.4. PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACION DEL ESFUERZO GEL

El esfuerzo gel de una lechada de cemento puede medirse inmediatamente después de determinar las propiedades reológicas de la muestra de lechada; o como una observación independiente. Si se observa un incremento en la gelificación durante la medición de las propiedades reológicas un reacondicionamiento de la lechada durante un minuto a 300 rpm puede dispersar los geles y permitir una mejor medición del esfuerzo gel. Para una prueba independiente, la lechada debe prepararse como se indica en la práctica número uno de este manual y acondicionarse en el consistómetro atmosférico como se describió en párrafos anteriores.

- Apagar el viscosímetro por 10 segundos y registrar la temperatura de la lechada.
- Registrar la máxima lectura observada inmediatamente después de encender el instrumento. Utilizar esta lectura para calcular el esfuerzo gel a 10 segundos con la ecuación:

$$\tau \left(\frac{lb_f}{100ft^2} \right) = 1.0678 * F * \theta \quad 3.12$$

- Apagar el viscosímetro por 10 minutos y registrar la temperatura de la lechada. Repetir el procedimiento del párrafo anterior para reportar el esfuerzo gel a 10 minutos.

Después de tomar las lecturas, debe registrarse nuevamente la temperatura de la muestra de lechada contenida en la copa del viscosímetro.

Los esfuerzos gel de la lechada deben reportarse a la temperatura promedio de las lecturas registradas.

Para mejorar la confiabilidad de las mediciones, puede repetirse el procedimiento completo varias veces usando una muestra de lechada fresca cada vez. De ser así, los valores de los esfuerzos deben reportarse como el promedio de todos los valores aceptables.

3.4.5. MODELADO DEL COMPORTAMIENTO REOLOGICO

Para ser capaces de caracterizar el comportamiento de flujo (presiones por fricción, régimen de flujo, etc.) de una lechada de cemento en cualquier geometría (tuberías, espacios anulares, etc.), debe seleccionarse el modelo reológico que mejor represente los datos obtenidos. Para hacerlo, las lecturas de velocidad de rotación y el torque, deben convertirse en velocidad de corte y esfuerzo de corte usando las ecuaciones:

$$\gamma = \frac{\pi R_2^2 \chi \Omega}{15 R_2^2 - R_1^2} \quad 3.13$$

Y

$$\gamma = 1.44 \frac{T}{2\pi R_1^2} \quad 3.14$$

Donde:

$$\gamma = \text{Velocidad de corte} \left(\frac{1}{s} \right)$$

$$\Omega = \text{Velocidad del viscosímetro rotacional (rpm)}$$

$$\tau = \text{Esfuerzo de corte} \left(\frac{lb_f}{100ft^2} \right)$$

$$T = \text{Torque por unidad de longitud} (lb_f)$$

$$R_2 = \text{Radio de la camisa} (pg)$$

$$R_1 = \text{Radio del pendulo} (pg)$$

Estas ecuaciones se desarrollan haciendo las siguientes suposiciones:

- a) La lechada es homogénea y el esfuerzo de corte es uniforme en el espacio anular.
- b) Existe régimen de flujo laminar en el espacio anular.
- c) El resbalamiento en la pared es cero.
- d) El fluido exhibe esencialmente un comportamiento independiente del tiempo.

El viscosímetro rotacional utilizado debe ser capaz de medir esfuerzos de corte a velocidades de corte dentro de un rango de cerca de cero hasta 511 1/s. Los instrumentos comúnmente usados proporcionan un mínimo de cinco lecturas dentro de ese rango. Los instrumentos que proporcionan menos de cinco lecturas en ese intervalo de velocidad de corte no son recomendables.

El modelo reológico puede seleccionarse por un análisis de regresión o graficando datos de velocidad de corte contra esfuerzo de corte.

3.4.6. MODELOS REOLOGICOS

Los modelos reológicos describen la relación entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte de un fluido. Los modelos más utilizados para describir las propiedades reológicas de las lechadas de cemento son el de Plástico de Bingham y el de Ley de Potencias.

MODELO DE PLASTICO DE BINGHAM

Cuando se grafica la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangular cartesiano, el comportamiento de la lechada de cemento como plástico de Bingham resultará en una línea recta con un esfuerzo de corte positivo a una velocidad de corte igual a cero.

Para este modelo la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte está expresada por la ecuación:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p * \gamma \quad 3.15$$

En esta ecuación, τ_0 es el esfuerzo de corte positivo a la velocidad de corte igual a cero y se denomina esfuerzo de cedencia o punto de cedencia (comúnmente denotado como Y_p). Por encima del punto de cedencia, el esfuerzo de corte del fluido es proporcional a la velocidad de corte y la constante de proporcionalidad μ_p se denomina viscosidad plástica (denotada comúnmente como V_p). Si en la ecuación anterior el punto de cedencia es igual a cero, la ecuación se transforma en el modelo reológico más simple: el modelo Newtoniano. Las unidades en esta ecuación están en SI, 1/s para la velocidad de corte. Pa para el esfuerzo de corte y el punto de cedencia, y Pa·s para la viscosidad plástica.

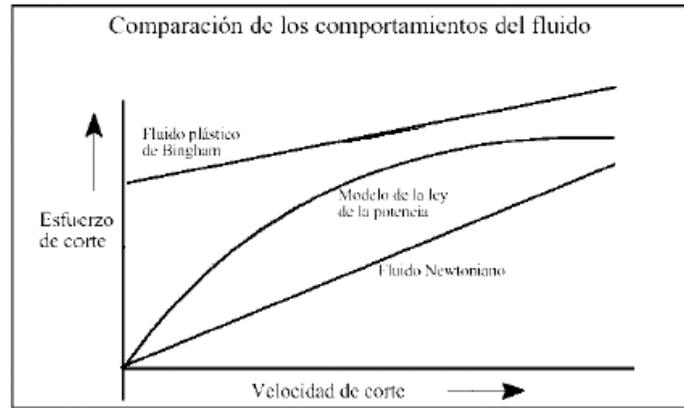
MODELO DE LEY DE POTENCIAS

Cuando se grafica la velocidad de corte contra el esfuerzo de corte en un sistema de coordenadas rectangular cartesiano, este modelo producirá una curva con un valor de esfuerzo de corte igual a cero para una velocidad de corte igual a cero. Cuando se grafica el esfuerzo de corte contra la velocidad de corte en papel doble logarítmico, el comportamiento de la lechada como un fluido ley de potencias resultará una línea recta. Para este modelo la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte está expresado por la siguiente ecuación:

$$\tau = k X \gamma^n \quad 3.16$$

En esta ecuación n es el exponente de la Ley de Potencias o índice de comportamiento de flujo y k es una constante, conocida como índice de comportamiento de flujo. Para fluidos pseudo-plásticos n es un número positivo entre 0 y 1. Las lechadas de cemento normalmente exhiben un comportamiento pseudo-plástico. Para fluidos dilatantes n es un número positivo mayor que 1. Si en esta ecuación n es igual a 1, la ecuación entonces corresponde al modelo Newtoniano. Las unidades son 1/s para la velocidad de corte, Pa para el esfuerzo de corte, y $Pa * s^n$ para el índice de consistencia.

Figura 3. 11 Modelos reológicos.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

3.4.7. SELECCIÓN DEL MODELO REOLOGICO

Los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte de una lechada de cemento deben analizarse con las dos ecuaciones anteriores para determinar qué modelo se ajusta mejor a los mismos. La mejor manera de hacerlo es mediante un análisis de regresión. El modelo con el mejor coeficiente de regresión debe seleccionarse como el modelo para describir los datos.

Modelo plástico de Bingham

Debe realizarse un análisis de regresión usando la ecuación $\tau = \tau_0 + \mu_p * \gamma$ para determinar la pendiente A y la ordenada al origen B. Si el esfuerzo de corte τ se expresa en $lb_f/100ft^2$ y la velocidad de corte γ en $1/s$, los parámetros del modelo en unidades de campo se expresan de la siguiente forma:

$$\mu_p(cp) = 478.8 * A \quad 3.17$$

Y

$$\tau_0 \left(\frac{lb_f}{100ft^2} \right) = B \quad 3.18$$

Un punto de cedencia negativo es un indicador de que:

- 1) La lechada tiende a asentarse
- 2) La lechada puede gelificarse mientras se tomen las lecturas para determinar sus propiedades reológicas.

Si esto sucede, se recomienda que la lechada sea mezclada nuevamente y se recalculen sus propiedades reológicas. Si el problema persiste, la lechada puede presentar problemas cuando se introduzca en el pozo, y no se recomienda su utilización; por lo que habrá que diseñar una nueva lechada.

Cuando se utiliza el viscosímetro Fann 35A, y la lechada de cemento se comporta como un fluido plástico de Bingham, pueden utilizarse las siguientes expresiones:

$$\mu_p (cp) = 1.5 * F * (\theta_{300} - \theta_{100}) \quad 3.19$$

$$\tau_0 \left(\frac{lb_f}{100ft^2} \right) = F * (\theta_{300} - \mu_p) \quad 3.20$$

Donde θ_{300} y θ_{100} son las lecturas obtenidas en el viscosímetro a las velocidades de corte correspondientes, en rpm.

Modelo de Ley de Potencias

En este modelo, los parámetros se obtienen realizando un análisis de regresión sobre la forma logarítmica de la ecuación que describe el modelo:

$$\log(\tau) = \log(k) + n \log(\gamma) \quad 3.21$$

El índice de comportamiento de flujo n es el valor de la pendiente.

Si el esfuerzo de corte τ se expresa en $lb_f/100ft^2$ y la velocidad de corte γ en $1/s$, el índice de consistencia en $lb_f * s^n/100ft^2$ puede encontrarse utilizando el valor de la ordenada al origen usando la siguiente expresión:

$$k \left(lb_f * \frac{s^n}{100 ft^2} \right) = 0.01(10^D) \quad 3.22$$

Cuando se utiliza el viscosímetro Fann 35A, y la lechada de cemento se comporta como un fluido plástico de Ley de Potencias, pueden utilizarse las siguientes expresiones:

$$n = 2.096 * \log \left(\frac{\theta_{300}}{\theta_{100}} \right) \quad 3.23$$

$$k \left(lb_f * \frac{s^n}{100 ft^2} \right) = (F * \theta_{300}) * (100 * 500^n) \quad 3.24$$

Para una lechada elaborada con el objetivo de realizar el control de calidad al cemento, los valores deben estar entre los siguientes rangos:

Viscosidad plástica: Máxima, 60 cp; Mínima, 35 cp

Punto de Cedencia máximo: 0.293 kN/m² (65 lb_f/100 ft²)

3.5. PERDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO EN UNA LECHADA DE CEMENTO

3.5.1. SUSTANCIAS, MATERIAL Y EQUIPO NECESARIO

Sustancias:

1 kg de cemento Clase H (Cemento Petrolero clasificación API).

1 litro de agua.

3 Categorías de aditivos

Control de agua libre

Control de filtrado

Antiespumante

Figura 3. 12 Aditivos especiales solidos pulverizados y líquidos.



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

Material y equipo necesario:

- Frasco de vidrio con tapa plástica con capacidad de 1 kg, o bolsa de plástico. Cucharón de plástico para cementos.
- Espátula de acero.
- Cuchara metálica de acero inoxidable.
- Mezcladora Chandler.
- Balanza granataria o mecánica.
- Jeringa.
- Guantes y cubre bocas
- Jarra de plástico con capacidad para 2 lt.
- Consistómetro Atmosférico 165 AT con calentador de resistencia
- Filtro Prensa FANN con chaqueta de calentamiento y Autoclave.
- Bata para protección
- Probeta graduada de 100 ml.
- Llave española de ¼ plg.
- Llave de puntos especial para el apriete de la autoclave.
- Guantes de carnaza.

En la mayor parte de las aplicaciones, una baja pérdida de filtrado se considera menor de 100 cm³ en 30 min, bajo una presión diferencial de 70 kg/cm² (1000 psi), a través de una malla 325 y a la temperatura de circulación del pozo a cementar.

Esta característica de la lechada es particularmente importante durante la operación de bombeo, ya que un valor bajo de la misma previene la deshidratación prematura del cemento, mantiene fluida la lechada y previene el daño a la formación ocasionado por la disminución de la permeabilidad. Con un valor bajo de pérdida de fluido, la lechada permanecerá bombeable durante un tiempo bastante cercano al valor de diseño en el laboratorio.

