

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FR-021M COMO AGENTE DE CONTROL DEL FILTRADO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Rodríguez P., Franklig R.

Caracas, Octubre 2002.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FR-021M COMO AGENTE DE CONTROL DEL FILTRADO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Griselda Zorrilla

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título
de Ingeniero de Petróleo
Por el Br. Rodríguez P., Franklig R.

Caracas, Octubre 2002.

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi Familia en especial a mi madre Ligia Pereira por estar siempre a mi lado apoyando en todo momento brindándome su amor y confianza.

AGRADECIMIENTOS.

En primer lugar a Dios por darme salud y fuerzas todos los días e iluminarme en los momentos difíciles.

A mis hermanos Luis, José, Álvaro y Lisbeth quienes siempre confiaron en mi y ofrecieron la ayuda necesaria para lograr las metas planteadas.

A la profesora Griselda, quien me dio la oportunidad de trabajar a su lado ofreciendo todo su colaboración y experiencia, además de ofrecerme su amistad y aconsejarme en los momentos justos.

A la familia Pacheco Raul, Tati, Chale, Sra Gloria y Sr Santo por brindarme su amistad incondicional y ser como una segunda familia.

A la doctora Elevina Pérez, Lic Mercedes, Lidia, Lenise Lopez, Ramiro Mendoza y Jorge Jiménez quienes me prestaron su ayuda incondicional para desarrollar este trabajo.

Al Sr Alberto Gallardo por ser un segundo padre y amigo ofreciéndome su ayuda y tiempo en cualquier momento.

A todos mis amigos de la UCV con quienes compartí la experiencia de estudiar en la mejor universidad del mundo.

Ondina
Sugey David M
Matito
Miguel
Eliroos
Marco
Memo
Nando
Analia
Pedro
papu
Llanero
licon
veronica
Chino

Loro
Tata
Raul
Olivo
Gordo
Osglender
freddy
Milka
Carla
Mary
Carla
Tati

Rodríguez P., Franklig R.

EVALUACIÓN DEL PRODUCTO FR-021M COMO AGENTE DE CONTROL DEL FILTRADO EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA.

Tutor Académico: Prof. Griselda Zorrilla. Tesis. Caracas, U.C.V Facultad de Ingeniería. Escuela de Petróleo. Año 2002, 177 pag.

Palabras claves: Lodos, Polímeros, Modificación, Filtrado, Reología.

Resumen. El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación técnica y económica del uso del FR-021M como agente para el control del filtrado en fluidos de perforación base agua.

El producto evaluado es un polímero natural que imparte control de filtrado a una amplia gama de fluidos de perforación base agua, es estable a altas temperaturas y no proporciona problemas en la reología del lodo. Las aplicaciones y observaciones del producto se discuten en este trabajo.

La química y estructura de este polímero es comparada a los materiales actualmente existentes para el control del filtrado. Los ensayos desarrollados en el laboratorio han demostrado una comparación favorable de este producto a los aditivos actualmente utilizados por la industria.

El producto es una mezcla de polisacárido de origen natural, obtenida de tubérculos producidos en el país, lo que representa una alternativa para disminuir los costos de los fluidos de perforación y evitar las importaciones de productos para ser usados como agentes del control del filtrado, actividad que esta alineada con el programa nacional de protección de insumos nacionales estimulada por PDVSA.

Este nuevo agente posee una amplia aplicación en áreas sensibles desde el punto de vista del medio ambiente, ya que es completamente libre de materiales tóxicos, como por ejemplo el cromo.

El primer paso para evaluar el uso del producto FR-021M fue estudiar las propiedades presentadas por sistemas de lodo pertenecientes a una empresa reconocida de fluidos de perforación.

En segundo lugar se sustituyó el agente de control de filtrado comercial por el FR-021 en sus tres estados, variando las concentraciones hasta obtener las propiedades tanto reológicas como de filtrado dentro del rango recomendado por el fabricante para estos sistemas.

Los sistemas se sometieron los sistemas a pruebas especiales de envejecimiento, filtrado dinámico y formación de emulsiones, las cuales arrojaron resultados favorables que permiten afirmar que el agente de control de filtrado es capaz de resistir las condiciones de pozo, tales como presión, temperatura y ocasionar el mínimo daño a la formación.

El FR-021M en su estado nativo es poco soluble en agua y por lo tanto no puede ser aplicado a los fluidos de perforación base agua a menos que sea modificado, para obtener la solubilidad en agua. Las versiones modificadas del FR-021M pueden tener propiedades considerablemente diferentes de las del FR-021M nativo. El producto resultante del proceso de modificación física es el que mejores propiedades ofrece a los sistemas evaluados.

Este estudio permitió la optimización de las propiedades reológicas y filtrado desarrollada por los sistemas comerciales, así como la de los costos generados por la escogencia de los aditivos de los fluidos de perforación de pozos.

Indice General

	Pág.
Lista de Tablas	I
Lista de Figuras	II
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	4
2.1. Fluidos de Perforación	4
2.1.1. Antecedentes	4
2.1.2. Definición de fluidos de Perforación	6
2.1.3. Función de los Fluidos de Perforación	6
2.1.4. Propiedades de los fluidos de Perforación	8
2.1.4.1. Reología	8
2.1.4.2. Viscosidad	9
2.1.4.2.1. Influencia de la temperatura sobre la viscosidad	9
2.1.4.3. Densidad	10
2.1.4.4. Viscosidad Plástica	10
2.1.4.5. Viscosidad Aparente	11
2.1.4.6. Resistencia de gel	11
2.1.4.6.1. Generalización de la fuerza de gel	12
2.1.4.7. Punto Cedente	13
2.2. Evaluación de las Propiedades Reológicas de los Fluidos de Perforación	14
2.2.1. Factores que afectan a la Reología	15
2.2.1.1. Temperatura	16
2.2.1.2. Presión	16
2.2.1.3. Tiempo	16
2.3. Invasión del filtrado de lodo	17
2.4. Filtración	17
2.4.1. Mecanismos de Filtración Dinámica y Estática	19

2.4.2. Filtración Estática	20
2.4.3. Filtración Dinámica	24
2.5. Composición de los Fluidos de Perforación	28
2.5.1. Fase Líquida	28
2.5.2. Fase Sólida	29
2.6. Lodos Poliméricos	32
2.7. Sistemas Comerciales	33
2.7.1. Sistema Poly-Plus®	33
2.7.2. Sistema LLT	36
2.7.3. Sistema Flo-Pro®	37
2.7.4. Sistemas Sales de Formiato®	38
2.8. Daños a Formación	41
2.9. Polisacáridos	45
2.9.1. Almidones	46
2.9.1.1. Gránulos de Almidón	47
2.9.1.1.1. Composición de los granos de Almidón	48
2.9.1.2. Uso del Almidón	49
2.9.1.3. Propiedades Funcionales de los Almidones	50
2.9.1.3.1. Factores que afectan las Propiedades Funcionales	50
2.9.2. Amilosa	51
2.9.3. Amilopectina	52
2.9.4. Gelatinización	53
2.9.4.1. Temperatura de Gelatinización	54
2.9.5. Retrogradación	55
2.9.6. Pasteo	55
2.9.7. Birrefringencia	56
2.9.8. Modificación del Almidón	57
2.9.8.1. Principios Físicos de modificación del almidón	58
2.9.8.1.1. Método de Deshidratación con Doble Tambor	59
2.9.8.1.2. Método de Extrusión	60

2.9.8.2. Principios Químicos de Modificación	62
3. Metodología Experimental	63
3.1. Diseño de las Formulaciones de los Sistemas de Fluidos de perforación	63
3.2. Prueba de Envejecimiento	65
3.3. Pruebas Especiales	65
3.4. Procesos de Modificación	66
3.4.1. Modificación Física (Doble Tambor)	67
3.4.2. Modificación Química (Base Fuerte)	68
4. Discusión de Resultados	70
4.1. Sistema Flo-Pro®	70
4.2. Sistema Poli-Plus®	82
4.3. Sistema Sales de formiato®	94
4.4. Sistema LLT	101
4.5. Prueba de Compatibilidad de los Fluidos	111
4.6. Análisis de Costos	112
5. Conclusiones	114
6. Recomendaciones	116
7. Referencias Bibliográficas	117
8. Lista de símbolos	120
9. Glosario	122
10. Apéndice	125
Apéndice 1. Tablas de Resultados	125
Apéndice 2. Cálculos Tipo	139
Apéndice 3. Equipos	143
Apéndice 4. Costos	167
11. Anexos	176

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 2.1. Densificantes comúnmente usados en los Fluidos de Perforación	31
Tabla 2.2. Formulación del Sistema Poly-Plus®, no densificado	35
Tabla 2.3. Formulación del Sistema Poly-Plus®, densificado	35
Tabla 2.4. Propiedades Típicas del Sistema Poly- Plus®	35
Tabla 2.5. Formulación del Sistema LLT	36
Tabla 2.6. Propiedades Típicas del Sistema LLT	37
Tabla 2.7. Propiedades Típicas del Sistema Flo-Pro®	38
Tabla 2.8. Formulación del Sistema Formiato®	40
Tabla 2.9. Propiedades Típicas del Sistema Formiato®	40
Tabla 2.10. Temperatura de Gelatinización de algunos Polisacáridos	55
Tabla 3.1. Nomenclatura para los diversos Estados del FR-021M	65
Tabla 3.2. Secuencia de Pasos Seguidos durante la filtración Dinámicas	66
Tabla 3.3. Relación de Soda Cáustica para Gelatinizar Polisacáridos en Suspensión a concentraciones desde 1 hasta 5% en agua	69
Tabla 4.1. Propiedades de Sistema Flo-Pro comercial, y para una Concentración de 4 lpb de FR-021M modificado	72
Tabla 4.2. Propiedades del Sistema Flo-Pro antes y después de envejecido (4 lpb de FR-021M modificado físicamente)	77
Tabla 4.3. Propiedades de Sistema Poly-Plus comercial, y para una Concentración de 3 lpb de FR-021M modificado.	83
Tabla 4.4. Propiedades del Sistema Poly-Plus antes y después de envejecido (3 lpb de FR-021M modificado físicamente)	88
Tabla 4.5. Propiedades de Sistema Formiato comercial, y para una Concentración de 2 lpb de FR-021M modificado	95
Tabla 4.6. Propiedades del Sistema Formiato antes y después de envejecido (2 lpb de FR-021M modificado físicamente)	98

Tabla 4.7. Propiedades de Sistema LLT comercial, y para una concentración de 4 lpb de FR-021M modificado	102
Tabla 4.8. Propiedades del Sistema LLT antes y después de envejecido (4 lpb de FR-021M modificado físicamente)	107
Tabla 4.9. Resultados de la Prueba de Compatibilidad de los Fluidos a 150°F	111
Tabla 4.10. Comparación de Costos de los Sistemas Evaluados	112

Índice de Figuras

	Pág.
Figuras 2.1. Representación grafica de algunos modelos para el Comporta miento reológico de los fluidos, Newtonianos y de Bingham	14
Figura 2.2. Clasificación de la fase líquida de los fluidos Perforación	28
Figura 2.3. Clasificación de la fase Sólidas de los fluidos Perforación	30
Figura 2.4. Composición química de la Glucosa	45
Figura 2.5. Composición química de la Celulosa	46
Figura 2.6. Composición química de los Almidones	47
Figura 2.7. Vista microscópica de los gránulos de Almidón	48
Figura 2.8. Estructura de la Amilosa	52
Figura 2.9. Estructura de la Amilopectina	53
Figura 2.10. Curva de gelatinización-retrogradación del Almidón	56
Figura 3.1. Diagramas de actividades en el laboratorio	64
Figura 3.2. Flujograma de modificación por deshidratación con doble tambor	67
Figura 4.1. Comportamiento de la pérdida de filtrado en el sistema Flo-Pro	70
Figura 4.2. Comportamiento de la viscosidad plástica en el sistema Flo-pro	73
Figura 4.3 Comportamiento del punto cedente para el sistema Flo-pro	74
Figura 4.4. Comportamiento del índice reológico en el sistema Flo-pro	75
Figura 4.5. Comportamiento de la viscosidad aparente en el sistema Flo-pro	76
Figura 4.6. Pérdida de filtrado antes y después de envejecido el sistema Flo-Pro	78
Figura 4.7. Viscosidad plástica antes y después de envejecido el sistema Flo-Pro	79
Figura 4.8. Propiedades reológicas antes y después de envejecido el sistema Flo-Pro	79
Figura 4.9. Filtración dinámica para el sistema Flo-Pro	

(4 lpb de FR-021M modificado físico)	80
Figura 4.10 Tasa de filtrado para el sistema Flo-pro	
(4 lpb de FR-021M modificado físico)	81
Figura 4.11 Comportamiento de la pérdida de filtrado en el sistema Poly-Plus	82
Figura 4.12. Comportamiento de la viscosidad plástica en el sistema Poly-Plus	84
Figura 4.13.Comportamiento del punto cedente para el sistema Poly-Plus	85
Figura 4.14. Comportamiento de la viscosidad aparente en el sistema Poly-Plus	86
Figura 4.15 Comportamiento del índice reológico para el sistema Poly-Plus	87
Figura4.16.Pérdida de filtrado antes y después de envejecido el sistema Sistema Poly-Plus	90
Figura4.17.Viscosidad plástica antes y después de envejecido el sistema Sistema Poly-Plus	90
Figura4.18.Propiedades reológicas antes y después de envejecido el sistema Sistema Poly-Plus	91
Figura4.19.Filtración dinámica para el sistema sistema Poly-Plus	92
Figura4.20. Tasa de filtración para el sistema sistema Poly-Plus	92
Figura4.21. Comportamiento de la pérdida de filtrado en el sistema Formiato	96
Figura 4.22. Comportamiento de la viscosidad plástica en el sistema Formiato	96
Figura 4.23.Comportamiento del punto cedente para el sistema Formiato	97
Figura4.24.Filtración dinámica para el sistema sistema Formiato	100
Figura4.25. Tasa de filtración para el sistema sistema Formiato	100
Figura 4.26 Comportamiento de la pérdida de filtrado en el sistema LLT	101
Figura 4.27. Comportamiento de la viscosidad plástica en el sistema LLT	103
Figura 4.28.Comportamiento del punto cedente para el sistema LLT	104
Figura 4.29. Comportamiento del índice reológico en el sistema LLT	104
Figura 4.30 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema LLT	106
Figura4.31.Pérdida de filtrado antes y después de envejecido el sistema Sistema LLT	107
Figura4.32.Viscosidad plástica antes y después de envejecido el sistema Sistema LLT	108
Figura4.33.Propiedades reológicas antes y después de envejecido el sistema	

Sistema LLT	108
Figura4.34.Filtración dinámica para el sistema sistema LLT	110
Figura4.35. Tasa de filtración para el sistema sistema LLT	110

1. INTRODUCCIÓN.

Hay tres propiedades básicas de los fluidos de perforación que se deben controlar en todas las operaciones de perforación. Estas propiedades son: la densidad, reología y el control del filtrado. Todos los productos que se agregan a un fluido de perforación se hacen con el propósito de controlar una o más de estas propiedades. En este trabajo se evaluará y discutirá un nuevo agente para el control del filtrado.

El control de la filtración es una propiedad importante en todos los fluidos de perforación. Esta propiedad se controla de forma continua durante la perforación. Aun en el caso de no utilizarse ningún material para controlar la filtración, hay una decisión consciente basada en la evaluación de los peligros potenciales que pueden generar las altas pérdidas de filtrados, estos peligros incluyen pega de tuberías, daño de formación y costos de mantenimiento del sistema de fluidos de perforación.

Una alta pérdida de filtrado resultará en un revoque grueso frente a la formaciones permeables, a menos que la dinámica del fluido sea tal que erosione el revoque. Una perforación con revoque grueso puede conducir a una pega de la sarta de perforación. La posibilidad de que esto ocurra es una de las razones más comunes para controlar los valores de pérdida de filtrado a niveles razonablemente bajos durante la mayor parte de las operaciones de perforación. El daño a la formación es otra consideración seria a tomar en cuenta. La pérdida de filtrado se debe reducir para minimizar la invasión del mismo a la formación, de esta manera se reduce la posibilidad de cambiar la mojabilidad de la formación, limitando la invasión de los fluidos que pueden afectar seriamente los niveles de producción esperados y aumento de costo por el tratamiento de este tipo de restricciones al flujo.

Los agentes de control de filtrado actualmente utilizados caen en una de las siguientes categorías:

- Lignitos.
- Celulosas.
- Almidones.
- Polímeros Sintéticos.

Estos productos varían desde materiales extraídos de fuentes naturales como las celulosas, hasta materiales enteramente sintéticos como los poliacrilatos de sodio. El nuevo agente para el control del filtrado presentado en este trabajo, es un polímero natural el cual fue evaluado en tres estados: nativo(N), modificado químicamente (MQ) y modificado físicamente (MF).

Los almidones son polisacáridos vegetales. Fisiológicamente son sustancias de reserva energética, análogas al glicógeno animal. Estos polisacáridos se encuentran principalmente en los granos de cereales y en los tubérculos, también se encuentran en cantidades elevadas en frutas. En su estado natural, el almidón no es hidrosoluble, simplemente flota como partículas de almidón. Para que el almidón sea eficaz en los fluidos de perforación, es necesario romper las capas protectora que evitan la dispersión de la amilosa para así poder hidratarse.

Químicamente el agente de control de filtrado analizado es una mezcla de dos polisacáridos muy similares: La amilosa y la amilopectina. Esta probablemente es la mezcla de polisacárido más abundante desde el punto de vista comercial. Actualmente, los usos más amplios de esta mezcla de polisacárido son en la industria alimenticia.

De acuerdo a todo lo anteriormente presentado, en este trabajo se desarrolla un procedimiento experimental, para evaluar el uso del agente FR-021M en sus diversos estados como agente de control de filtrado para fluido de perforación poliméricos y los efectos que pueda causar su uso sobre las propiedades reológicas del fluido.

Además, se evaluarán los costos que generan el uso del FR-021 M en sus diversos estados, así como, la concentración que mejores propiedades proporciona al sistema.

2. MARCO TEÓRICO.

2.1 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

2.1.1 Antecedentes.

De acuerdo con los datos que se conocen, los lodos de perforación se utilizaron por primera vez en 1901, lo cual coincide con el inicio de la perforación rotatoria en un campo petrolero del estado de Texas U.S.A .El lodo usado era solo una mezcla de agua con arcilla.

La historia de los lodos de perforación se puede dividir en cuatro etapas fundamentales:

- Hasta 1901. Período artesanal.
- De 1901 a 1928. Período empírico.
- De 1928 a 1955. Período experimental.
- De 1955 hasta nuestros días. Período técnico.

Esta división se basa en determinadas características históricas del desarrollo de los lodos de perforación utilizados en la perforación rotatoria.

En el primer período llamado artesanal, se usaba agua, la que al mezclarse con la arcillas de la formación que se perforaban daba origen a un lodo con propiedades indeterminadas.

A medida que los años pasaron, fueron surgiendo problemas en la perforación de los pozos, lo cual hace que en la década de los años veinte se comenzara una intensa búsqueda de materiales para mejorar el lodo de circulación. Estos años constituyen el período empírico, en el que se utiliza el método de ensayo y error.

Alrededor de 1928 comienza un período experimental, cuando se logra el primer paso importante, con la introducción de la arcilla bentonita como fuente fundamental del lodo y se inició también el desarrollo de los instrumentos y equipos necesarios para la medición y control de los parámetros de los lodos.

A partir de 1926, se conceden un grupo de patentes, como la concedida a B .K Staud para el uso de material densificante tales como sulfato de bario, óxido de hierro, óxido de plomo, etc., en lodos de perforación, para impedir reventones de gas. En 1929 se le concede a P .E Harth la patente para el uso de bentonita, como agente de suspensión y gelificación en lodos de perforación. A partir de 1931 se introduce el uso del embudo Marsh, el viscosímetro Sformer, se desarrolló la técnica de preparar y mantener lodos de perforación, se hicieron numerosos estudios sobre el uso de la bentonita como agente de control de las propiedades reológicas y el filtrado y se introduce el uso del filtro prensa para determinar las propiedades de filtración. A partir de 1937 se desarrollan equipos para determinar las propiedades de los lodos y de esta manera desarrollar y mejorar los aditivos para un mejor control de sus propiedades.

A partir de 1955 comienza un vertiginoso desarrollo de las técnicas de diseño y formulación de los lodos. Se realizan vastas y profundas investigaciones que traen consigo un salto cualitativo de esta especialidad que la sitúa en el campo mundial como una ciencia con un grado de desarrollo científico y tecnológico.

2.1.2 Definición de Fluidos de Perforación.

Se definen como aquellos fluidos que cumplen con los requisitos mínimos de eficiencia y seguridad durante la perforación de un pozo. En general se trata de un fluido con características físicas y químicas apropiadas que por circulación dentro del pozo controlan la presión de fondo y remueven los ripios de la formación, entre otras cosas. Pueden ser de agua, aceite, gas, suspensiones coloidales de agua y arcilla o combinaciones de agua y aceite con diferentes contenidos de sólidos. No debe ser tóxico al medio ambiente aunque con frecuencia lo es, ni corrosivo, ni inflamable, pero sí debe ser estable a altas temperaturas y mantener sus propiedades según las exigencias de las operaciones de perforación.