3.5.2. DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo a utilizar es una celda de alta presión y alta temperatura para pérdida de filtrado provista con un filtro malla 325 mesh soportado por una malla 60 mesh.

Figura 3. 13 Autoclave con accesorios (izquierda), filtro prensa Fann (derecha)



Fuente: Manual teórico-práctico sobre equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera, Ing. José Gómez, 2018

3.5.3. PROCEDIMIENTO

La lechada de cemento debe prepararse según el procedimiento descrito en el punto 3.1 más el empleo de aditivos (DISEÑO DE LECHADA).

3.5.4. PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

La lechada debe de mezclarse de acuerdo con lo establecido en la práctica número 1 de este manual.

3.5.5. PROCEDIMIENTO PARA ACONDICIONAR LA LECHADA

Los acondicionamientos de las lechadas deben iniciar a 26.7 ± 1.1 °C (80 ± 2 °F), o a una temperatura apropiada para las condiciones de pozos. Y debe calentarse de acuerdo a la cédula apropiada.

3.5.6. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA PRUEBA A TEMPERATURAS MENORES DE 90° (194° F)

Acondicionamiento a presión atmosférica

- En no más de un minuto después de haber preparado la lechada, colocarla dentro el contenedor del consistómetro atmosférico.
- Calentar la lechada hasta alcanzar la temperatura circulante de fondo de pozo, de acuerdo con la cedula de tiempo bombeable que mejor simule las condiciones reales del pozo.
- Si el consistómetro atmosférico no está equipado para medir la temperatura de la lechada, el baño de temperatura debe ser calentado de acuerdo con la cedula apropiada.
- Después de acondicionar, quitar la paleta y remover rápidamente con una espátula para asegurar que la lechada sea uniforme.
- Armar la celda de filtro prensa.

Llenado de la celda del Filtro Prensa

- Precalentar la celda a 90 ± 3 °C (194 ± 5 °F) cuando se realicen pruebas a temperaturas mayores. Para realizar lo anterior se deben presionar los botones del control de temperatura (EUROTHERM) hasta alcanzar la temperatura objetivo deseada. Posteriormente, se deben activar los calentadores, el controlador de temperatura empezará a calentar la camisa de calentamiento hasta alcanzar la temperatura objetivo.
- Unos segundos antes de terminar el acondicionamiento de la lechada, retirar la celda de la camisa de calentamiento y colocarla en su base.
- Verificar que la válvula inferior de la celda se encuentre cerrada.
- Vaciar la lechada dentro de la celda hasta 3/4 pg por debajo del tope de la cámara para la lechada.
- Enroscar la tapa superior apretando firmemente con las llaves.

Calentamiento

Las pruebas, independientemente de la temperatura a que sean realizadas deben iniciar tan rápido como sea posible, como máximo seis minutos después de terminar el acondicionamiento de la lechada.

Preparación del equipo

- Colocar una probeta de 100 ml justo debajo de la válvula inferior de la celda.
- Abrir la válvula del tanque de nitrógeno.

Prueba de pérdida de filtrado

- Colectar el filtrado y registrar el volumen a 30 segundos y a 1, 2, 5, 7.5, 10, 15, 25 y 30 min. Si el nitrógeno fluye por la válvula inferior de la celda en menos de 30 min, registrar el volumen y el tiempo a los que se presenta el flujo.
- Calcular la pérdida de filtrado API. Para pruebas que duran los 30 min sin que exista salida de nitrógeno, medir el volumen recolectado, multiplicar por 2 este valor y reportarlo como la pérdida de filtrado.

Donde:

$Q_t = \text{Volumen (ml) recolectado al tiempo } t \text{ en que ocurre la salida de nitrógeno.}$

Notas:

- 1) Lechadas con sedimentación significativa dan valores erróneos de pérdida por filtrado.
- 2) Las pruebas que no completan los 30 min tienen un error potencial que es mayor a medida que disminuye el tiempo al que se registra la salida de nitrógeno.
- 3) Las pruebas que llegan a 30 min muestran generalmente un porcentaje de variación de 5 %. Aquellas que duran menos de 5 min pueden tener una variación de más de 30%.

CAPITULO 4

APLICACIÓN PRÁCTICA DE LA PROPUESTA

El proyecto al ser una propuesta experimental se realizará en los laboratorios de la Universidad Mayor de San Andrés en la carrera de Ingeniería Petrolera esperando pueda ser aplicado en la posteridad en algún pozo hidrocarburífero.

4.1 Preparación de una lechada con Fibra de Polipropileno y Resina de Poliuretano

La lechada de cemento es mezclada en concordancia a la norma API RP 10B; con el procedimiento anteriormente mencionado. Durante las pruebas, la única excepción sucede al adicionar las fibras de polipropileno. La integridad de la fibra es susceptible a ser dañada por las cuchillas en el interior del Mixer. Por consiguiente, son añadidas a la lechada una vez que esta ha sido mezclada. Al añadir las fibras mezclar a mano con una espátula o a 200-500 rpm. Como alternativa, el viscosímetro de Fann 35 se puede utilizar con las fibras en la mezcla seca.

La resina de poliuretano al encontrarse en estado líquido, no ocasiona ningún problema; por lo cual no existen especificaciones para adicionarla a la mezcla.

La Figura 4.1 muestra los materiales necesarios que se van a ser utilizados durante toda la parte de experimentación en la elaboración de la lechada de cemento en orden de izquierda a derecha se tiene el cemento portland, agua, fibra de polipropileno, polioli e isocianato.

Figura 4. 1 Materiales y aditivos.



Fuente: Elaboración propia

El volumen de lechada de cemento debe ser de 600 ml. La elaboración de la lechada tiene el siguiente procedimiento:

- El cemento seco debe ser mezclado con los aditivos sólidos, la mezcla debe ser homogénea y que la fibra de polipropileno este distribuida en todo el cemento como indica la figura 4.2.

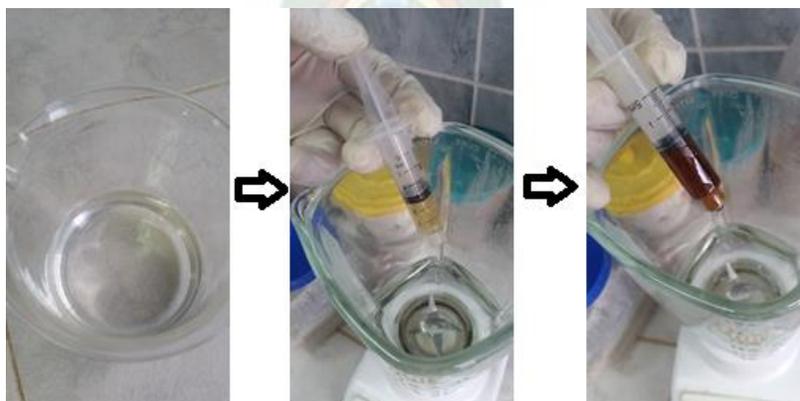
Figura 4. 2 Mezcla de cemento y fibra de polipropileno.



Fuente: Elaboración propia

- El agua debe ser mezclada con los aditivos químicos líquidos, el orden de mezcla será primeramente agua seguido de polioli y finalmente isocianato (Figura 4.3)

Figura 4. 3 Mezcla de agua y resina de poliuretano.



Fuente: Elaboración propia

- Esta mezcla debe ser mezclada a una velocidad de 3000 rpm durante 20 segundos para que sea homogénea como indica la figura 4.4.

Figura 4. 4 Mezcla homogénea de agua y resina de poliuretano.



Fuente: Elaboración propia

- Una vez la mezcla de agua y poliuretano esté homogénea se agrega el cemento con la fibra de polipropileno mezclados anteriormente y se aumenta la velocidad a 4000 rpm durante un tiempo no mayor a 30 segundos, hasta que la lechada sea homogénea como indica la figura 4.5.

Figura 4. 5 Lechada de cemento homogénea con aditivos químicos.



Fuente: Elaboración propia

Se han elaborado 4 muestras de lechada variando las concentraciones de aditivos químicos para poder desarrollar un mejor análisis de la investigación además de una muestra de lechada de cemento base que consistía en cemento y agua.

La cantidad de materiales son detalladas en la tabla 4.1

Tabla 4. 1 Cantidad de material calculado para la elaboración de lechadas.

Lechada Base		Muestra MV-1		Muestra MV-2		Muestra MV-3		Muestra MV-4	
Lechada									
m_l [g]	939,12	m_l [g]	944,69	m_l [g]	949,50	m_l [g]	955,72	m_l [g]	967,32
v_l [ml]	600								
ρ_l [g/ml]	1,68	ρ_l [g/ml]	1,57	ρ_l [g/ml]	1,58	ρ_l [g/ml]	1,59	ρ_l [g/ml]	1,61
Cemento		Cemento		Cemento		Cemento		Cemento	
m_c [g]	602								
v_c [ml]	191,11								
ρ_c [g/ml]	3,15								
Agua		Agua		Agua		Agua		Agua	
m_w [g]	337,12								
v_w [ml]	337,12								
ρ_w [g/ml]	1								
Polipropileno		Polipropileno		Polipropileno		Polipropileno		Polipropileno	
m_{pp} [g]		m_{pp} [g]		m_{pp} [g]	4,81	m_{pp} [g]	5	m_{pp} [g]	5
v_{pp} [ml]		v_{pp} [ml]		v_{pp} [ml]	5,06	v_{pp} [ml]	5,26	v_{pp} [ml]	5,26
ρ_{pp} [g/ml]	0,95								
Poliuretano		Poliuretano		Poliuretano		Poliuretano		Poliuretano	
Poliol		Poliol		Poliol		Poliol		Poliol	
m_{po} [g]		m_{po} [g]	2,93	m_{po} [g]	2,93	m_{po} [g]	6,1	m_{po} [g]	12,2
v_{po} [ml]		v_{po} [ml]	2,4	v_{po} [ml]	2,4	v_{po} [ml]	5	v_{po} [ml]	10
ρ_{po} [g/ml]	1,22								
Isocianato		Isocianato		Isocianato		Isocianato		Isocianato	
m_{is} [g]		m_{is} [g]	2,64	m_{is} [g]	2,64	m_{is} [g]	5,5	m_{is} [g]	11
v_{is} [ml]		v_{is} [ml]	2,4	v_{is} [ml]	2,4	v_{is} [ml]	5	v_{is} [ml]	10
ρ_{is} [g/ml]	1,10								

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida una mezcla homogénea se procede a realizar las pruebas pertinentes para la determinación de valores, los cuales se tomaron como referencia para realizar una comparación de la lechada experimental con la lechada convencional.

4.2 Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad de las muestras de lechadas se procedió a calcularlas mediante la balanza para lechadas (Figura 4.6)

Figura 4. 6 Balanza de lodos.



Fuente: Elaboración propia

Los datos recolectados de cada muestra se las presenta en la tabla 4.2

Tabla 4. 2 Densidades de las muestras de lechada.

Lechada Base		Muestra MV-1		Muestra MV-2		Muestra MV-3		Muestra MV-4	
Lechada		Lechada		Lechada		Lechada		Lechada	
m_i [g]	1008	m_i [g]	944,69	m_i [g]	949,50	m_i [g]	955,72	m_i [g]	967,32
v_i [ml]	600	v_i [ml]	600	v_i [ml]	600	v_i [ml]	600	v_i [ml]	600
ρ_l [g/ml]	1,68	ρ_i [g/ml]	1,57	ρ_i [g/ml]	1,58	ρ_i [g/ml]	1,59	ρ_i [g/ml]	1,61
ρ_l [ppg]	14,02	ρ_i [ppg]	13,10	ρ_i [ppg]	13,19	ρ_i [ppg]	13,27	ρ_i [ppg]	13,44

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Obtención de reologías

Para obtener los datos reológicos se coloca una porción de la lechada en la copa del Viscosímetro Fann hasta la marca establecida, se enciende el motor y se adecua la velocidad para realizar la pertinente lectura. En este caso las lecturas se realizaron a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm como se aprecia en la figura 4.7

Figura 4. 7 Viscosímetro Fann.



Fuente: Elaboración propia

En algunos casos es necesario modificar la temperatura de la muestra, por lo cual se utiliza como apoyo un consistómetro para elevar la temperatura de acuerdo a las características del pozo previamente especificadas. En este caso las reologías se toman a temperatura de fondo circulante. Las lecturas obtenidas del viscosímetro se observan en la tabla 4.3.