2.1.3 Funciones de los Fluidos de Perforación.

El fluido de perforación es un fluido de características físicas y químicas apropiadas, cuyo propósito fundamental es hacer segura la perforación y cumplir con algunas funciones. La definición del concepto de fluido de perforación puede ser mejor comprendida mediante la explicación de sus funciones, las cuales se enumeran y explican a continuación:

- **Transportar los recortes de perforación y los derrumbes de las paredes del hoyo a la superficie.** Siendo el peso, la viscosidad y la velocidad de circulación los factores más importantes.
- **Enfriar y lubricar la mecha y la sarta de perforación.** Disipando el calor originado por el contacto de la mecha y la sarta de perforación con las formaciones.
- **Transmitir potencia hidráulica sobre la formación a través de la mecha.** Potencia hidráulica se refiere a la función dependiente de la tasa de

circulación del lodo, su presión de bombeo y el diámetro de las boquillas de la mecha, con lo que se realiza el limpiado óptimo del hoyo. Durante la perforación, el lodo es expulsado a través de las boquillas de la mecha a gran velocidad. Esta fuerza hidráulica hace que la superficie por debajo de la mecha esté libre de recorte sino se remueve de allí los recortes, la mecha sigue perforando sobre los recortes viejos reduciendo la tasa de penetración.

- **Protección de las paredes del pozo.** Mediante la formación de un revoque liso, delgado y flexible, minimizando los problemas de derrumbes y atascamiento de la tubería.
- **Sostén para las paredes del pozo.** A medida que la mecha penetra en una formación subterránea se suprime parte del apoyo lateral que ofrece las paredes del pozo. En consecuencia, existe el riesgo de derrumbamiento del pozo a menos que ese sostén sea reemplazado por el lodo de perforación hasta que el revestimiento haya sido colocado.
- **Suspensión de partículas cuando se detiene la circulación.** Los recortes y derrumbes caerán hacia el fondo del pozo a menos que el lodo tenga la capacidad de formar una estructura del tipo gel cuando no está circulando. El lodo debe, por supuesto, recuperar su fluidez cuando se reinicia la circulación.
- **Permite desechar ripios en la superficie.** Es necesario que las propiedades del lodo permitan una separación eficiente de los ripios, en superficie, obteniendo una disminución de costos y una mejor perforación.
- **Suspensión de la sarta y del revestimiento.** El peso de la sarta de perforación y de la tubería de revestimiento en el lodo, es igual a su peso

por el factor de flotación. A medida que aumenta el peso del lodo y disminuye el peso de la tubería lo que ayuda a sostener los grandes pesos de tuberías por parte de la infraestructura de superficie.

- **Control de presiones.** El agua, el gas y el petróleo que se encuentran en el subsuelo están bajo gran presión. Esta presión debe evitar un flujo incontrolado de esos fluidos de formación en el interior del pozo, éste control se logra manteniendo una presión hidrostática adecuada en el anular.
- **Facilitar la máxima obtención de información deseada acerca de las formaciones perforadas.** Mediante el estudio de los recortes de formación que son separados en los equipos de control de sólidos del lodo de perforación.
- **Medio para el perfilaje de cable.** Si bien el lodo perturba las características originales de la formación su presencia es necesaria para realizar muchos de los perfiles de cable que se emplean para la evaluación de la formación. La utilización de esos perfiles requiere que el lodo sea buen conductor de la electricidad y que presente propiedades eléctricas diferentes de las de la formación y su fluido.

2.1.4 Propiedades de los Fluidos de Perforación.

2.1.4.1 Reología

La reología es la rama de la física dedicada al estudio de la mecánica de los cuerpos deformables, describe como se deforma un cuerpo sometido a un esfuerzo externo. La reología se ocupa primordialmente de la deformación de los cuerpos cohesionados. Sin embargo, se ha extendido al estudio de la fricción de los sólidos y al estudio de sustancias como el polvo (Fernández., F1999).

2.1.4.2 Viscosidad.

Todos los fluidos reales poseen viscosidad y, por lo tanto, presentan ciertos fenómenos friccionales cuando ocurre su movimiento. La viscosidad resulta básicamente de la cohesión del intercambio de momentum molecular entre las capas de fluido y al ocurrir el flujo, estos efectos aparecen como esfuerzos tangenciales o de corte entre esas capas en movimiento (Vennard, J y Street, R.1979). La viscosidad es una propiedad de transporte muy importante de la materia, que expresa la resistencia a la deformación irreversible (fluir) del flujo. Más específicamente, esta magnitud física refleja todo lo grande que es el retardo en el movimiento relativo de las capas adyacentes de fluidos y puede ser considerada como una medida de la fricción interna entre estas láminas (Fernández., F1999).

2.1.4.2.1 Influencia de la Temperatura sobre la Viscosidad

La viscosidad varía gradualmente al variar la temperatura, pero en la viscosidad de los líquidos y de los gases, la variación de temperatura tiene un efecto opuesto, debido a las características intermoleculares fundamentales de estos. En los líquidos, el intercambio de momentos debido a la actividad molecular es pequeño en comparación con la fuerza de cohesión entre las moléculas, por lo tanto, el esfuerzo de corte (τ), y la viscosidad (μ), dependen principalmente de la magnitud de las fuerzas cohesivas que tienden a mantener a las moléculas adyacentes en posición relativa fijas unas con otras, al resistir al movimiento relativo. Debido a que esas fuerzas decrecen rápidamente al aumentar la temperatura, la viscosidad de los líquidos disminuye cuando la temperatura aumenta (Vennard, J, y Street, R. 1979).

2.1.4.3 Densidad

La densidad o peso específico, es el peso por unidad de volumen, expresado en libras por galón, esta propiedad depende del tipo de líquido usado y el material densificante que se le adicione (es más pesada el agua, 8,33 libras por galón, que el aceite que es 7,0 libras por galón). El control del peso es muy importante, ya que él nos sirve para prevenir o controlar el influjo de fluidos de la formación al pozo. El peso del lodo debe ser suficiente para contener los fluidos de las formaciones, pero no debe sobrepasar el gradiente de fractura de la formación. Es importante mantener el peso del lodo para proporcionar soporte a las formaciones expuestas en el hoyo abierto. A partir de este momento se referirá la densidad como peso del lodo.

2.1.4.4 Viscosidad Plástica.

La viscosidad plástica es generalmente descrita como la parte de la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica entre las partículas sólidas en el lodo y la viscosidad de la fase dispersada (fase líquida). Es principalmente afectada por los siguientes factores:

- Concentración de sólidos.
- Tamaño y forma de las partículas sólidas.
- Viscosidad de la fase continúa.

La viscosidad plástica aumenta al incrementar el contenido de partículas sólidas dentro del lodo, debido a un aumento de fricción entre las mismas. Mientras que la viscosidad de la fase líquida del lodo por si sola permanece igual, esta viscosidad se ve afectada por la temperatura no por los sólidos presentes (Prieto, A.1995).

Para determinar la viscosidad plástica se utiliza la siguiente ecuación:

$$V.P \text{ (cp)} = \text{Lectura 600 r.p.m.} - \text{Lectura 300 r.p.m.} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

2.1.4.5 Viscosidad Aparente.

Se define como la medición en centipoises que un fluido Newtonianos debe tener en un viscosímetro rotacional, a una velocidad de corte previamente establecida, y que denota los efectos simultáneos de todas las propiedades que causan restricción al flujo (Prieto, A.1995). A través de la viscosidad aparente podemos determinar que tan newtoniano es el fluido, Su valor puede estimarse de la siguiente forma

$$VA \text{ (cp)} = (\text{Lectura 600 r.p.m.}) / 2 \quad (\text{Ecuación 2.2})$$

2.1.4.6 Resistencia de Gel.

La resistencia de gel está relacionada con la capacidad que tiene que tiene el fluido para mantener en suspensión el material de peso y el ripio de formación, en condiciones estáticas. Se expresa en lbs/100pies.

Cuando el lodo ha sido sometido a velocidades de corte cercanas a cero durante un cierto período de tiempo, el fluido tiende a desarrollar una estructura rígida o semi-rígida. Esta propiedad se conoce como tixotropía. Este tipo de estructura, la que permite al lodo mantener en suspensión los ripios de formación al momento en que se detiene la circulación en el pozo. Es importante destacar que no necesariamente se deben mantener altas fuerzas de gel sino que se deben mantener los valores adecuados que permitan prevenir el asentamiento de los sólidos cuando se detiene la circulación del lodo para así evitar atascamiento de la sarta de perforación. (Prieto, A.1993).

El viscosímetro FANN, posee seis diferentes tasas rotatorias de corte (3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm), permite calcular de manera directa los valores de la fuerza de gel. Para un período de reposo de 10 segundos, y 10 minutos se aplica una velocidad de corte de 3 rpm y se lee directamente del dial del viscosímetro el esfuerzo de corte. Este se reporta como fuerza de gel inicial a los 10 segundos y fuerza de gel final a los 10 minutos en unidades de $\text{lb}/100 \text{ ft}^2$. (Frank, W. 1995).

2.1.4.6.1 Generalización de la Fuerza de Gel (Lummus, J. 1986).

- Los geles frágiles se caracterizan por tener valores muy idénticos a los 10 segundos y a los 10 minutos, por ejemplo 1/1,2/2,2/3.
- Los geles favorables se caracterizan por valores bajos a los 10 segundos que luego van incrementando hasta valores intermedios a los 10 minutos. Por ejemplo 2/4,3/6,4/8.
- Los geles progresivos tienen valores intermedios a los segundos, que se incrementa rápidamente hasta valores muy elevados a los minutos por ejemplo 3/20,6/35,8/50.
- Los geles invariables tienen valores muy cercanos a los 10 segundos y 10 minutos, sin embargo estos valores son muy elevados. Por ejemplo 20/21/30/32.

La fuerza de gel del fluido de perforación debe mantenerse en el rango de gel favorable:

- 1) Si las fuerzas gel son muy bajas, los fluidos de perforación no podrán mantener eficientemente los ripios suspendidos durante las conexiones y viajes de tuberías.

- 2) Si la fuerza de gel es muy alta, la presión requerida para circular el fluido, puede fracturar la formación y favorecer las condiciones de una arremetida.

2.1.4.7 Punto Cedente.

El punto de cedencia es la parte de la resistencia del flujo causada por la fuerza de atracción entre partículas. Esta fuerza de atracción es una consecuencia de las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase continua. (Frank, W. 1995). La magnitud de esta fuerza es una función de:

- Las propiedades de la superficie de sólidos del lodo.
- La concentración de sólidos cargados en el volumen del lodo.
- La concentración iónica de la fase continua del lodo.

En la práctica para determinar el punto de cedencia se utiliza la siguiente ecuación:

$$Y_b \text{ (lb/100ft}^2\text{)} = \text{Lectura 300 rpm} - V_p \quad (\text{Ecuación 2.3})$$

Observando en la figura 2.1 se puede notar que existen dos puntos de cedencia, uno real (Y_t) y otro procedente de aproximar la curva de los fluidos plásticos a una línea recta (Y_b). Relacionando ambos puntos de cedencia se obtiene la siguiente ecuación:

$$Y_t = \frac{3}{4} \times Y_b \quad (\text{Ecuación 2.5})$$

La ecuación anterior permitiría corregir el valor práctico (Y_b) obtenido por el viscosímetro FANN utilizando la ecuación 2.4, para así obtener un valor más confiable del punto cedente del fluido.

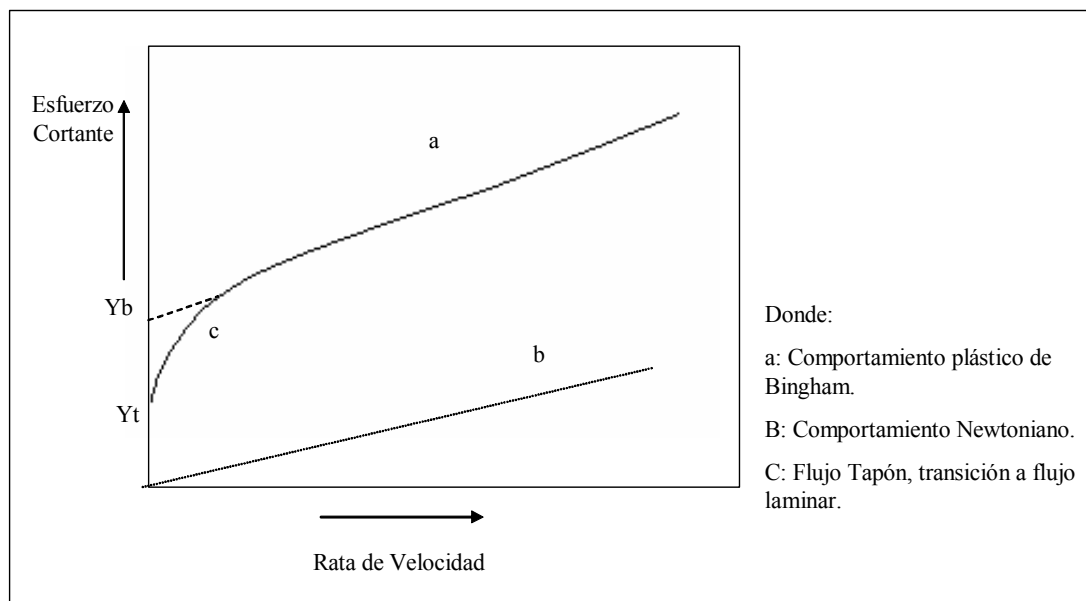


Figura 2.1 Representación gráfica de algunos modelos para el comportamiento reológico de los fluidos, Newtoniano (b) y de Bingham (a).

2.2 Evaluación de las Propiedades Reológicas de los Fluidos de Perforación.

Según Chenevert, M. en 1993 la medición de las propiedades reológicas de un lodo es importante para calcular las pérdidas por fricción y para determinar la capacidad del lodo para elevar los recortes y desprendimientos hasta la superficie, para analizar la contaminación del lodo por sólidos, sustancias químicas o temperatura; y para determinar los cambios de presión en el pozo durante un viaje.

Las propiedades físicas y químicas de un lodo de perforación deben ser controladas debidamente para asegurar un desempeño adecuado del lodo durante las operaciones de perforación. Específicamente las propiedades de flujo del lodo deben ser controladas y estas son en gran parte consecuencia de la viscosidad o más fundamentalmente de la reología básica. En general, todas las propiedades de un lodo dependen de la relación tensión de corte-velocidad de corte de ese lodo y la reología se ocupa de estudiar esa relación.

Los lodos de perforación no son fluidos Newtonianos. Por el contrario, son fluidos complejos que presentan una amplia variedad de relaciones tensión de corte-velocidad de corte. La graficación de la relación tensión de corte-velocidad de corte para un fluido dado recibe el nombre de reograma. En este reograma se puede observar dos cosas que lo diferencian de un reograma para un fluido Newtoniano. Primero, la relación esta dada por una curva y no por una línea recta. Segundo, el fluido exhibe una tensión de cedencia, es decir que, para que el fluido empiece a fluir, se debe vencer un cierto grado de resistencia interna. Además, dado que la viscosidad se define como la tensión de corte dividida por la velocidad de corte, se puede diferenciar aun más este reograma de uno perteneciente a un fluido Newtoniano ya que esta viscosidad no es constante con respecto a la velocidad de corte, tal como ocurre para los fluidos Newtonianos.

2.2.1 Factores que Afectan la Reología (Chenevert, M. 1993).

Aun cuando en el campo no existe la manera de determinar las propiedades reológicas del lodo a las condiciones de temperatura, presión y tiempo prevalentes en el pozo.

Sin embargo, es sumamente importante tomar en cuenta el efecto que estas variables pueden tener sobre el comportamiento reológico del lodo, efectos que en algunos casos pueden ser considerables.

2.2.1.1 Temperatura.

Generalmente, la viscosidad decrece a medida que aumenta la temperatura. Hay excepciones en casos como el de algunos lodos de calcio, en los cuales a unos 300 °F empieza a producir gelificación y aun cementación.

2.2.1.2 Presión.

La presión ejerce poco efecto sobre la reología de los lodos base agua, pero puede afectar significativamente la reología de los lodos base aceite.

2.2.1.3 Tiempo.

La reología de un lodo depende del tiempo. Es como si el lodo recordara las velocidades de corte que ha experimentado en el pasado y permitiera que su tensión de corte a la velocidad de corte actual sea influida parcialmente por esa memoria. Así, el orden de las lecturas en el viscosímetro FANN deben tomarse en el orden correcto, primero a 600 que a 300, ya que de invertirse el orden de las lecturas puede alterarse el resultado. La resistencia de gel es otra manifestación de la dependencia del tiempo.

La estructura del gel solo se desarrolla después de un período de tiempo durante el cual el lodo ha sido sometido a una velocidad de corte igual a cero.

2.3. Invasión del Filtrado de Lodo.

Todo lodo tiene que poseer la propiedad de formar un revoque en la pared del hoyo. El revoque es resultado del forzamiento por diferencial de presión en una formación permeable, de los sólidos del lodo contra la cara del hoyo. Los factores que gobiernan la invasión de filtrado dentro de una formación arenosa son la distribución del tamaño de poro de la arena, distribución del tamaño de partículas de los sólidos del lodo y la habilidad plástica del lodo.

El objetivo de un control adecuado de la pérdida de filtrado es formar un revoque delgado y resistente sobre la superficie de las formaciones permeables e impedir pérdidas masivas de filtrado. Además, el filtrado debe ser compatible con la formación y con los fluidos de la misma.

Mediante el control apropiado de las pérdidas de filtrado se puede obtener beneficio como menor riesgo de aprisionamiento de tuberías en formaciones permeables, mayor producción a la formación productora, mejor interpretación de los perfiles eléctricos y efectos beneficiosos para la estabilidad del pozo.

Para que exista invasión de filtrado, debe haber una presión diferencial hacia las formaciones. Una formación permeable tiene la capacidad de permitir que el flujo pase a través de ella. La permeabilidad está relacionada con el tamaño y configuración de los canales interconectados en la roca.

2.4 Filtración.

Se conoce como filtración a todo proceso de separación de los sólidos suspendidos en su líquido al forzar su paso a través de un medio poroso por efecto de un diferencial de presión. La filtración ha sido estudiada por un gran

número de investigadores, publicando ecuaciones que intenten predecir este fenómeno.

Outmans, en 1963, supuso que bajo condiciones dinámicas la filtración tiene lugar en tres etapas sucesivas. Durante cada una de estas, la tasa de filtración y/o el espesor del revoque son diferentes. Existe un equilibrio en el cual el espesor del revoque y la tasa de filtrado son constante.

Bezemer y Havennar en 1976 dijeron que el equilibrio de la tasa de filtrado es directamente proporcional a la tasa de corte en la superficie del revoque.

Hassen en 1956 propuso una serie de ecuaciones para predecir la filtración estática y dinámica, distinguiendo dos fases en el proceso de filtración, equilibrio y no-equilibrio.

Fordhan en 1976 sugirió una ecuación de filtrado dinámico asumiendo que la pérdida de filtrado puede ser descrita por tres parámetros principales: comportamiento cuasiestático temprano, comportamiento dinámico posterior y la transición entre ambos regímenes.

Peng y Peden en 1992 derivan una ecuación de filtración basada en las suposiciones de que el peso de los sólidos erosionados es proporcional a la duración de la circulación, el área del revoque y la tasa de corte sobre el revoque; el revoque está en continuo proceso de deposición y erosión, ocurriendo simultáneamente.

También asume que el flujo de filtrado a través del revoque es laminar, el revoque es incompresible y el medio filtrante es constante a través del tiempo. A partir de estos principios postularon ecuaciones diferentes no lineales para filtración dinámica y estática.

Estos modelos pueden ser usados para estimar la filtración estática y dinámica, especialmente en el equilibrio, sin embargo no son utilizados por su dificultad para ser aplicados en sistemas que no sean de sólidos dispersos, es decir, que su estructura sellante no sea constante en el tiempo, como los sistemas poliméricos cuya estructura no se comporta como un sólido, y además, a altas concentraciones de los sistemas se introducen errores en las soluciones de las ecuaciones.

Sé ha comprobado ampliamente que la estimación correcta de las propiedades de filtración de los fluidos de perforación, especialmente las de filtración dinámica, es particularmente importante durante la perforación de pozos y operaciones de completación, ya que puede ayudar al ingeniero a diagnosticar y prevenir una serie de problemas como daños a la formación y pega diferencial.

A través de la historia de operaciones de perforación y completación, los modelos cuantitativos de filtración de fluidos de perforación a partir de la ley de Darcy, relacionando el volumen acumulado de filtrado y el tiempo para calcular y predecir el comportamiento de la filtración dinámica y sus condiciones de equilibrio.

Otros factores asumidos para tal fin son los referentes a la incompresibilidad del revoque de los sólidos contenidos en el fluido de perforación y de la matriz de la roca las cuales son incompresibles en los rangos de presión de operación.