Tabla 4. 3 Lecturas del viscosímetro Fann.

Lechada Base		Muestra MV-1		Muestra MV-2		Muestra MV-3		Muestra MV-4	
Lecturas Viscosímetro		Lecturas Viscosímetro		Lecturas Viscosímetro		Lecturas Viscosímetro		Lecturas Viscosímetro	
600	70	600	74	600	84	600	110	600	130
300	50	300	55	300	61	300	70	300	80
200	36	200	38	200	40	200	55	200	55
100	21	100	24	100	27	100	29	100	30
6	18	6	22	6	23	6	24	6	26
3	16	3	16	3	17	3	18	3	20

Fuente: Elaboración propia

Para los cálculos de la reología: viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto cedente (yield point), índice de modelo exponencial e índice de consistencia se utilizan las siguientes ecuaciones:

Viscosidad plástica (VP)

$$VP = L600 - L300 [cP]$$

Donde:

VP = Viscosidad plástica

L600 = Lectura a 600 rpm en el Viscosímetro Fann

L300 = Lectura a 300 rpm en el Viscosímetro Fann

Viscosidad aparente (VAP)

$$VAP = \frac{L600}{2} [cP]$$

VAP = Viscosidad aparente

L600 = Lectura a 600 rpm en el Viscosímetro Fann

Punto cedente o Yield Point (YP)

$$YP = L300 - VP \left[\frac{lb}{100ft^2} \right]$$

YP = Yield Point

L300 = Lectura a 300 rpm en el Viscosímetro Fann

VP = Viscosidad plástica

Índice de modelo exponencial (n)

$$n = 1,4427 \ln \left(\frac{2VP + YP}{VP + YP} \right)$$

n = Índice de modelo exponencial

VP = Viscosidad plástica

YP = Yield Point

Índice de consistencia (k)

$$k = \frac{5,11 * L600}{1022^n} \left[\frac{lb * seg^n}{100ft^2} \right]$$

k = Índice de consistencia

L600 = Lectura a 600 rpm en el Viscosímetro Fann

n = Índice de modelo exponencial

Los resultados de la reología se observan en la tabla 4.4

Tabla 4. 4 Resultados a partir de los datos del Viscosímetro Fann.

VISCOSIDAD PLASTICA				
$VP = L600 - L300$ [cP]				
20	19	23	40	50
VISCOSIDAD APARENTE				
$VAP = \frac{L600}{2}$ [cP]				
35	37	42	55	65
PUNTO CEDENTE (YIELD POINT)				
$YP = L300 - VP$ [$\frac{lb}{100ft^2}$]				
30	36	38	30	30
INDICE DE MODELO EXPONENCIAL				
$n = 1,4427 \ln\left(\frac{2VP + YP}{VP + YP}\right)$				
0,4854	0,4281	0,462	0,652	0,700
INDICE DE CONSISTENCIA				
$k = \frac{5,11 * L600}{1022^n}$ [$\frac{lb * seg^n}{100ft^2}$]				
12,378	19,468	17,522	6,129	5,181

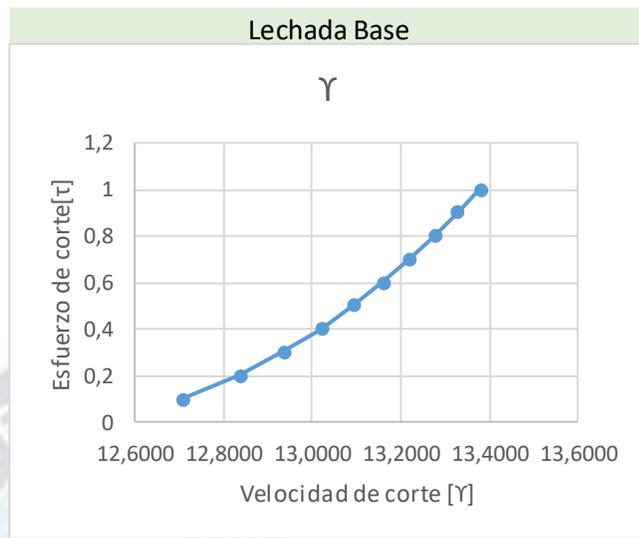
Fuente: Elaboración propia

Para la descripción de la lechada de cemento se ha tomado el modelo reológico de Ley de Potencia. Este modelo introduce dos parámetros para lograr una evaluación reológica más exacta. El modelo Ley de Potencia se lo utiliza debido a que las lechadas de cemento son suspensiones altamente concentradas de partículas sólidas en agua. El contenido de sólidos en una lechada de cemento puede llegar hasta un 70%. La reología de la lechada de cemento está relacionada con la del líquido de soporte, la fracción volumétrica de los sólidos y la interacción entre las partículas.

Los resultados de cada muestra se observan en las figuras 4.5 a 4.9

Tabla 4. 5 Comportamiento reológico de la muestra de lechada base.

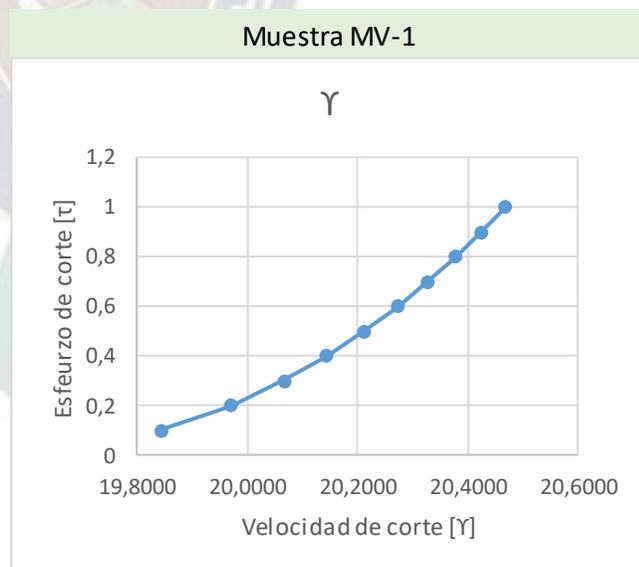
τ	γ
12,7049	0,1
12,8357	0,2
12,9353	0,3
13,0188	0,4
13,0921	0,5
13,1582	0,6
13,2189	0,7
13,2752	0,8
13,3280	0,9
13,3779	1



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4. 6 Comportamiento reológico de la muestra MV-1

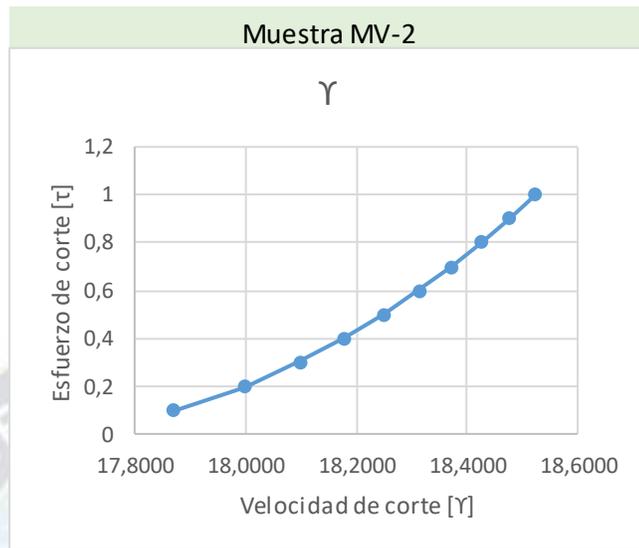
τ	γ
19,8412	0,1
19,9701	0,2
20,0653	0,3
20,1435	0,4
20,2112	0,5
20,2716	0,6
20,3264	0,7
20,3769	0,8
20,4239	0,9
20,4680	1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 7 Comportamiento reológico de la muestra MV-2.

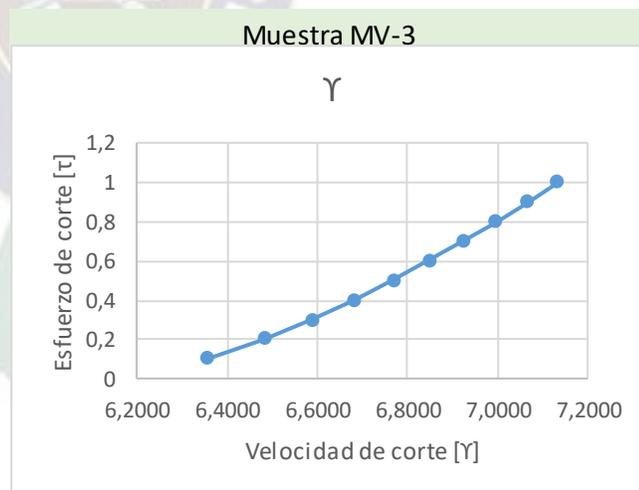
τ	Υ
17,8678	0,1
17,9981	0,2
18,0960	0,3
18,1775	0,4
18,2486	0,5
18,3123	0,6
18,3706	0,7
18,4245	0,8
18,4749	0,9
18,5224	1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 8 Comportamiento reológico de la muestra MV-3

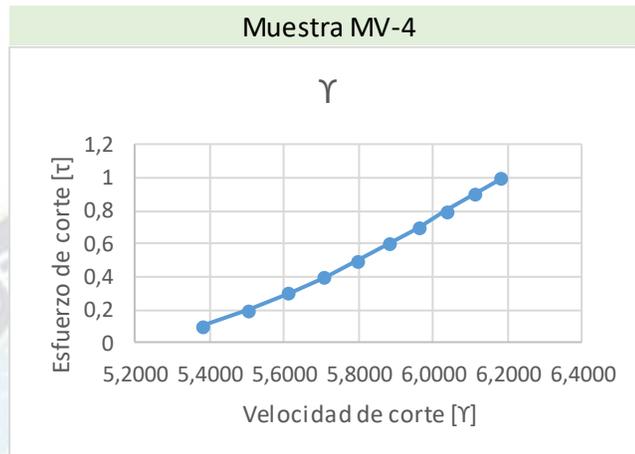
τ	Υ
6,3521	0,1
6,4795	0,2
6,5854	0,3
6,6795	0,4
6,7657	0,5
6,8460	0,6
6,9218	0,7
6,9939	0,8
7,0629	0,9
7,1293	1



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4. 9 Comportamiento reológico de la muestra MV-4

τ	γ
5,3804	0,1
5,5050	0,2
5,6113	0,3
5,7074	0,4
5,7964	0,5
5,8803	0,6
5,9600	0,7
6,0364	0,8
6,1099	0,9
6,1811	1



Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que para la simulación de temperatura de pozo la lechada ha tenido que ser calentada hasta 80°C previo a ser llevado al Viscosímetro Fann.

4.4 Efecto de agua libre

Al dejar la lechada en reposo, se recoge cierta cantidad de agua en la parte superior como resultado de la precipitación de partículas de cemento dentro de la lechada. En el caso particular la muestra de lechada base, y la muestra MV-1 en los cuales no se ha añadió fibra de polipropileno presentaban grietas o hendiduras. SI hay un gran número de ellas en la columna de cemento, formaran un canal que puede causar que el cemento ya fraguado falle cuando sea sometido a presión. Debido a esas grietas la muestra de lechada base y la muestra MV-1 si presentaron agua en la parte superior sin embargo no era muy apreciable. En los demás casos no hubo agua en la parte superior. La figura 4.8 representa la toma de muestras en tubos de ensayo para la experimentación de agua libre.

Figura 4. 8 Muestras para efecto de agua libre.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la prueba de agua libre son presentados en la tabla 4.10

Tabla 4. 10 Resultados prueba Agua Libre.

FLUIDO LIBRE [ml]				
0° Inclinación, 2 horas				
Lechada Base	Muestra MV-1	Muestra MV-2	Muestra MV-3	Muestra MV-4
Despreciable	Despreciable	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

4.5 Perdida de fluido por filtrado excesivo en una lechada de cemento

Una vez realizada las pruebas de reología se procede a realizar la prueba de perdida de fluido mediante el equipo de Prensa API el cual será presurizado con dióxido de carbono. Se debe tomar en cuenta que hay que tener los cuidados necesarios al manipular el equipo de lo contrario podría ocasionar un grave accidente. El equipo utilizado es el que se muestra en la figura 4.9

Figura 4. 9 Prensa API



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la prueba de filtrado en la prensa API de las muestras de lechada de cemento presurizadas a 100 psi y a una temperatura de 36°C se tienen los siguientes resultados denotados en la tabla 4.11

Tabla 4. 11 Resultados prueba de filtrado.