2.4.1 Mecanismos de Filtración Dinámica y Estática.

Básicamente, hay dos tipos de filtración, estática y dinámica. La filtración estática ocurre cuando el fluido no tiene circulación sobre la pared del hoyo y la filtración dinámica ocurre cuando el fluido está fluyendo sobre la superficie del medio filtrante.

Durante el proceso de filtración estática, el revoque continúa engruesándose con el tiempo, disminuyendo la tasa de filtración. El control de la filtración estática comprende la prevención de la formación de revoques gruesos. Por otra parte la filtración dinámica difiere de la filtración estática en que el flujo de lodo en el hoyo tiende a desgastar el revoque a medida que éste se deposita. Luego con el tiempo, el revoque alcanza un equilibrio en su espesor y la tasa de filtración se hace constante. El control de la filtración dinámica comprende la prevención de grandes cantidades de pérdida de fluido a la formación.

Hay una cantidad de problemas que ocurren en la perforación debido a lodos que presentan pobres propiedades en el control de la filtración. La deficiencia de control en la filtración estática lleva a problemas como zonas apretadas en el hoyo que a su vez provocan un excesivo arrastre y altas presiones surgentes cuando se mueve la tubería entre el espacio reducido dejado por un revoque grueso, atascamiento de la tubería por presión diferencial a través de un revoque de alta permeabilidad, y por último, un mal desplazamiento del lodo de perforación durante la cementación primaria. Otros problemas resultantes del mal control de filtración de la filtración dinámica, comprenden dificultades en la evaluación de la formación debido a la invasión excesiva del filtrado, revoque muy gruesos y daño a la formación por altos filtrados del lodo. Durante la perforación, se quiere depositar un revoque que sea tan delgado e impermeable como sea posible. Pero hay que enfatizar que minimizar la pérdida de fluido no es equivalente a minimizar el espesor del revoque. El hecho de cambiar la cantidad y forma de sólidos en un lodo es crítico y muy a menudo puede tener mayor efecto en el espesor que en la pérdida de fluido.

2.4.2 Filtración Estática

Véase ahora algunos de los factores que afectan la filtración estática y el espesor del revoque. Los factores principales que afectan la filtración estática son:

k - la permeabilidad del revoque.

a - el área de filtración.

ΔP - presión diferencial de filtración.

h - espesor del revoque.

μ - viscosidad del filtrado.

VF - volumen de filtrado, y

t - tiempo de filtración.

Al aplicar la Ley de Darcy a la ecuación 2.6 de flujo a través de un medio poroso, se desarrolla la siguiente ecuación:

$$\frac{dV_F}{dt} = \frac{k_a \Delta p}{h \mu} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Además de las variables anteriormente mencionadas, hay cuatro factores que son importantes para hacer un balance de materiales en este sistema. Estos son:

VL - volumen total de lodo filtrado.

VS - volumen de sólidos depositados.

CR - fracción por volumen de sólidos en el revoque, y

t - tiempo de filtración.

Se supone que se filtra el volumen total de lodo, se puede escribir un primer balance de volumen, $V_L = h a + V_f$. Un segundo balance de volumen puede ser escrito, $V_S = h a C_R$. Ahora se puede definir C_L , la fracción por volumen de sólidos en el lodo como (Ecuación 2.7):

$$C_L = V_S / V_L = \frac{h a C_R}{h a + V_f} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Al combinar todas estas expresiones y resolver por el espesor del revoque, se encuentra que:

$$h = \frac{V_f}{a \left[\frac{C_R}{C_L} - 1 \right]} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Si se sustituye esta expresión para el espesor del revoque en la ecuación previa para el flujo del fluido, o sea, Darcy, y se resuelve para V_f , el volumen de filtrado, se obtiene esta expresión para el volumen de filtrado en términos de esas variables que tienen un efecto en el volumen de filtrado (Ecuación 2.9).

$$V_f = \left[\frac{2 k a^2 \left(\frac{C_R}{C_L} - 1 \right) \Delta p_T}{\mu} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Ahora se discutirá como cada uno de los factores de la ecuación anterior afectan la filtración estática. Estos son: tiempo, presión diferencial, forma y cantidad de sólidos, permeabilidad del revoque y viscosidad del filtrado.

Con respecto al tiempo, se puede observar que el volumen de filtrado aumenta en proporción directa a la raíz cuadrada del tiempo. Se pueden cometer errores al

hacer esta observación cuando se está en condiciones de alta presión y alta temperatura durante pruebas de filtración.

La filtración, según la ecuación, es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia de presión, si la presión no tiene ningún efecto en el revoque o el filtrado. Sin embargo, la permeabilidad del revoque puede ser afectada por cambios en la presión diferencial de la filtración si el revoque es compresible. Si la presión deforma las partículas en el revoque o la une más, como en los lodos poliméricos, ocurre una disminución de la permeabilidad, entonces la pérdida de fluido debe disminuir en igual cantidad.

Los sólidos se expresan en la ecuación por la proporcionalidad entre la pérdida de fluido, V_F , y la fracción de volumen de sólidos en el revoque, C_R . La pérdida de fluido puede disminuir aumentando la concentración de sólidos en el lodo.

Esto, en efecto, simplemente ocasiona el aumento de la tasa de sedimentación del revoque y por lo tanto reduce la pérdida de fluido. Esta no es buena manera de disminuir la pérdida de fluido, ya que no cumple el objetivo de depositar revoques que sean lo más delgados e impermeables posibles.

La pérdida de fluido es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la viscosidad del filtrado. Esto en realidad, no es un método muy útil para reducir la pérdida de fluido, ya que un aumento en la viscosidad del filtrado resultará en el mismo aumento proporcional en la viscosidad del lodo.

Los cambios más significativos en la viscosidad del filtrado son causados por cambios en la temperatura.

Un aumento relativo en la pérdida de fluido que ocurre por el aumento de la temperatura puede ser por cambios en los sólidos del lodo o degradación de algún aditivo.

El mejor método para controlar la filtración es formular un lodo con una cantidad mínima de sólidos. Minimizando los sólidos que forman revoque de alta permeabilidad y agregar solamente aquellos sólidos que forman revoque de baja permeabilidad para dar el control de filtración necesaria.

2.4.3 Filtración Dinámica.

La filtración dinámica ocurre cuando el fluido está en movimiento. La tasa de filtración sobre condiciones dinámicas es considerablemente mayor en comparación con la filtración estática, a las mismas condiciones de temperatura y presión. No existen correlaciones directas entre la pérdida de filtrado estático y la pérdida de filtrado dinámico.

Dos mecanismos opuestos son producidos durante la filtración dinámica, estos son:

- Deposición del revoque que actúa como reductor de pérdida de filtrado.
- Erosión del revoque, que lo hace más delgado.

El efecto de la erosión depende de la naturaleza de las partículas en el revoque, por ejemplo, revoque compuesto por partículas esféricas son susceptibles a la erosión por tasa de corte, pero partículas largas o polímeros en el revoque lo hace más resistente a altas tasas de corte.

El revoque al formarse en condiciones dinámicas depende de distintas variables como:

- La velocidad a la que se depositan los sólidos presentes en el fluido al formar el revoque. Este proceso es controlado por las características filtrantes del fluido, el gradiente de presión, la temperatura y la permeabilidad del medio filtrante.
- La fuerza erosiva ocasionada por la circulación de fluidos de perforación. Esta fuerza depende a su vez de la velocidad de circulación, las propiedades de fluido, el tipo de flujo y el coeficiente de fricción existente entre estratos del revoque.

Esto indica que las partículas sólidas presentes en la superficie de revoque están sometidas a dos fuerzas:

- Una fuerza de arrastre, ocasionada por el filtrado y que empuja las partículas sólidas contra las superficies del revoque.
- Una fuerza erosiva, que actúa como una fuerza tangencial removedora de sólidos.

La remoción de sólidos de la superficie de revoque se produce cuando la fuerza erosiva alcanza un valor proporcional a la fuerza de arrastre.

A partir de un análisis teórico, (Outmans, H. 1963) plantea la existencia de tres etapas de filtración dinámica, una primera etapa durante la cual se forma el revoque, reduciéndose la velocidad de filtrado, hasta alcanzar el estado de equilibrio. Una segunda etapa, donde a pesar de que el espesor alcanza el equilibrio, este sigue compactándose, disminuyendo el caudal de filtrado hasta

lograr el estado estacionario. En la tercera etapa, una vez alcanzado el equilibrio, tanto el espesor del revoque y el caudal del filtrado permanecen constante.

Peng y Peden en 1992, plantean una sola ecuación para el filtrado dinámico sin necesidad de dividir el proceso en etapas, basándose en las siguientes suposiciones:

- La masa de sólidos erosionados del revoque es proporcional a la duración de la circulación, el área de la filtración y al esfuerzo de corte originado por el fluido de perforación en movimiento.
- La formación del revoque es un proceso continuo de deposición y erosión, acciones que ocurren simultáneamente.
- La ley de Darcy es aplicable al revoque.
- La resistencia promedio al filtrado y la fracción promedio de sólidos secos en el revoque son constantes.

Partiendo de la expresión desarrollada por Ruth para el filtrado estático y estableciendo que la masa equivalente al revoque acumulado (W) está conformado por la masa de revoque formado (W_c) y por la porción erosionada, se establece (Ecuación 2.10):

$$W = W_c + W_e \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Donde la fracción erosionada está relacionada con el esfuerzo de corte (Ecuación 2.11):

$$W_e = K_\tau * \tau * t \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Combinando las ecuaciones N° 2.10 y N° 2.11, se obtuvo la siguiente ecuación lineal no homogénea (Ec. N° 2.12):

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu.\alpha^*_{AV}.C^*}{\Delta P}.V - \frac{\mu.\alpha^*_{AV}.K_{\tau}.\tau}{\Delta P}.t + \frac{R_M.\mu}{\Delta P} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Cuya resolución se expresa (Ecuación. 2.13):

$$t = C_1 - C_2.(1 - e^{-C_3.V}) \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Siendo (Ec. N° 2.14, 2.15 y 2.16):

$$C_1 = \frac{C^*}{K_{\tau}.\tau} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

$$C_2 = \frac{C^*.\Delta P}{\mu.\alpha^*_{AV}.K_{\tau}^2.\tau^2} - \frac{R_M}{\alpha^*_{AV}.K_{\tau}.\tau} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$C_3 = \frac{\mu.\alpha^*_{AV}.K_{\tau}.\tau}{\Delta P} \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Con lo que se puede determinar la influencia del tiempo, presión, viscosidad del fluido, tipo y forma de la partícula que forma el revoque, permeabilidad del revoque y la tasa de corte que produce erosión sobre el revoque.