PERDIDA DE FLUIDO POR FILTRADO EXCESIVO [m]				
100PSI y 96°F (36°C)				
Lechada Base	Muestra MV-1	Muestra MV-2	Muestra MV-3	Muestra MV-4
27	25	19	16	12

Fuente: Elaboración propia

4.6 Resultados de laboratorio

Todas las pruebas realizadas en el laboratorio han sido seguidas de forma estricta de acuerdo a la norma API RP 10B. Se ha desarrollado 5 muestras representativas cuya descripción de cada una de ellas se las desarrolla en el anexo A.

4.7 Calculo de la lechada de cemento en el pozo Sábalo 9

Para fines del presente proyecto el cálculo de volúmenes necesarios para la cementación de un pozo con la lechada MV-4 se lo desarrollara en el pozo Sábalo 9

FASE 36"-CAÑERÍA 30", TRAMO 0-100 m

$$V_{lech1} = \left(\frac{OD^2 - ID^2}{314} \right) * h$$

$$V_{lech1} = \left(\frac{36^2 - 30^2}{314} \right) * 100$$

$$V_{lech1} = 126.11 \text{ Bbl}$$

Exceso del 100%

$$V_{lech1} = 252.22 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada de relleno

$$V_{lech\ relleno} = 252.22 * 0.70$$

$$V_{lech\ relleno} = 176.55 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada principal

$$V_{lech\ principal} = 252.22 * 0.30$$

$$V_{lech\ principal} = 75.67 \text{ Bbl}$$

Volumen de desplazamiento

$$V_{despl.} = \frac{ID^2}{314}$$

$$V_{despl.} = \frac{4.778^2}{314} * 100$$

$$V_{despl.} = 7.27 \text{ Bbl}$$

Programa de cementación

- Bajar zapato cañería de 30" más collar flotador 30" más 8 piezas cañería 30".
- Circular acondicionador lodo a 10-12 BPM
- Largar tapón inferior
- Bombear 50 Bbl de colchón químico a 5 BPM
- Bombear 50 Bbl de colchón mecánico a 5 BPM
- Bombear 176.55 Bbl de lechada de relleno o delantera
- Bombear 75.67 Bbl de lechada principal
- Largar tapón superior
- Desplazar 7.27 Bbl de lodo a 10 BPM
- Desfogar observar retorno

Tabla 4. 12 Comparación de resultados tramo 0 – 100 m

Tramo	Característica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Tramo Guia	Vol.de lechada (Bbl)	252,22	252,22	-
	Vol. de desplazamiento (Bbl)	7,27	7,27	-
	Vol. de lechada principal (Bbl)	75,67	75,67	-
	Vol. de relleno (Bbl)	176,55	176,55	-
	Vol. de colchon qmc (Bbl)	50,00	50,00	-
	Vol. de colchon mec (Bbl)	50,00	50,00	-
	Vol. de agua (Bbl)	95,34	384,00	-288,67
	Sacos de cemento (sc)	953,39	1324,16	-370,76
	Costo c/Aditivos (\$)	118543,40	113499,00	5044,40
	Costo s/Aditivos (\$)	50444,00	37833,00	12611,0

Fuente: Elaboración propia

BALANCE DE MATERIALES TRAMO 0 – 100 m

Tabla 4. 13 Balance de materiales tramo 0 – 100 m

Tramo	Característica	Cantidad Volumen		Densidad	Cantidad masa		Densidad lb/gal	
Tramo Guia	Lechada de cemento	252,22	Bbl	3,78	sc/bbl	95339,160	lb	9,49
	Lechada de cemento principal	75,67	Bbl	3,78	sc/bbl	28603,260	lb	
	Lechada de relleno	176,55	Bbl	3,78	sc/bbl	66735,900	lb	
	Lodo de desplazamiento	7,27	Bbl	8,9	ppg	2717,530	lb	
	Colchon Quimico	50,00	Bbl	8,33	ppg	17493,000	lb	
	Colchon Mecanico	50,00	Bbl	10	ppg	21000,000	lb	
	Agua	95,34	Bbl	350	lb/bbl	33369,000	lb	
	Antiespumante	36,97	Bbl	8,12	ppg	12610,000	lb	
	Acelerador	38,02	Bbl	17,91	ppg	28600,000	lb	
	Dispersante	-	Bbl	10,83	ppg	-	lb	
	Retardador	-	Bbl	19,41	ppg	-	lb	
	Controlador de gas	-	Bbl	5,83	ppg	-	lb	
	Fibra de polipropileno	2,21	Bbl	0,95	ppg	493,390	lb	
	Poliol	4,2	Bbl	10,18	ppg	1264,050	lb	
	Isocianato	4,2	Bbl	9,18	ppg	1085,430	lb	

Fuente: Elaboración propia

FASE 24"-CAÑERÍA 20", TRAMO 100-800 m

$$V_{lech2} = \left(\frac{OD^2 - ID^2}{314} \right) * h$$

$$V_{lech2} = \left(\frac{24^2 - 20^2}{314} \right) * 800$$

$$V_{lech2} = 448.41 \text{ Bbl}$$

Exceso del 50%

$$V_{lech2} = 672.62 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada de relleno

$$V_{lech\ relleno} = 672.62 * 0.70$$

$$V_{lech\ relleno} = 470.83 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada principal

$$V_{lech\ principal} = 672.62 * 0.30$$

$$V_{lech\ principal} = 201.79 \text{ Bbl}$$

Volumen de desplazamiento

$$V_{despl.} = \frac{ID^2}{314}$$

$$V_{despl.} = \frac{18.75^2}{314} * 800$$

$$V_{despl.} = 112 \text{ Bbl}$$

Programa de cementación

- Bajar zapato cañería de 20" más collar flotador 20" más 67 piezas cañería 20".
- Circular acondicionador lodo a 10-12 BPM
- Largar tapón inferior
- Bombear 50 Bbl de colchón químico a 5 BPM
- Bombear 50 Bbl de colchón mecánico a 5 BPM
- Bombear 470.83 Bbl de lechada de relleno o delantera
- Bombear 201.79 Bbl de lechada principal
- Largar tapón superior
- Desplazar 112 Bbl de lodo a 10 BPM, últimos 7 Bbl a 2 BPM
- Desfogar observar retorno

Tabla 4. 14 Comparación de resultados tramo 100 – 800 m

Tramo	Característica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Tramo Superficial	Vol.de lechada (Bbl)	672,62	672,62	-
	Vol. de desplazamiento (Bbl)	112,00	112,00	-
	Vol. de lechada principal (Bbl)	201,79	201,79	-
	Vol. de relleno (Bbl)	470,83	470,83	-
	Vol. de colchon qmc (Bbl)	50,00	50,00	-
	Vol. de colchon mec (Bbl)	50,00	50,00	-
	Vol. de agua (Bbl)	254,25	1024,06	-769,81
	Sacos de cemento (sc)	2542,50	3531,26	-988,75
	Costo c/Aditivos (\$)	316131,40	302679,00	13452,40
	Costo s/Aditivos (\$)	134524,00	100893,00	33631,0

Fuente: Elaboración propia

BALANCE DE MATERIALES TRAMO 100 – 800 m

Tabla 4. 15 Balance de materiales tramo 100 – 800 m

Tramo	Característica	Cantidad Volumen	Densidad	Cantidad masa	Densidad lb/gal
Tramo Superficial	Lechada de cemento	672,62 Bbl	3,78 sc/bbl	254250,360 lb	9,42
	Lechada de cemento principal	201,79 Bbl	3,78 sc/bbl	76276,620 lb	
	Lechada de relleno	470,83 Bbl	3,78 sc/bbl	177973,740 lb	
	Lodo de desplazamiento	112,00 Bbl	9,3 ppg	43747,200 lb	
	Colchon Químico	50,00 Bbl	8,33 ppg	17493,000 lb	
	Colchon Mecanico	50,00 Bbl	10 ppg	21000,000 lb	
	Agua	254,25 Bbl	350 lb/bbl	88987,500 lb	
	Antiespumante	98,59 Bbl	8,12 ppg	33630,000 lb	
	Acelerador	101,41 Bbl	17,91 ppg	76280,000 lb (NaCl)	
	Dispersante	36,34 Bbl	10,83 ppg	16530,000 lb	
	Retardador	- Bbl	19,41 ppg	- lb	
	Controlador de gas	51,90 Bbl	5,83 ppg	12710,000 lb	
	Fibra de polipropileno	5,90 Bbl	0,95 ppg	1315,775 lb	
	Poliol	11,21 Bbl	10,18 ppg	3210,960 lb	
	Isocianato	11,21 Bbl	9,18 ppg	2894,630 lb	

Fuente: Elaboración propia

FASE 17 1/2"-CAÑERÍA 13 3/8", TRAMO 800-2000 m

$$V_{lech3} = \left(\frac{OD^2 - ID^2}{314} \right) * h$$
$$V_{lech3} = \left(\frac{17.5^2 - 13.375^2}{314} \right) * 2000$$
$$V_{lech3} = 811.21 \text{ Bbl}$$

Exceso del 30%

$$V_{lech3} = 1054.573 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada de relleno

$$V_{lech\ relleno} = 1054.573 * 0.70$$
$$V_{lech\ relleno} = 738.20 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada principal

$$V_{lech\ principal} = 1054.573 * 0.30$$
$$V_{lech\ principal} = 316.37 \text{ Bbl}$$

Volumen de desplazamiento

$$V_{despl.} = \frac{ID^2}{314}$$
$$V_{despl.} = \frac{12.415^2}{314} * 2000$$
$$V_{despl.} = 982 \text{ Bbl}$$

Programa de cementación

- Bajar zapato cañería de 13 3/8" más collar flotador 13 3/8" más 166 piezas cañería 13 3/8".
- Circular acondicionador lodo a 10-12 BPM
- Largar tapón inferior
- Bombear 100 Bbl de colchón químico a 5 BPM
- Bombear 150 Bbl de colchón mecánico a 5 BPM
- Bombear 738.20 Bbl de lechada de relleno o delantera
- Bombear 316.37 Bbl de lechada principal
- Largar tapón superior
- Desplazar 982 Bbl de lodo a 10 BPM, últimos 7 Bbl a 2 BPM

- Desfogar observar retorno

Tabla 4. 16 Comparación de resultados tramo 800 – 2000 m

Tramo	Característica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Tramo Intermedio	Vol.de lechada (Bbl)	1054,57	1054,57	-
	Vol. de desplazamiento (Bbl)	982,00	982,00	-
	Vol. de lechada principal (Bbl)	316,37	316,37	-
	Vol. de relleno (Bbl)	738,20	738,20	-
	Vol. de colchon qmc (Bbl)	100,00	100,00	-
	Vol. de colchon mec (Bbl)	160,00	160,00	-
	Vol. de agua (Bbl)	398,63	1605,59	-1206,96
	Sacos de cemento (sc)	3986,29	5536,51	-1550,22
	Costo c/Aditivos (\$)	495649,31	474557,85	21091,46
	Costo s/Aditivos (\$)	210914,60	158185,95	52728,7

Fuente: Elaboración propia

BALANCE DE MATERIALES TRAMO 800 – 2000 m

Tabla 4. 17 Balance de materiales tramo 800 – 2000 m

Tramo	Característica	Cantidad Volumen	Densidad	Cantidad masa	Densidad lb/gal
Tramo Intermedio	Lechada de cemento	1054,57 Bbl	3,78 sc/bbl	398627,46 lb	11,10
	Lechada de cemento principal	316,37 Bbl	3,78 sc/bbl	119,587,86 lb	
	Lechada de relleno	738,20 Bbl	3,78 sc/bbl	279039,60 lb	
	Lodo de desplazamiento	982,00 Bbl	13,5 ppg	556794,00 lb	
	Colchon Quimico	150,00 Bbl	8,33 ppg	52479,00 lb	
	Colchon Mecanico	160,00 Bbl	16 ppg	107520,00 lb	
	Agua	398,63 Bbl	350 lb/bbl	139520,50 lb	
	Antiespumante	154,58 Bbl	8,12 ppg	52730,00 lb	
	Acelerador	158,99 Bbl	17,91 ppg	119590,00 lb (CaCl2)	
	Dispersante	56,97 Bbl	10,83 ppg	25910,86 lb	
	Retardador	51,35 Bbl	19,41 ppg	41856,00 lb	
	Controlador de gas	81,39 Bbl	5,83 ppg	19931,43 lb	
	Fibra de polipropileno	9,24 Bbl	0,95 ppg	2062,94 lb	
	Poliol	17,58 Bbl	10,18 ppg	5034,31 lb	
	Isocianato	17,58 Bbl	9,18 ppg	4538,36 lb	

Fuente: Elaboración propia

FASE 12 1/4"-CAÑERÍA 9 5/8", TRAMO 2000-3510 m

$$V_{lech4} = \left(\frac{OD^2 - ID^2}{314} \right) * h$$

$$V_{lech4} = \left(\frac{12.25^2 - 9.625^2}{314} \right) * 3510$$

$$V_{lech4} = 641.88 \text{ Bbl}$$

Exceso del 20%

$$V_{lech4} = 770.26 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada de relleno

$$V_{lech\ relleno} = 770.26 * 0.70$$

$$V_{lech\ relleno} = 539.18 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada principal

$$V_{lech\ principal} = 770.26 * 0.30$$

$$V_{lech\ principal} = 231.08 \text{ Bbl}$$

Volumen de desplazamiento

$$V_{despl.} = \frac{ID^2}{314}$$

$$V_{despl.} = \frac{8.535^2}{314} * 3510$$

$$V_{despl.} = 814 \text{ Bbl}$$

Programa de cementación

- Bajar zapato cañería de 9 5/8" más collar flotador 9 5/8" más 292 piezas cañería 9 5/8".
- Circular acondicionador lodo a 10-12 BPM
- Largar tapón inferior
- Bombear 100 Bbl de colchón químico a 5 BPM
- Bombear 80 Bbl de colchón mecánico a 5 BPM
- Bombear 539018 Bbl de lechada de relleno o delantera
- Bombear 231.08 Bbl de lechada principal
- Largar tapón superior
- Desplazar 814 Bbl de lodo a 10 BPM, últimos 7 Bbl a 2 BPM

- Desfogar observar retorno

Tabla 4. 18 Comparación de resultados tramo 2000 – 3510 m

Tramo	Característica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Tramo Produccion	Vol.de lechada (Bbl)	770,26	770,26	-
	Vol. de desplazamiento (Bbl)	814,00	814,00	-
	Vol. de lechada principal (Bbl)	231,08	231,08	-
	Vol. de relleno (Bbl)	539,18	539,18	-
	Vol. de colchon qmc (Bbl)	100,00	100,00	-
	Vol. de colchon mec (Bbl)	80,00	80,00	-
	Vol. de agua (Bbl)	291,16	1172,72	-881,56
	Sacos de cemento (sc)	2911,58	4043,87	-1132,28
	Costo c/Aditivos (\$)	362022,20	346617,00	15405,20
	Costo s/Aditivos (\$)	154052,00	115539,00	38513,0

Fuente: Elaboración propia

BALANCE DE MATERIALES TRAMO 2000 – 3510 m

Tabla 4. 19 Balance de materiales tramo 2000 – 3510 m

Tramo	Característica	Cantidad Volumen	Densidad	Cantidad masa	Densidad lb/gal
Tramo Produccion	Lechada de cemento	770,26 Bbl	3,78 sc/bbl	291158,28 lb	11,54
	Lechada de cemento principal	231,08 Bbl	3,78 sc/bbl	87348,24 lb	
	Lechada de relleno	539,18 Bbl	3,78 sc/bbl	203810,04 lb	
	Lodo de desplazamiento	814,00 Bbl	15 ppg	512820,00 lb	
	Colchon Quimico	100,00 Bbl	8,33 ppg	34986,00 lb	
	Colchon Mecanico	80,00 Bbl	16,2 ppg	54432,00 lb	
	Agua	291,16 Bbl	350 lb/bbl	101906,00 lb	
	Antiespumante	112,89 Bbl	8,12 ppg	38510,00 lb	
	Acelerador	116,13 Bbl	17,91 ppg	87350,00 lb (CaCl2)	
	Dispersante	41,61 Bbl	10,83 ppg	18925,29 lb	
	Retardador	3,75 Bbl	19,41 ppg	3057,16 lb	
	Controlador de gas	59,44 Bbl	5,83 ppg	14557,91 lb	
	Fibra de polipropileno	6,75 Bbl	0,95 ppg	1506,78 lb	
	Poliol	12,84 Bbl	10,18 ppg	3677,07 lb	
	Isocianato	12,84 Bbl	9,18 ppg	3314,83 lb	

Fuente: Elaboración propia

FASE 8 1/2"-CAÑERÍA 7", TRAMO 3510-4218 m

$$V_{lech5} = \left(\frac{OD^2 - ID^2}{314} \right) * h$$

$$V_{lech5} = \left(\frac{8.5^2 - 7^2}{314} \right) * 768 \text{ (Tope cemento 3450 m)}$$

$$V_{lech5} = 56.878 \text{ Bbl}$$

Exceso del 20%

$$V_{lech5} = 68.24 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada de relleno

$$V_{lech\ relleno} = 68.24 * 0.70$$

$$V_{lech\ relleno} = 47.77 \text{ Bbl}$$

Volumen de la lechada principal

$$V_{lech\ principal} = 68.24 * 0.30$$

$$V_{lech\ principal} = 20.47 \text{ Bbl}$$

Volumen de desplazamiento

$$V_{despl.} = \frac{ID^2}{314}$$

$$V_{despl.} = \frac{6.184^2}{314} * 768$$

$$V_{despl.} = 94 \text{ Bbl}$$

Programa de cementación

- Bajar zapato cañería de 7" más collar flotador 7" más 64 piezas cañería 7".
- Circular acondicionador lodo a 10-12 BPM
- Largar tapón inferior
- Bombear 60 Bbl de colchón químico a 5 BPM
- Bombear 80 Bbl de colchón mecánico a 5 BPM
- Bombear 47.77 Bbl de lechada de relleno o delantera
- Bombear 20.47 Bbl de lechada principal
- Largar tapón superior
- Desplazar 94Bbl de lodo a 10 BPM, últimos 7 Bbl a 2 BPM
- Desfogar observar retorno

Tabla 4. 20 Comparación de resultados tramo 2000 – 3510 m

Tramo	Característica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Tramo Liner	Vol. de lechada (Bbl)	68,24	68,24	-
	Vol. de desplazamiento (Bbl)	94,00	94,00	-
	Vol. de lechada principal (Bbl)	20,47	20,47	-
	Vol. de relleno (Bbl)	47,77	47,77	-
	Vol. de colchon qmc (Bbl)	60,00	60,00	-
	Vol. de colchon mec (Bbl)	80,00	80,00	-
	Vol. de agua (Bbl)	25,79	103,90	-78,10
	Sacos de cemento (sc)	257,95	358,26	-100,31
	Costo c/Aditivos (\$)	32072,80	30708,00	1364,80
	Costo s/Aditivos (\$)	13648,00	10236,00	3412,00

Fuente: Elaboración propia

BALANCE DE MATERIALES TRAMO 2000 – 3510 m

Tabla 4. 21 Balance de materiales tramo 2000 – 3510 m

Tramo	Característica	Cantidad Volumen	Densidad	Cantidad masa	Densidad lb/gal
Tramo Liner	Lechada de cemento	68,24 Bbl	3,78 sc/bbl	25794,72 lb	9,41
	Lechada de cemento principal	20,47 Bbl	3,78 sc/bbl	7737,66 lb	
	Lechada de relleno	47,77 Bbl	3,78 sc/bbl	18057,06 lb	
	Lodo de desplazamiento	94,00 Bbl	7,5 ppg	29610,00 lb	
	Colchon Quimico	60,00 Bbl	8,33 ppg	20991,60 lb	
	Colchon Mecanico	80,00 Bbl	12 ppg	40320,00 lb	
	Agua	25,79 Bbl	350 lb/bbl	9026,50 lb	
	Antiespumante	10,00 Bbl	8,12 ppg	3410,00 lb	
	Acelerador	10,29 Bbl	17,91 ppg	7740,00 lb (CaCl2)	
	Dispersante	3,69 Bbl	10,83 ppg	1676,66 lb	
	Retardador	3,32 Bbl	19,41 ppg	2708,45 lb	
	Controlador de gas	5,27 Bbl	5,83 ppg	1289,74 lb	
	Fibra de polipropileno	0,6 Bbl	0,95 ppg	133,49 lb	
	Poliol	1,14 Bbl	10,18 ppg	325,76 lb	
	Isocianato	1,14 Bbl	9,18 ppg	293,67 lb	

Fuente: Elaboración propia

VOLUMEN TOTAL DE LECHADA DE CEMENTO

$$V_{lech.total} = V_{lech1} + V_{lech2} + V_{lech3} + V_{lech4} + V_{lech5}$$
$$V_{lech.total} = (252.22 + 672.62 + 1054.57 + 770.26 + 68.24)Bbl$$
$$V_{lech.total} = 2817.91 Bbl$$

LECHADA CON SISTEMA MV-4

Costo sin aditivos:

$$costo = 2817.91 BBL * \frac{200 \$}{1 bBL}$$
$$costo = 56358 \$$$

Costo con aditivos:

$$costo = 2817.91 Bbl * \frac{470 \$}{1bBL}$$
$$costo = 1324417.70 \$$$

Teniendo como dato:

$$\mu_{cemento} = 3.78 sc/Bbl$$
$$sacos\ de\ cemento = 2817.91 Bbl * \frac{3.78 sc}{1 Bbl}$$
$$sacos\ de\ cemento = 10651.70 sc$$

$$\mu_{H_2O} = 0.1 Bbl/sc$$

$$V_{H_2O} = 10651.70 sc * \frac{0.1 Bbl}{1 sc}$$
$$V_{H_2O} = 1065.17 Bbl$$

LECHADA CON SISTEMA CONVENCIONAL

Costo sin aditivos:

$$costo = 2817.91 BBL * \frac{150 \$}{1 bBL}$$
$$costo = 422686.50 \$$$

Costo con aditivos:

$$costo = 2817.91 Bbl * \frac{450 \$}{1bBL}$$

$$\text{costo} = 1268059.50 \$$$

Teniendo como dato:

$$\mu_{\text{cemento}} = 5.25 \text{ sc/Bbl}$$

$$\text{sacos de cemento} = 2817.91 \text{ Bbl} * \frac{5.25 \text{ sc}}{1 \text{ Bbl}}$$

$$\text{sacos de cemento} = 14794.03 \text{ sc}$$

$$\mu_{H_2O} = 0.29 \text{ Bbl/sc}$$

$$V_{H_2O} = 14794.03 \text{ sc} * \frac{0.29 \text{ Bbl}}{1 \text{ sc}}$$

$$V_{H_2O} = 4290.26 \text{ Bbl}$$

4.8 Análisis de resultados

Tabla 4. 22 Comparación de resultados entre el sistema MV-4 y convencional.

CUADRO COMPARATIVO		
SISTEMA MV-4		SISTEMA CONVENCIONAL
Reologia	<	Reologia
Viscosidad Plastica	<	Viscosidad Plastica
Densidad	<	Densidad
Fluido libre	<	Fluido libre
Punto de cedencia	<	Punto de cedencia
Perdida de filtrado	<	Perdida de filtrado

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 23 Comparación de resultados “General”

Tramo	Característica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Totales	Vol.de lechada (Bbl)	2817,91	2817,91	-
	Vol. de desplazamiento (Bbl)	2009,27	2009,27	-
	Vol. de lechada principal (Bbl)	845,38	845,38	-
	Vol. de relleno (Bbl)	1972,53	1972,53	-
	Vol. de colchon qmc (Bbl)	360,00	360,00	-
	Vol. de colchon mec (Bbl)	420,00	420,00	-
	Vol. de agua (Bbl)	1065,17	4290,27	-3225,10
	Sacos de cemento (sc)	10651,71	14794,04	-4142,33
	Costo c/Aditivos (\$)	1324419,11	1268060,85	56358,26
	Costo s/Aditivos (\$)	563582,60	422686,95	140895,7

Fuente: Elaboración propia

CAPITULO 5

ANALISIS DE RESULTADOS Y COSTOS

Analizando la tabla 4.22, en cuanto a la densidad el sistema MV-4 es mucho más liviano que el sistema convencional de acuerdo a la norma API RP 10B que señala que una lechada convencional presenta una densidad entre 3.10 a 3.25 g/cc, es decir de menor densidad que significa que en el momento de la cementación la gradiente de presión del cemento no sobrepasara la gradiente de presión de fractura en ningún momento por lo que en el momento de realizar el trabajo de cementación, el pozo no sufrirá ninguna fractura.