2.5 Composición de los Fluidos de Perforación.

En términos generales, los fluidos de perforación (base agua y base aceite) se componen de dos fases que son líquida y sólida. Los fluidos de perforación compuestos de aire y gas son fluidos especiales llamados *neumáticos* de perforación.

2.5.1 Fase Líquida:

La fase líquida de los fluidos de perforación está constituida por agua o aceite y esta esquematizada en la figura 2.2.

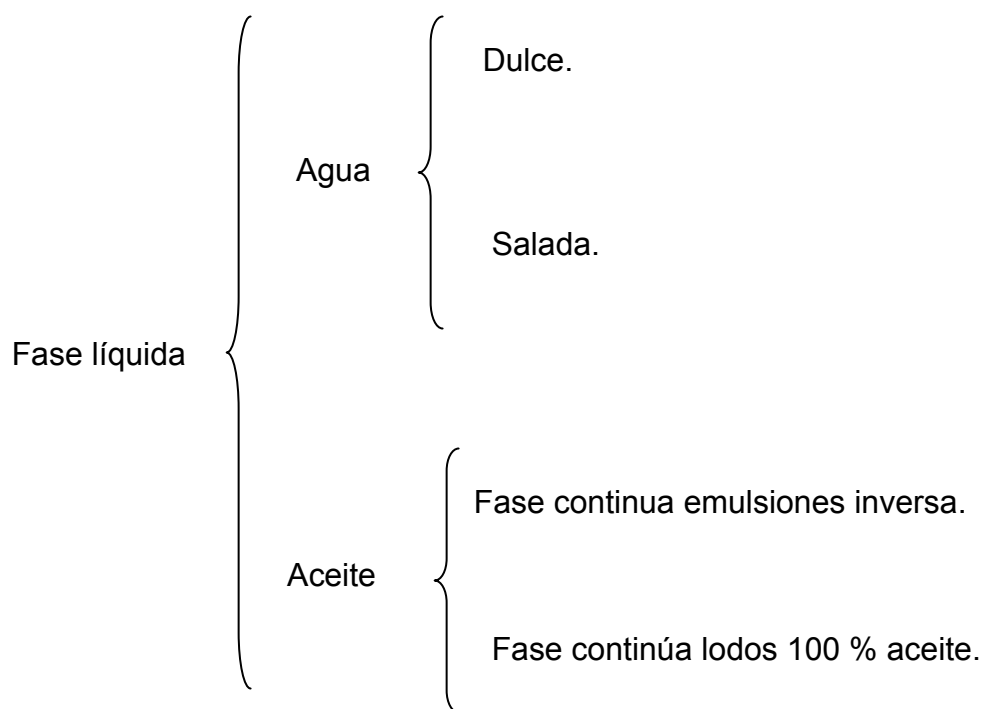


Figura 2.2 Clasificación de la fase líquida de los fluidos de perforación.

- Agua dulce:

El agua dulce es ideal para perforar en zonas donde existan bajas

presiones de formación y no hay presencia de arcillas hidratables. El precio del agua dulce es sumamente económico, es muy abundante, requiere un mínimo de tratamiento químico y provee el mejor líquido para realizar los métodos de evaluación de formaciones.

- Agua de mar:

Generalmente, se usan lodos parcialmente saturados de sal cuando se perfora costa afuera debido a la abundancia de agua salada.

- Aceite:

El aceite se usa como fase continua en lodos para entre otras cosas mejorar la estabilidad del hoyo y mantener las arcillas hidratables inhibidas, minimizar el atascamiento de la tubería, perforar zonas productivas que puedan ser afectadas por el agua debido al efecto de filtración estática o dinámica (según sea el caso) que normalmente ocurre en los fluidos de perforación.

2.5.2 Fase Sólida:

- Sólidos inertes deseables:

Sólidos no reactivos de alta gravedad específica, como el sulfato de bario ($BaSO_4$) o el carbonato de calcio, entre otros que sirven para darle la densidad requerida al lodo de perforación. La tabla 2.1 presenta algunos de los sólidos usados normalmente como material densificante.

- Sólidos inertes indeseables:

Sólidos perforados como arena, caliza, dolomita, limo. Estos tipos de sólidos generalmente son extremadamente abrasivos. Si son mantenidos en el lodo pueden causar severos daños a los pistones y cilindros de las bombas del sistema de circulación del equipo de perforación.

- Sólidos reactivos:

Son sólidos arcillosos que poseen cargas eléctricas, se pueden agregar al fluido de perforación o incorporarse a este durante la perforación de la formación. Entre los principales se tienen los sólidos arcillosos comerciales y los sólidos arcillosos de formación como las lutitas.

La fase sólida de los fluidos de perforación se puede esquematizar de la siguiente forma (figuras 2.3).

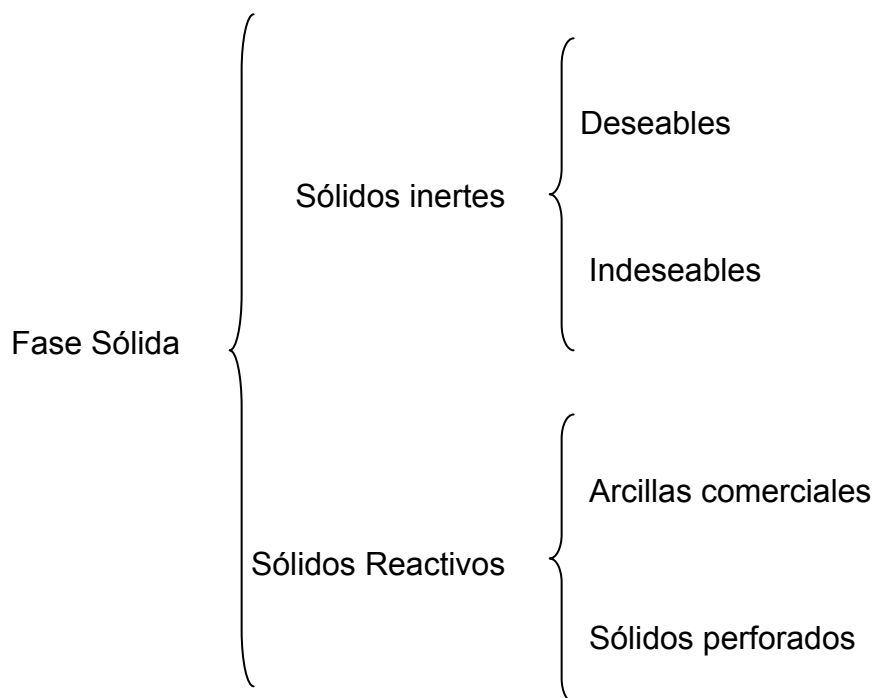


Figura 2.3 Clasificación de la fase sólida de los fluidos de perforación.

Tabla 2.1 Densificantes comúnmente usados en los fluidos de perforación.

Densificante	Gravedad específica
Hematita (Fe_2O_3)	5.1
Barita (BaSO_4)	4.2
Calcita (CaCO_3)	2.7

2.6 Lodos Poliméricos.

Los lodos poliméricos son coloides orgánicos de cadena larga y alto peso molecular que se usan, que se usan para proporcionar propiedades reológicas y control de filtración. Son hidrocoloides, es decir, no forman una solución verdadera, en vez de solubilizarse en agua, se van a hidratar e hinchar.

Sus funciones principales son:

- Viscosificante, dependiendo de la demanda de agua, el tamaño de la partícula polimérica, el tipo de ramificación del polímero (al ser mas ramificado posee mayor peso molecular por lo que decanta y no produce viscosidad) y la habilidad de encontrar agua libre en el sistema.
- Floculantes, esta puede ser total o selectiva. En el total todos los sólidos son removidos. En la selectiva, el polímero imparte viscosidad a la bentonita de alto rendimiento y floculan los sólidos de perforación.
- Reductores de pérdidas de filtrados, ya que sella mecánicamente las formaciones permeables, al envolver y adherir las partículas sólidas.
- Desfloculantes / Adelgazantes, para separar en forma de coágulos los sólidos de perforación.
- Entre los principales factores que afectan las propiedades y estabilidad de los polímeros se encuentran:
- La concentración y distribución de grupos funcionales ionizables, siendo más estables los polímeros de mayor número de grupos ionizables.

- La falta de agua inhibe su capacidad de hidratarse y por ende su estabilidad.
- La concentración del polímero.
- El pH de la solución, siendo el rango óptimo para la solubilización de los polímeros aniónicos entre 8.5 y 9.5, fuera de este rango los polímeros se degradarían.
- Los polímeros se ven degradados por la temperatura, al alterarse irreversiblemente la estructura de estos a temperaturas por encima de los en algunos casos de 250 °F (120 °C).
- La combinación de oxígeno y altas temperaturas degradan en forma rápida las cadenas de los polímeros, siendo necesario el uso de bactericidas para su preservación.

Un sistema polimérico con bajo contenido de sólidos generalmente se utiliza en zonas productoras de hidrocarburos, para tratar de minimizar daños a las formaciones productoras, en zonas que se esperan concentraciones de sal mayores de 1000ppm; cuando se quiere obtener altas tasas de penetración y buen control de la filtración.

2.7 Sistemas Comerciales.

2.7.1 Sistemas Poly-Plus®:

Los sistemas Poly-Plus están diseñados para proporcionar la estabilidad (inhibición) de las lutitas y el control de la viscosidad en los lodos base agua. Estos sistemas usan Poly-Plus RD® (un polímero PHPA de alto peso molecular), el cual

tiene múltiples aplicaciones y ventajas. Poly-Plus RD® se usa en variedad de sistemas especiales para la encapsulación.

Poly Plus® se usa en las siguientes aplicaciones:

1. Durante las operaciones de perforación realizadas en agua clara, Poly-Plus RD® actúa como floculante total en los sistemas sin bentonita, eliminando los sólidos perforados en la superficie.
2. En los sistemas no dispersos de bajo contenido de sólidos, donde el Poly-Plus RD® es usado principalmente para extender la Bentonita.
3. Los sistemas Poly-Plus® de bajo contenido de sólidos son usados principalmente para la estabilización de lutitas. Esto se logra por encapsulación, mediante la viscosificación de la fase acuosa, y mediante la absorción del agua libre por el polímero. La encapsulación es el proceso por el cual el Poly-Plus RD® envuelve las laminillas de arcillas, lo que impide que el agua entre capas de arcillas.
4. Para la estabilización de lutitas. Poly-Plus ®RD puede ser añadido a cualquier sistema de bajo pH, agua dulce o tratada con KCL para reducir el derrumbamiento y levantamiento de las lutitas. Poly-Plus RD® también reduce el torque y arrastre, e impide el embolamiento de la mecha y del conjunto de fondo.

La mayoría de los sistemas de fluidos de perforación existentes pueden ser convertidos a sistemas Poly-Plus®, pero es mucho más conveniente mezclar un sistema Poly-Plus limpio desde el principio. Para mezclar un sistema Poly-Plus® no densificado, se puede usar la siguiente formulación como guía:

Tabla 2.2 Formulación del sistema Poly-Plus® no densificado.

Componente	Concentración (lb/bbl)
Viscosificante	2.5 – 5
Regulador del pH	0.25
Regulador de Reología	1 – 2.5
Controlador de Filtrado	0.5 – 2

Tabla 2.3 Formulación del sistema Poly-Plus densificado.

Componente	Concentración (lb/bbl)
Viscosificante Primario	2.5 – 5
Regulador de pH	0.25
Regulador Reológico	1 – 2.5
Controlador de Filtrado	0.5 – 2
Viscosificante Secundario	0.5 – 1.5
Agente Densificante	300
Estabilizador térmico	2 – 5

Tabla 2.4 Propiedades Típicas del sistema Poly-Plus®

Propiedades	
Densidad (lb/gal)	9 – 13
Viscosidad Plástica (cps)	6 – 10
Viscosidad de Embudo (seg/qt)	32-45
Punto Cedente (lb/100pies ²)	10 – 20
Gel inicial (lb/100pies ²)	3 – 6
Gel 10 min (lb/100pies ²)	5 – 10
pH	8.5 – 10
Filtrado (cc/30 min)	4 – 8

2.7.2 Sistema LLT.

Es un sistema polimérico con optimas propiedades reológicas y de filtrado, además presenta un comportamiento normal ante la presencia de contaminación por sólidos inerte y no inerte. Este sistema fue optimizado en el laboratorio de fluido de perforación, dicha optimización logro mejorar el tipo de polímero y la concentración que produce las mejores propiedades al menor costo.

Tabla 2.5 Formulación del sistema LLT:

Componente	Concentración (lb/bbl)
Agua	300 – 305
Viscosificante	1.5 – 2
Regulador de Reología	0.3 –0.5
Controlador de Filtrado	2 – 6
Inhibidor de Arcillas	12 – 16
Agente Densificante	100 – 120
Regulador de pH	0.5 – 1

Este sistema tiene una gran aplicación en:

1. La perforación de pozos horizontales, ya que posee reología inversa lo que es un indicativo de alta capacidad de limpieza
2. Pozos con problemas de estabilidad de hoyo por la presencia de lutitas, gracias a la presencia de polímero encapsulantes.

Tabla 2.6 Propiedades típicas del sistemas LLT.

Propiedades	
Densidad (lb/gal)	9.5 – 10
Viscosidad Plástica (cps)	13 – 15
Viscosidad aparente (cps)	30 – 35
Punto Cedente (lb/ 100 pies ²)	40 – 45
Gel Iniciales (lb / 100 pies ²)	10 – 13
Gel 10 min (lb/ 100 pies ²)	12 – 18
% Agua	85 – 87
% Sólidos	13 – 15
Filtrado API (cc/30min)	4 - 6

2.7.3 Sistema Flo-Pro®.

Son fluidos de perforación de yacimiento no dañinos, con un contenido mínimo de sólidos, desarrollados reológicamente, diseñado para perforación sin problema de las formaciones productivas que sufren daños causados por los fluidos de perforación convencionales. Este sistema es especialmente aplicado en pozos horizontales perforados en yacimientos no consolidados. Los pozos verticales y otro tipo también se benefician del nivel de eficiencia y el grado de protección proporcionado por el Flo-Pro®. Para minimizar los daños a la formación causados por las arcillas, los sistemas Flo-Pro® usan polímeros para la reología y el control de filtración.

Los sistemas Flo-Pro® a base de polímeros tienen una viscosidad a muy baja velocidad de corte (LSRV) Ultra alta, en comparación con otros sistemas o fluidos de perforación típicos a base de arcillas. La alta LSRV proporciona una excelente suspensión de los recortes en pozos de alto ángulo y horizontales, y reduce la erosión del pozo. La alta LSRV es crítica no solo par optimizar la limpieza del pozo y la eficiencia de la perforación, sino también minimizar la invasión del

filtrado y la invasión de los fluidos enteros dentro de la formación. Los sistemas Flo-Pro® sólo contienen una cantidad mínima de sólidos. Los sistemas Flo-Pro son formulados a partir de salmueras de densidad apropiada, usando solamente una cantidad suficiente de carbonato de calcio soluble en ácido de granulometría determinada (mármol molido) o sal de granulometría determinada para lograr un buen puenteo de las gargantas de poro. Estas salmueras no sólo proporcionan una buena densidad, sino también inhiben el hinchamiento de las arcillas de la formación. Todos los productos usados en los sistemas Flo-Pro® son solubles en agua. Los sistemas Flo-Pro® son compatibles con todas las técnicas de completación, incluyendo las de tuberías revestimiento cortas ranuradas, las mallas preempacadas y los filtros de grava de pozo abierto.

Tabla 2.7 Propiedades típicas del sistema Flo-Pro®:

Propiedades	
Densidad (lb/gal)	8 – 14
Viscosidad Plástica (cps)	10 – 17
Viscosidad Aparente (cps)	20 – 50
Punto Cedente (lb/ 100 pies ²)	30 – 45
Gel Inicial (lb / 100 pies ²)	8 – 16
Gel 10 min (lb/ 100 pies ²)	10 – 20
% Agua	95 – 80
% Sólidos	5 – 20
Filtrado API (cc/30min)	3 – 7

2.7.4 Sistema. Sales de Formiato®.

Los fluidos de perforación de formiatos fueron desarrollados originalmente como fluidos de perforación para pozos profundos de diámetros reducidos siendo uno de los más importantes propósitos la minimización de las pérdidas de presión por fricción.

Los lodos de perforación tradicionales utilizan sólidos tanto para el control de la viscosidad (Bentonitas) como para material de peso (barita, hematita, etc.). La carga de gran cantidad de sólidos en el fluido de perforación desarrolla altas pérdidas de presión de fricción durante la circulación en pozos profundos de diámetros reducidos, resultando en una transmisión pobre de poder hidráulico hacia los motores del lodo del subsuelo y la ocurrencia de densidad de circulación equivalentes (DCE) altas, además altas presiones de activación/expansión de los anulares estrechos.

Los polímeros se comportan diferentes cuando se exponen a altas temperaturas, la temperatura de transición de un polímero se define como la temperatura a la cual el polímero sufre un cambio de conformación de orden – desorden. Este cambio de conformación va acompañado de una pérdida masiva de viscosidad y de un incremento de la tasa de degradación hidrolítica en dos órdenes de magnitud.

Se ha mostrado que la temperatura de transición de los polímeros puede ser modificada por la influencia de varias salmueras. Algunos iones como los llamados rompedores de la estructura de agua, bajarán la temperatura de transición, mientras que otros son estimuladores de la estructura del agua y aumentarán la temperatura de transición. Se ha mostrado que el ion NaCOOH , KCOOH formiato aumenta la temperatura de transición de los polímeros. Esto hace a las salmueras de formiato un fluido ideal de perforación y completación. Los fluidos de perforación con base de salmuera de formiato tienen aplicaciones en las siguientes áreas:

- Perforación de pozos de diámetros reducidos profundos. Disminución de las pérdidas por fricción y estabilidad a altas temperaturas.

- Perforación de lutitas El formiato mejora la estabilidad de los iones presentes en el lodo y la estimulación del contraflujo osmótico del agua de los poros.
- Perforación de yacimientos con mínimo daño. los formiatos no requieren material de peso proporcionando la oportunidad para diseñar fluidos de perforación de mínimo contenido de sólidos que puedan causar taponamiento de las gargantas de poro.

Tabla 2.8 Formulación de sistema Formiato®

Componentes	Concentración (lb/bbl)
Agua	200 – 300
Formiato	30 – 80
Viscosificante	1 – 5
Controlador de Filtrado	2 – 10
Agente de Puenteo	20 – 50
Bactericida	0,1 – 0,2

Tabla 2.9 Propiedades típicas del sistema Formiato®

Propiedades	
Densidad (lb/gal)	8 – 19
Viscosidad Plástica (cps)	5 – 15
Punto Cedente (lb/100pies ²)	20 - 45
Gel inicial (lb/100pies ²)	8 - 15
Gel 10 min. (lb/100pies ²)	10 - 22
pH	9 – 10
Filtrado (cc/30 min.)	3 - 7

2.8 Daños a Formación.

Podemos definir el daño a la formación como cualquier proceso que pueda causar una reducción de la productividad de una formación, o un proceso que pueda causar reducción en la inyectabilidad de un pozo de inyección de agua o gas.

Por que prevenir el daño a la formación

- Para reducir el costo de la completación y producción de los pozos.
- Máxima recuperación de las reservas por reducción de la caída de presión y minimizar los problemas de conificación de gas y agua.
- Preservar barreras de la permeabilidad vertical y de esta manera incrementar la eficiencia del barrido o empuje de proyectos de recuperación primarios, secundarios y terciarios.

Mecanismos de daño a la formación

Se ha clasificado el daño a la formación en cuatro grande grupos:

- Daño a la formación inducidos mecánicamente.
- Daño a la formación inducidos químicamente.
- Daño a la formación inducidos biológicamente.
- Daño a la formación inducidos térmicamente.

El daño causado a la formación por los lodos de perforación es en su mayoría de tipo mecánico y químico.

El principal daño mecánico inducido por el lodo a la formación es el arrastre de sólidos.

Sólidos extraños pueden ser introducidos a la formación en diferentes circunstancias. Los ejemplos más comunes son el uso de fluidos de perforación, completación, reparación o estimulación cargados o contaminados con sólidos. El mayor daño inducido mecánicamente ocurre durante las operaciones de perforación, dos tipos de sólidos son introducidos durante el proceso de perforación. Los adicionados deliberadamente al sistema de fluido, tales como: agentes densificantes, agente controladores de filtrado o agentes puenteantes adicionados para disminuir la pérdida de filtrado de un determinado sistema de lodo.

Otro tipo de daño inducido por los lodos de perforación es de tipo químico.

El daño a la formación químicamente puede ser dividido en tres grandes secciones:

- Incompatibilidad roca - fluido.
- a) Hinchamiento de las arcillas. Cuando las arcillas se ponen en contacto con el agua la mayoría absorbe agua entre las capas y se hinchan. La fuerte atracción de algunas arcillas por grandes volúmenes de agua es causada por los cationes intercambiables colocados entre las láminas de las arcillas. El hinchamiento de las arcillas puede resultar en tres grandes problemas. Estos problemas son reducciones drásticas de la permeabilidad y sellado

total en la formación, migración de finos y causar taponamiento y atrapamiento de grandes cantidades de fluidos (agua).