Al tener una menor viscosidad ayudara a que la lechada fluya y llene el espacio a cementar más rápidamente permitiendo de esta manera a una buena adherencia del cemento con la formación y la cañería, por lo que se tendría un ahorro de tiempo.

Considerando menor cantidad de fluido libre se evitará tener problemas con la separación del agua de la lechada después de ser desplazada en el interior del pozo, en consecuencia, se omitirá áreas canalizadas en el cemento fraguado, agua o cemento blando en la parte superior de la columna de cemento o asentamiento de sólidos en la columna de cemento.

Teniendo menor perdida de filtrado ayudara a que las paredes del pozo tengan mayor consistencia ya que evitara el flujo de agua desde la lechada hacia la formación, de esta manera no existirá un pegamiento de la tubería por presión diferencial, como también ayudara a tener menor espesor de revoque. Además, la velocidad de bombeo no disminuirá por lo que la lechada será bombeada hasta su posición final evitando que un exceso de cemento se quede dentro del casing, en consecuencia, no se tendría cementación forzada para que dicho cemento sea molido.

Con esta lechada se espera tener mayor resistencia a la compresión y se lograría que la cementación no sufra alguna fractura debido a la presión de la formación o a la presión del fluido de perforación, siendo esta resistencia a dichas fuerzas. También ayudara a sostener la tubería de revestimiento.

En la tabla 4.23 se puede observar que para el sistema convencional se requiere mayores cantidades de agua y sacos de cemento con menor costo pero que el mismo puede requerir una cementación secundaria y en algunos casos una cementación forzada.

En el caso del sistema MV-4 se requiere menor cantidad de agua y sacos de cemento con mayor costo, pero el fin de la aplicación de este sistema es no aplicar una cementación secundaria y tener un ahorro en cuanto al tiempo, costos, materiales, etc.

Haciendo un análisis en el costo se tiene un costo mayor para el sistema MV-4 pero si se enfoca en un costo de trabajo de remediación aproximado es de 200000\$ más el costo del sistema convencional se gastaría alrededor de 1468061\$ que significa un precio mucho mayor al uso de una sola lechada del sistema MV-4.

Un trabajo con la tecnología MV-4 asumido es de 1324419 \$ para un solo pozo, por lo que se tendría un ahorro de 143642\$.

FASE 36"-CAÑERÍA 30", TRAMO 0-100 m

➤ Lechada con sistema MV-4

Costo sin aditivos:

$$\begin{aligned} \text{costo} &= 252.22 \text{ BBL} * \frac{200 \$}{1 \text{ bBL}} \\ \text{costo} &= 50444 \$ \end{aligned}$$

Costo con aditivos:

$$\begin{aligned} \text{costo} &= 252.22 \text{ Bbl} * \frac{470 \$}{1 \text{ bBL}} \\ \text{costo} &= 118543.40 \$ \end{aligned}$$

➤ Lechada con sistema convencional

Costo sin aditivos:

$$\begin{aligned} \text{costo} &= 252.22 \text{ BBL} * \frac{150 \$}{1 \text{ bBL}} \\ \text{costo} &= 37833 \$ \end{aligned}$$

Costo con aditivos:

$$\begin{aligned} \text{costo} &= 252.22 \text{ Bbl} * \frac{450 \$}{1 \text{ bBL}} \\ \text{costo} &= 113499 \$ \end{aligned}$$

FASE 24"-CAÑERÍA 20", TRAMO 100-800 m

➤ Lechada con sistema MV-4

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 672.62 \text{ BBL} * \frac{200 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 134524 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 672.62 \text{ Bbl} * \frac{470 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 316131.40 \$$$

➤ Lechada con sistema convencional

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 672.62 \text{ BBL} * \frac{150 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 100893 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 672.62 \text{ Bbl} * \frac{450 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 302679 \$$$

FASE 17 1/2"-CAÑERÍA 13 3/8", TRAMO 800-2000 m

➤ Lechada con sistema MV-4

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 1054.57 \text{ BBL} * \frac{200 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 210914 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 1054.57 \text{ Bbl} * \frac{470 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 495647.90 \$$$

➤ **Lechada con sistema convencional**

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 1054.57 \text{ BBL} * \frac{150 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 158185.50 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 1054.57 \text{ Bbl} * \frac{450 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 474556.50 \$$$

FASE 12 1/4"-CAÑERÍA 9 5/8", TRAMO 2000-3510 m

➤ **Lechada con sistema MV-4**

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 770.26 \text{ BBL} * \frac{200 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 154052 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 770.26 \text{ Bbl} * \frac{470 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 362022.20 \$$$

➤ **Lechada con sistema convencional**

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 770.26 \text{ BBL} * \frac{150 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 115539 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 770.26 \text{ Bbl} * \frac{450 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 346617 \$$$

FASE 8 1/2"-CAÑERÍA 7", TRAMO 3510-4218 m

➤ Lechada con sistema MV-4

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 68.24 \text{ BBL} * \frac{200 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 13648 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 68.24 \text{ Bbl} * \frac{470 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 32072.80 \$$$

➤ Lechada con sistema convencional

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 68.24 \text{ BBL} * \frac{150 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 10236 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 68.24 \text{ Bbl} * \frac{450 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 30708 \$$$

Costo general de la lechada de cemento

➤ Lechada con sistema MV-4

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 2817.91 \text{ BBL} * \frac{200 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 56358 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 2817.91 \text{ Bbl} * \frac{470 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 1324417.70 \$$$

➤ **Lechada con sistema convencional**

Costo sin aditivos:

$$\text{costo} = 2817.91 \text{ BBL} * \frac{150 \$}{1 \text{ bBL}}$$

$$\text{costo} = 422686.50 \$$$

Costo con aditivos:

$$\text{costo} = 2817.91 \text{ Bbl} * \frac{450 \$}{1 \text{bBL}}$$

$$\text{costo} = 1268059.50 \$$$

En la tabla 5.1 se resumen los costos

Tabla 5. 1 Costos finales entre el sistema MV-4 y el convencional.

Tramo	Caracteristica	Sist. MV-4	Sist. Convencional	Diferencias
Tramo Guia	Costo c/Aditivos (\$)	118543,40	113499,00	5044,40
	Costo s/Aditivos (\$)	50444,00	37833,00	12611,00
Tramo Superficial	Costo c/Aditivos (\$)	316131,40	302679,00	13452,40
	Costo s/Aditivos (\$)	134524,00	100893,00	33631,00
Tramo Intermedio	Costo c/Aditivos (\$)	495649,31	474557,85	21091,46
	Costo s/Aditivos (\$)	210914,60	158185,95	52728,65
Tramo de Produccion	Costo c/Aditivos (\$)	362022,20	346617,00	15405,20
	Costo s/Aditivos (\$)	154052,00	115539,00	38513,00
Tramo Liner	Costo c/Aditivos (\$)	32072,80	30708,00	1364,80
	Costo s/Aditivos (\$)	13648,00	10236,00	3412,00
Total	Costo c/Aditivos (\$)	1324419,11	1268060,85	56358,26
	Costo s/Aditivos (\$)	563582,60	422686,95	140895,65

Fuente: Elaboración propia

En el Anexo B se detalla el costo por tramo específico a partir de los costos de los aditivos de fibra de polipropileno y resina de poliuretano.

De los costos obtenidos en la cementación convencional, un trabajo de cementación con tecnología MV – 4 tendrá un costo de 30% por el barril adicional que la convencional. Este porcentaje adicional es por la cantidad de aditivos, fibra de polipropileno y la resina de poliuretano, que contiene la lechada.

En la cementación de un pozo con el sistema MV – 4 se utiliza una sola lechada contrariamente a la convencional que utiliza 2.

En muchos trabajos de cementación donde hubo una mala formulación se tuvo que acudir a prácticas de correcciones o reacondicionamientos. El estimado para realizar este tipo de

trabajos cuesta aproximadamente unos 200000\$ con un retraso de 3 días para que inicie la producción del pozo. El precio estimado del trabajo de remediación de la cementación se da por varios factores como el costo diario de la plataforma que es aproximadamente 45000\$, toma de registros eléctricos que en ocasiones se realizan dos veces, un nuevo diseño de lechada y el trabajo además de cantidad de detonaciones que se deberá realizar.

Con el uso de la lechada con fibra de polipropileno y resina de poliuretano MV – 4, se evitará el uso de todo ese valor de remediación, esto por su arreglo de partículas que hace que la lechada tenga una menor porosidad, se expanda, cubra y de un buen aislamiento zonal a las formaciones en comparación con el uso de lechadas convencionales.

Un ejemplo de pozo, la producción esperada sea de 800 barriles por día, se perdería 2400 barriles de crudo en los 3 días de trabajo de remediación, comprobando que, con el uso de la lechada propuesta en el presente proyecto, se ahorraría este tiempo de remediación. SI al año se realizan 8 trabajos de remediación por una mala cementación, se perdería un mes de tiempo. Haciendo un análisis en el costo de trabajo de remediación aproximado es de 200000\$ más el costo del sistema convencional y se gastaría alrededor de 1468061\$ que es un precio mucho mayor al uso de una sola lechada con fibra de polipropileno y resina de poliuretano.

Un trabajo con la lechada propuesta es de 1324419\$ para un solo pozo, por lo que se tendría un ahorro de 143642\$.

5.10 Análisis de costo beneficio

$$\frac{B}{C} = \frac{VAi}{VAC}$$

Donde:

VAi = valor actual de los ingresos

VAC = valor actual de los costos de inversión

$$\frac{B}{C} = \frac{200000 + 1268060.85 - 1324419.11}{1324419.11}$$

$$\frac{B}{C} = 1.3 \rightarrow 1.3 > 1 \therefore \text{PROYECTO RENTABLE}$$

Haciendo un análisis de costo beneficio, se observa con los datos obtenidos que el proyecto es rentable.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se ha optimizado las diferentes propiedades de la lechada propuesta a partir de la adición de fibra de polipropileno y resina de poliuretano mediante las diferentes pruebas de laboratorio.
- Se obtuvieron datos de diferentes muestras de lechada con distintas composiciones de aditivos para poder obtener la mejor lechada, siendo la muestra MV – 4 la más importante.
- Al garantizar la elaboración de una lechada exitosa, se reduce el riesgo de cementación remedial con lo cual la producción empieza inmediatamente; así mismo se tendrá un retorno temprano de la inversión lo que permitirá que se generen dividendos e intereses para la compañía operadora a corto plazo teniendo un ahorro de 143642\$ ya que con esta lechada la cementación tendrá un 100% de eficacia, es decir, una buena adherencia cemento-formación y cañería-cemento. Por consiguiente, se tiene una segura y económica producción de hidrocarburos.
- Las pruebas realizadas en el laboratorio han demostrado que un trabajo meticuloso, ordenado y sobre todo organizado pueden generar excelentes resultados.
- Se ha observado tanto de forma cuantitativa como cualitativa las diferencias que existen entre una lechada convencional y una lechada con fibra de polipropileno y resina de poliuretano. En algunas pruebas la evidencia fue tal que la muestra convencional se destruyó como en la prueba de filtrado excesivo con el filtro prensa API y que la muestra MV – 4 presenta una resistencia a la compresión muchísimo mayor gracias a la estructura tridimensional.

6.2 RECOMENDACIONES

- La implementación de resina de poliuretano es una magnífica alternativa en el diseño de una lechada de cemento, sin embargo, hay que tener en consideración que a bajas temperaturas tiende a solidificarse demasiado rápido, se recomienda el seguimiento a las temperaturas de mezclado además de las temperaturas cuando se está realizando alguna prueba. La norma API recomienda que la lechada de cemento este a una temperatura de 80°F para evitar malas prácticas de laboratorio.
- En algunas pruebas se tuvo la limitación de la ausencia de algunos equipos y se tuvo que trabajar con alternativas que, si bien no son las mejores, estas ayudaron a llevar a cabo la finalidad de demostrar la eficiencia de la propuesta de lechada de cemento.



ÍNDICE DE PALABRAS ABREVIADAS

Siglas

API:	American Petroleum Institute (Instituto Americano del Petróleo) API RP: American Petroleum Institute Recommended Practice (practica recomendada)
Bc:	Bearden Consistency (Consistencia Bearden)
BHCT:	Bottom Hole Circulating Temperature (temperatura circulante de fondo)
BHST:	Bottom Hole Static Temperature (temperature estática de fondo)
BHP:	Bottom Hole Pressure (presión de fondo)
BWOC:	By Weight Of Cement (por peso de cemento)
cP:	Centi Poise
cm:	centímetro
PSI=lpc:	Pounds per Square Inch = Libras por Pulgadas Cuadradas
POD:	Point Of Departure (punto de partida)
ppg:	Pounds Per Gallon (libras por galón)
Pv:	Plastic viscosity (viscosidad plástica)
Ty:	yield point (punto cedente o de cedencia)
g:	gramo
s:	segundo
Pa:	Pascal
RPM:	Revolución Por Minuto
ft ² :	pie cuadrado
in:	pulgada

lbf:	libra fuerza
UCA:	Ultrasonic Cement Analyzer
ml:	Mililitro
lb/gal:	libra por galón
gal/sk:	galón por saco (bolsa de cemento)
FLAC's:	Fluid Loss Additive Controller's (controladores de perdida de fluido)
WOC:	Wait On Cement
mm:	milímetro
°F:	grado Fahrenheit
°C:	grado centígrado
H:	H ₂ O (agua)
C:	CaO (Oxido de Calcio)
S:	SiO ₂ Sílice, oxido silícico
A:	Al ₂ O ₃ Alúmina, oxido de aluminio
F:	Fe ₂ O ₃ Oxido Férrico
C3A:	3 CaO•Al ₂ O ₃ Aluminato tricalcico
C3S:	3 CaO• SiO ₂ Silicato tricalcico
C2S:	2 CaO• SiO ₂ Silicato dicalcico
C-S-H:	CaO• SiO ₂ • H ₂ O (Hidrato de Silicato Cálcico)

BIBLIOGRAFIA

- Crespo Villalaz. (2004). Mecánica de suelos y cementaciones. Panamá: Limusa.
- Henry W. Haslach, Jr. Ronald W. Armstrong. (2003). Deformable bodies and their material behavior. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
- Donald R. Askeland Pradeep P. Phulé. (2004). Ciencia e ingeniería de los materiales. México: Digital Oriente S.A.
- Dwight K. Smith. (1987). Cementing. Pennsylvania: Fondo HL Doherty Memorial de AIME, Society of Petroleum Engineers.
- Halliburton. (2016). Cementation. 21 de October de 2016, de Halliburton Sitio web: http://www.halliburton.com/en-US_cementing_public/ps/cementing-services.page?node-id=hdhdvbx#
- Schlumberger. (2006). Well Cementing. Sugar Land, Texas: Schlumberger.
- Jose Francisco Gomez Martinez. (2018). Manual teórico-práctico para el conocimiento de los alumnos de la carrera de Ingeniería Petrolera sobre los equipos, cementos y aditivos empleados en la cementación petrolera. Mexico: UNAM.
- Robert L. Mott. (2006). Mecánica de fluidos. Mexico: Pearson.
- American Petroleum Institute. (2013). Practica recomendada para "Evaluacion de Cementos de Pozos". (Testing Well Cements): API
- Knox A. Slagle. (1962). Rheological Design of Cementing Operations. Journal of Petroleum Technology, 323-328.
- Gunnar DeBrujin, Criag Skeates, Robert Greenawat. (2008). Tecnologías para alta presión y alta temperatura. Massachusetts, EUA: Schlumberger.
- Edwin Carlos Badani Aguirre. (1988). Cementación de pozos petrolíferos y galloferos. La Paz, Bolivia: UMSA.
- UMSA. (2013). Guía de Fluidos de Perforación y Laboratorio. La Paz, Bolivia: UMSA.
- Wenceslao Cabrera Segales. (2009). Laboratorio de Fluidos de Perforación. La Paz, Bolivia: UMSA.

ANEXOS

Anexo A. Resultados de laboratorio

- Muestra lechada base:** Esta muestra ha sido elaborada con el fin de hacer las respectivas comparaciones con las muestras siguientes y así comparar las diferentes propiedades de la lechada de cemento. Los resultados obtenidos de esta muestra se muestran en la tabla A.1

Tabla A.1 Cuadro resumen muestra Lechada base.

Muestra Lechada Base							
Preparacion		Densidad		Fluido libre [ml]		Perdida de fluido por filtracion [ml]	
Lechada Base		Lechada		Despreciable		27	
Lechada		m_l [g]	1008				
m_l [g]	939,12	v_l [ml]	600				
v_l [ml]	600	ρ_l [g/ml]	1,68				
ρ_l [g/ml]	1,68	ρ_l [ppg]	14,02				
Cemento		Reologia					
m_c [g]	602	Lecturas Viscosimetro					
v_c [ml]	191,11	600	70	τ	γ	<div style="text-align: center;">Lechada Base</div>	
ρ_c [g/ml]	3,15	300	50	12,7049	0,1		
Agua		200	36	12,8357	0,2		
m_w [g]	337,12	100	21	12,9353	0,3		
v_w [ml]	337,12	6	18	13,0188	0,4		
ρ_w [g/ml]	1	3	16	13,0921	0,5		
Polipropileno		Viscosidad plastica [cP]			13,1582		0,6
m_{pp} [g]		20			13,2189		0,7
v_{pp} [ml]		Viscosidad aparente [cP]			13,2752		0,8
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	35			13,3280		0,9
Poliuretano		Yield Point [lb/100ft ²]			13,3779	1	
Poliol		30					
m_{po} [g]		Indice modelo exponencial					
v_{po} [ml]		0,4854					
ρ_{po} [g/ml]	1,22	Indice de consistencia					
Isocianato		[lb*seg ⁿ /100ft ²]					
m_{is} [g]		12,378					
v_{is} [ml]							
ρ_{is} [g/ml]	1,10						

Fuente: Elaboración propia

Con esta muestra se obtienen datos de una lechada normal sin aditivos cuyas propiedades han sido obtenidos para una presión y temperaturas sugeridas por la norma API RP 10B. Esta lechada no será tomada en cuenta debido a sus características pobres en la aplicación a un pozo convencional.

- **Muestra lechada MV-1:** Esta lechada fue formulada sin fibra de polipropileno para observar las propiedades en sus distintas pruebas de laboratorio. Los resultados obtenidos de esta muestra se muestran en la tabla A.2

Tabla A.2 Cuadro resumen muestra MV-1

Muestra MV-1					
Preparacion		Densidad		Fluido libre [ml]	Perdida de fluido por filtracion [ml]
Muestra MV-1		Lechada		Despreciable	25
Lechada		m_l [g]	944,69		
m_l [g]	944,69	v_l [ml]	600		
v_l [ml]	600	ρ_l [g/ml]	1,57		
ρ_l [g/ml]	1,57	ρ_l [ppg]	13,10		
Cemento		Reologia			
m_c [g]	602	Lecturas Viscosimetro			
v_c [ml]	191,11	600	74	τ	γ
ρ_c [g/ml]	3,15	300	55	19,8412	0,1
Agua		200	38	19,9701	0,2
m_w [g]	337,12	100	24	20,0653	0,3
v_w [ml]	337,12	6	22	20,1435	0,4
ρ_w [g/ml]	1	3	16	20,2112	0,5
Polipropileno		Viscosidad plastica [cP]		20,2716	0,6
m_{pp} [g]		19		20,3264	0,7
v_{pp} [ml]		Viscosidad aparente [cP]		20,3769	0,8
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	37		20,4239	0,9
Poliuretano		Yield Point [lb/100ft ²]		20,4680	1
Poliol		36			
m_{po} [g]	2,93	Indice modelo exponencial			
v_{po} [ml]	2,4	0,4281			
ρ_{po} [g/ml]	1,22	Indice de consistencia			
Isocianato		[lb*seg ⁿ /100ft ²]			
m_{is} [g]	2,64	19,468			
v_{is} [ml]	2,4				
ρ_{is} [g/ml]	1,10				

Velocidad de corte [γ]	Esfuerzo de corte [γ]
19,8000	0,1
20,0000	0,2
20,2000	0,3
20,4000	0,4
20,6000	0,5
20,8000	0,6
21,0000	0,7
21,2000	0,8
21,4000	0,9
21,6000	1,0

Muestra MV-1

γ

Fuente: Elaboración propia

La muestra MV-1 no será tomada en cuenta como lechada representativa del presente proyecto ya que los datos obtenidos en las pruebas de Fluido libre y Perdida de fluido por

filtración no son lo suficientemente buenas para la optimización de una lechada convencional de cemento ya que estas superan por mucho el nivel requerido para una buena lechada, esto debido a que esta lechada está formulada a partir de solamente resina de poliuretano y no así de fibra de polipropileno.

- **Muestra lechada MV-2:** El resumen de los datos obtenidos de esta muestra se las presenta en la tabla A.3

Tabla A.3 Cuadro resumen muestra MV-2

Muestra MV-2						
Preparacion		Densidad		Fluido libre [ml]		Perdida de fluido por filtracion [ml]
Muestra MV-2		Lechada		0		19
Lechada		m _i [g]		949,50		
m _i [g]	949,50	v _i [ml]	600			
v _i [ml]	600	ρ _i [g/ml]	1,58			
ρ _i [g/ml]	1,58	ρ _i [ppg]	13,19			
Cemento		Reologia				
m _c [g]	602	Lecturas Viscosimetro				
v _c [ml]	191,11	600	84	τ	γ	Muestra MV-2
ρ _c [g/ml]	3,15	300	61	17,8678	0,1	
Agua		200	40	17,9981	0,2	
m _w [g]	337,12	100	27	18,0960	0,3	
v _w [ml]	337,12	6	23	18,1775	0,4	
ρ _w [g/ml]	1	3	17	18,2486	0,5	
Polipropileno		Viscosidad plastica [cP]		18,3123	0,6	
m _{pp} [g]	4,81	23		18,3706	0,7	
v _{pp} [ml]	5,06	Viscosidad aparente [cP]		18,4245	0,8	
ρ _{pp} [g/ml]	0,95	42		18,4749	0,9	
Poliuretano		Yield Point [lb/100ft ²]		18,5224	1	
Poliol		38				
m _{po} [g]	2,93	Indice modelo exponencial				
v _{po} [ml]	2,4	0,4620				
ρ _{po} [g/ml]	1,22	Indice de consistencia				
Isocianato		[lb*seg ⁿ /100ft ²]				
m _{is} [g]	2,64	17,522				
v _{is} [ml]	2,4					
ρ _{is} [g/ml]	1,10					

Fuente: Elaboración propia

La muestra MV-2 es una buena propuesta de lechada sin embargo la densidad y la perdida de fluido por filtración no son adecuadas para que sea una lechada óptima para la aplicación en un pozo por eso esta muestra también será descartada.

- **Muestra lechada MV-3:** El resumen de los datos obtenidos de esta muestra se las presenta en la tabla A.4

Tabla A.4 Cuadro resumen muestra MV-3

Muestra MV-3						
Preparacion		Densidad		Fluido libre [ml]		Perdida de fluido por filtracion [ml]
Muestra MV-3		Lechada		0		16
Lechada		m_l [g]	955,72			
m_l [g]	955,72	v_l [ml]	600			
v_l [ml]	600	ρ_l [g/ml]	1,59			
ρ_l [g/ml]	1,59	ρ_l [ppg]	13,27			
Cemento		Reologia				
m_c [g]	602	Lecturas Viscosimetro				
v_c [ml]	191,11	600	110	τ	γ	
ρ_c [g/ml]	3,15	300	70	6,3521	0,1	
Agua		200	55	6,4795	0,2	
m_w [g]	337,12	100	29	6,5854	0,3	
v_w [ml]	337,12	6	24	6,6795	0,4	
ρ_w [g/ml]	1	3	18	6,7657	0,5	
Polipropileno		Viscosidad plastica [cP]		6,8460	0,6	
m_{pp} [g]	5	40		6,9218	0,7	
v_{pp} [ml]	5,26	Viscosidad aparente [cP]		6,9939	0,8	
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	55		7,0629	0,9	
Poliuretano		Yield Point [lb/100ft ²]		7,1293	1	
Poliol		30				
m_{po} [g]	6,1	Indice modelo exponencial				
v_{po} [ml]	5	0,6520				
ρ_{po} [g/ml]	1,22	Indice de consistencia				
Isocianato		[lb*seg ⁿ /100ft ²]				
m_{is} [g]	5,5	6,129				
v_{is} [ml]	5					
ρ_{is} [g/ml]	1,10					

Muestra MV-3

γ

Velocidad de corte [γ]	Esfuerzo de corte [τ]
6,4000	0,1
6,5000	0,2
6,6000	0,3
6,7000	0,4
6,8000	0,5
6,9000	0,6
7,0000	0,7
7,1000	0,8
7,2000	0,9
7,3000	1,0

Muestra MV-3

γ

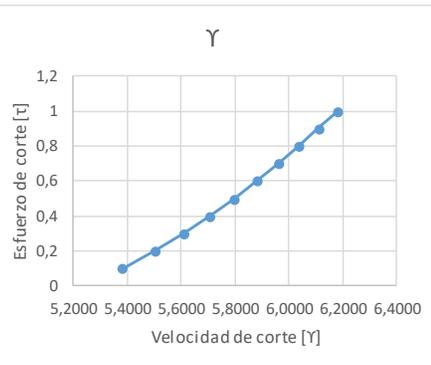
Fuente: Elaboración propia

La muestra MV-3 es una buena propuesta de lechada sin embargo la densidad y la perdida de fluido por filtración no son adecuadas para que sea una lechada óptima para la aplicación en un pozo por eso esta muestra también será descartada.

- **Muestra lechada MV-4:** El resumen de los datos obtenidos de esta muestra se las presenta en la tabla A.5

Tabla A.5 Cuadro resumen muestra MV-4

Muestra MV-4						
Preparacion		Densidad		Fluido libre [ml]		Perdida de fluido por filtracion [ml]
Muestra MV-4		Lechada		0		12
Lechada		m _l [g]	967,32			
m _l [g]	967,32	v _l [ml]	600			
v _l [ml]	600	ρ _l [g/ml]	1,61			
ρ _l [g/ml]	1,61	ρ _l [ppg]	13,44			
Cemento		Reologia				
m _c [g]	602	Lecturas Viscosimetro				
v _c [ml]	191,11	600	130	τ	γ	Muestra MV-4
ρ _c [g/ml]	3,15	300	80	5,3804	0,1	
Agua		200	55	5,5050	0,2	
m _w [g]	337,12	100	30	5,6113	0,3	
v _w [ml]	337,12	6	26	5,7074	0,4	
ρ _w [g/ml]	1	3	20	5,7964	0,5	
Polipropileno		Viscosidad plastica [cP]			5,8803	
m _{pp} [g]	5	50			5,9600	
v _{pp} [ml]	5,26	Viscosidad aparente [cP]			6,0364	
ρ _{pp} [g/ml]	0,95	65			6,1099	
Poliuretano		Yield Point [lb/100ft ²]			6,1811	
Poliol		30				
m _{po} [g]	12,2	Indice modelo exponencial				
v _{po} [ml]	10	0,7000				
ρ _{po} [g/ml]	1,22	Indice de consistencia				
Isocianato		[lb*seg ⁿ /100ft ²]				
m _{is} [g]	11	5,181				
v _{is} [ml]	10					
ρ _{is} [g/ml]	1,10					



Fuente: Elaboración propia

La muestra MV-4 es la lechada más representativa y la que más se adapta a los parámetros buscados según la norma API RP 10B. Esta muestra además de tener una densidad optima la perdida de fluido por filtración es mínima debido a la concentración de fibra de polipropileno que optimiza la retención de líquidos y que evita que la lechada en la etapa de fragüe no genere agrietamientos ni fisuras. Además, que se ha observado que después de la prueba de filtración en la Prensa API esta no sufrió daños en comparación con las otras muestras, especialmente con la muestra de Lechada base que sufrió fisuras.

Anexo B. Análisis de costos por tramo.

Los costos de los aditivos para la propuesta de la lechada de cemento MV-4 son obtenidos por la información de venta de productos de construcción e ingeniería de las distintas empresas como muestra la tabla B.1.

Tabla B.1 Costos de fibra de polipropileno y resina de poliuretano.

Químicos	Costo [Bs]	Costo [\$us]
Poliol [1lt]	50	7,23
Isocianato [1lt]	50	7,23
Fibra de Polipropileno [1,32lb]	20	2,89

Fuente: Elaboración propia

Los costos de aditivos por tramos son detallados en la tabla B.2.

Tabla B.2 Costos por tramo de aditivos químicos.

Tramo Guia 0-100 [m]					
Volumen lechada [Bbl]	252,22		Costo c/Aditivos [\$]	118543,40	
Poliol [Bbl]	4,2	Costo [\$us]	4825,14	Costo s/Aditivos [\$]	50444,00
Isocianato [Bbl]	4,2		4825,14	Costo Aditivos [\$]	68099,40
Fibra de Polipropileno [Lb]	493,39		1080,29		
TOTAL [\$us]			10730,58		
Tramo Superficial 100-800 [m]					
Volumen lechada [Bbl]	672,62		Costo c/Aditivos [\$]	316131,40	
Poliol [Bbl]	11,21	Costo [\$us]	12878,54	Costo sin MV-4 [\$]	134524,00
Isocianato [Bbl]	11,21		12878,54	Costo Aditivos [\$]	181607,40
Fibra de Polipropileno [Lb]	1315,775		2880,92		
TOTAL [\$us]			28638,00		
Tramo Intermedio 800-2000 [m]					
Volumen lechada [Bbl]	1054,57		Costo c/Aditivos [\$]	495649,31	
Poliol [Bbl]	17,58	Costo [\$us]	20196,68	Costo sin MV-4 [\$]	210914,60
Isocianato [Bbl]	17,58		20196,68	Costo Aditivos [\$]	284734,71
Fibra de Polipropileno [Lb]	2062,94		4516,86		
TOTAL [\$us]			44910,21		
Tramo Produccion 2000-3510 [m]					
Volumen lechada [Bbl]	770,26		Costo c/Aditivos [\$]	362022,20	
Poliol [Bbl]	12,84	Costo [\$us]	14751,16	Costo sin MV-4 [\$]	154052,00
Isocianato [Bbl]	12,84		14751,16	Costo Aditivos [\$]	207970,20
Fibra de Polipropileno [Lb]	1506,78		3299,13		
TOTAL [\$us]			32801,45		
Tramo Liner 3510-4218 [m]					
Volumen lechada [Bbl]	68,24		Costo c/Aditivos [\$]	32072,80	
Poliol [Bbl]	1,14	Costo [\$us]	1309,68	Costo sin MV-4 [\$]	13648,00
Isocianato [Bbl]	1,14		1309,68	Costo Aditivos [\$]	18424,80
Fibra de Polipropileno [Lb]	133,49		292,28		
TOTAL [\$us]			2911,64		
TOTAL ADITIVOS MV-4[\$us]		119991,88			

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Balance de materia por tramos.

Los cálculos de las cantidades de cemento, agua, fibra de polipropileno y la resina de poliuretano fueron formulados bajo el volumen total de 600 ml de lechada de cemento como indica la norma API RP 10B, por lo que al momento de hacer los cálculos para el análisis de programa de cementación se realizó un balance de materia que se lo detalla por tramo en las tablas C.1 a C.5.

Tabla C.1 Balance de materia Tramo Guía.

Tramo Guía 0-100 [m]					
Polipropileno					
m_{pp} [g]	5	Masa Fibra de Polipropileno		Volumen Fibra de Polipropileno	
v_{pp} [ml]	5,26				
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	493,39	[Lb]	2,21	[Bbl]
Poliuretano					
Poliol					
m_{po} [g]	12,2	Masa Polioliol		Volumen Polioliol	
v_{po} [ml]	10				
ρ_{po} [g/ml]	1,22	1264,05	[Lb]	4,2	[Bbl]
Isocianato					
m_{is} [g]	11	Masa Isocianato		Volumen Isocianato	
v_{is} [ml]	10				
ρ_{is} [g/ml]	1,10	1085,43	[Lb]	4,2	[Bbl]
Muestra MV-4					
Lechada					
m_l [g]	967,32				
v_l [ml]	600				
ρ_l [g/ml]	1,61				

Masa Tramo [Lb]	Volumen Tramo [Bbl]
95339,160	252,22

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.2 Balance de materia Tramo Superficial.

Tramo Superficial 100-800 [m]					
Polipropileno					
m_{pp} [g]	5	Masa Fibra de Polipropileno		Volumen Fibra de Polipropileno	
v_{pp} [ml]	5,26				
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	1315,775	[Lb]	5,9	[Bbl]
Poliuretano					
Poliol					
m_{po} [g]	12,2	Masa Polioliol		Volumen Polioliol	
v_{po} [ml]	10				
ρ_{po} [g/ml]	1,22	3210,960	[Lb]	11,21	[Bbl]
Isocianato					
m_{is} [g]	11	Masa Isocianato		Volumen Isocianato	
v_{is} [ml]	10				
ρ_{is} [g/ml]	1,10	2894,630	[Lb]	11,21	[Bbl]
Muestra MV-4					
Lechada					
m_l [g]	967,32				
v_l [ml]	600				
ρ_l [g/ml]	1,61				

Masa Tramo [Lb]	Volumen Tramo [Bbl]
254250,360	672,62

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.3 Balance de materia Tramo Intermedio.

Tramo Intermedio 800-2000 [m]					
Polipropileno					
m_{pp} [g]	5	Masa Fibra de Polipropileno		Volumen Fibra de Polipropileno	
v_{pp} [ml]	5,26				
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	2062,94	[Lb]	9,24	[Bbl]
Poliuretano					
Poliol					
m_{po} [g]	12,2	Masa Polioliol		Volumen Polioliol	
v_{po} [ml]	10				
ρ_{po} [g/ml]	1,22	5034,31	[Lb]	17,58	[Bbl]
Isocianato					
m_{is} [g]	11	Masa Isocianato		Volumen Isocianato	
v_{is} [ml]	10				
ρ_{is} [g/ml]	1,10	4538,36	[Lb]	17,58	[Bbl]
Muestra MV-4					
Lechada					
m_l [g]	967,32				
v_l [ml]	600				
ρ_l [g/ml]	1,61				

Masa Tramo [Lb]	Volumen Tramo [Bbl]
398627,46	1054,57

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.4 Balance de materia Tramo Producción.

Tramo Produccion 2000-3510 [m]					
Polipropileno					
m_{pp} [g]	5	Masa Fibra de Polipropileno		Volumen Fibra de Polipropileno	
v_{pp} [ml]	5,26				
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	1506,78	[Lb]	6,75	[Bbl]
Poliuretano					
Poliol					
m_{po} [g]	12,2	Masa Polioliol		Volumen Polioliol	
v_{po} [ml]	10				
ρ_{po} [g/ml]	1,22	3677,07	[Lb]	12,84	[Bbl]
Isocianato					
m_{is} [g]	11	Masa Isocianato		Volumen Isocianato	
v_{is} [ml]	10				
ρ_{is} [g/ml]	1,10	3314,83	[Lb]	12,84	[Bbl]
Muestra MV-4					
Lechada					
m_l [g]	967,32				
v_l [ml]	600				
ρ_l [g/ml]	1,61				
		Masa Tramo [Lb]		Volumen Tramo [Bbl]	
		291158,28		770,26	

Fuente: Elaboración propia

Tabla C.5 Balance de materia Tramo Liner.

Tramo Liner 3510-4218 [m]					
Polipropileno					
m_{pp} [g]	5	Masa Fibra de Polipropileno		Volumen Fibra de Polipropileno	
v_{pp} [ml]	5,26				
ρ_{pp} [g/ml]	0,95	133,49	[Lb]	0,6	[Bbl]
Poliuretano					
Poliol					
m_{po} [g]	12,2	Masa Polioliol		Volumen Polioliol	
v_{po} [ml]	10				
ρ_{po} [g/ml]	1,22	325,76	[Lb]	1,14	[Bbl]
Isocianato					
m_{is} [g]	11	Masa Isocianato		Volumen Isocianato	
v_{is} [ml]	10				
ρ_{is} [g/ml]	1,10	293,67	[Lb]	1,14	[Bbl]
Muestra MV-4					
Lechada					
m_l [g]	967,32				
v_l [ml]	600				
ρ_l [g/ml]	1,61				

Masa Tramo [Lb]	Volumen Tramo [Bbl]
25794,72	68,24

Fuente: Elaboración propia