- b) Floculación de las partículas de arcillas. Las partículas dispersas y los corpúsculos formados pueden taponar las gargantas de poro y causar reducciones de la permeabilidad original de la roca.
 - c) Disolución de la formación. La que se genera por la solubilidad parcial de algunos componentes de la formación y por de la absorción química de algunos componentes de la roca. Una gran cantidad de aditivos utilizados en los fluidos de perforación y completación, tales como: polímeros, inhibidores de corrosión, surfactantes, etc, podrán tener características polares y físicamente tienden a ser absorbidos por la superficie externa de la formación.
- Incompatibilidad fluido – fluido.
- a) Disposición de cera. Considerando como un problema inherente a la formación durante la fase de producción y no como mecanismo de daño por la invasión de los fluidos.
 - b) Precipitación de sólidos. Es producida por la reducción de la presión y temperatura, también es función de la composición del petróleo y del contacto con potenciales agentes precipitantes, tales como: HCl y CO₂ y solventes ricos en hidrocarburos.
 - c) Emulsiones. La generación de emulsión de alta viscosidad puede originar reducciones drásticas de la productividad de un pozo.

- d) Alteración de la humectabilidad. Algunos fluidos utilizados para la perforación, completación y estimulación contienen surfactantes u otros componentes polares los cuales pueden ser físicamente adsorbidos sobre la superficie de las rocas. Estos componentes tienen tendencias hidrofílicas y oleofílicas.
- e) Cambios de la humectabilidad causados por la invasión de fluidos.

2.9 Polisacáridos.

Los polisacáridos son carbohidratos que están constituidos por monosacáridos unidos a través de enlaces glucosídicos (Ver figura 2.4); son coloides no forman verdaderas soluciones como los monosacáridos, no tienen sabor ni color, y su peso molecular puede llegar hasta varios millones. Actualmente se emplea mucho el termino hidrocoloide para referirse a los polisacáridos, ya que debido a su gran capacidad para retener agua, forman partículas coloidales altamente hidratadas (E. Pérez .1990; Smith, 1997).

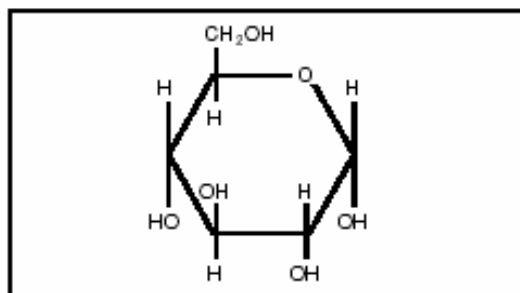


Figura 2.4 Composición química de la Glucosa.

Los polisacáridos son considerados producto de la policondensación de monosacáridos unidos glucosídicamente con la eliminación de agua, formando cadenas lineales o ramificadas que pueden estar constituidas por un solo tipo de monosacárido (homopolisacáridos), como el almidón y la celulosa, o bien estar formado por diferentes monosacáridos (heteropolisacárido) como es el caso de la mayoría de las gomas(Ver figura2.4).

Los distintos monómeros están unidos en las cadenas de una forma regular, como una secuencia repetitiva, representando polímeros con alto grado de orden estructural El contenido de carbohidratos de la gran mayoría de los tejidos

animales y vegetales se encuentran en forma de polisacáridos y muy poco en forma de azúcares libres.

Existen dos grupos principales de polisacáridos que tienen diferentes funciones biológicas: Los polisacáridos que constituyen el tejido estructural (celulosa, carragenina, murámicos, agar, galactanos, etc.), y los que constituyen reservas energéticas (almidón, amilosa, amilopectina, etc.).

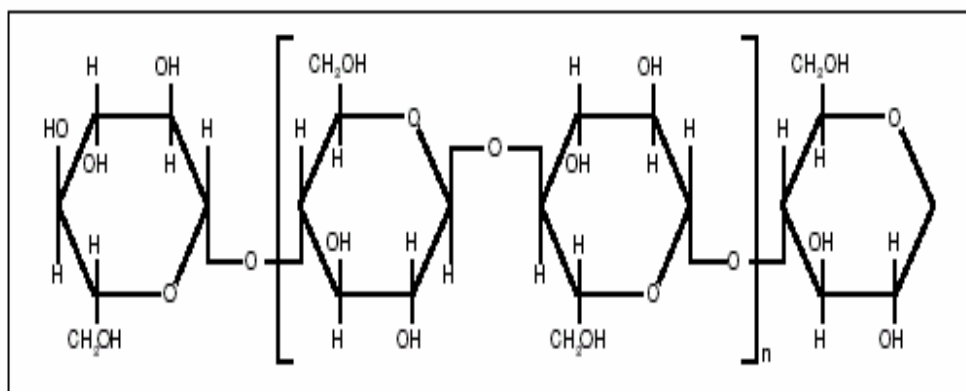


Figura 2.5 Composición química de la Celulosa.

2.9.1. Almidones.

Los almidones son polisacáridos vegetales. Fisiológicamente son sustancias de reserva energética, análogas al glicógeno animal. Los almidones se encuentran principalmente en los granos de cereales y en los tubérculos.

También se encuentran en cantidades elevadas en frutas, donde la transformación reversible entre el almidón y la glucosa que interviene en la maduración y después de la cosecha tienen influencia notable sobre la calidad.

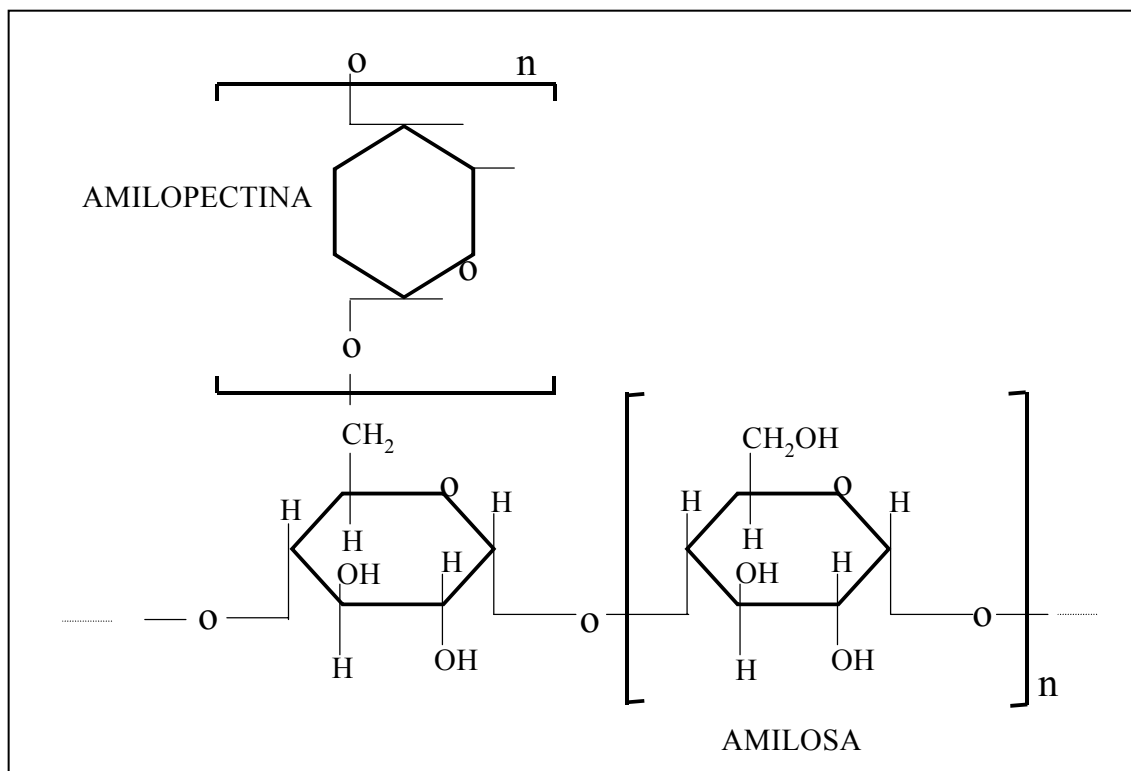


Figura 2.6 Composición química de los almidones

Químicamente el almidón es una mezcla de dos polisacáridos muy similares: La amilosa y la amilopectina. El almidón probablemente es el polisacárido más abundante desde el punto de vista comercial. Actualmente, los usos más vastos del almidón son en la industria alimenticia.

2.9.1.1 Gránulos de Almidón.

Son de carácter intracelular compacto, frecuentemente con aspectos y estructuras características según la planta de que provienen. Estos gránulos son esferocristales visibles al microscopio electrónico, el gránulo de almidón es una única y compleja estructura más elipsoidal que esférica (Calve, 1997; Smith y Denejer, 1997). El tamaño, forma y estructura del gránulo de almidón varía de una

a otra fuente botánica (Thomas y Atwell, 1999). En cuanto a tamaño y forma se sabe que el tamaño de los gránulos varía desde 1 μm a más de 100 μm , la forma puede ser regulares (esférica, ovoides, o angulares) e irregulares. Algunas fuentes amiláceas presentan diferentes distribuciones y diferentes formas de gránulos. (Ver figura 2.7)

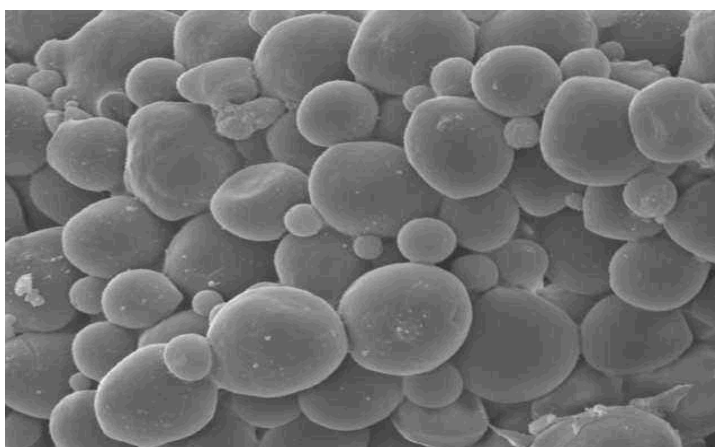


Figura 2.7. Vista microscópica de los gránulo de FR-021M.

2.9.1.1.1 Composición de los Gránulos del Almidón.

El gránulo de almidón es insoluble en agua, pero inmediatamente biodegradable para el sistema de almacenamiento de los amiloplastos en las células de las plantas (Smith y Denejer, 1997). Este balance de estabilidad mecánico con degradabilidad, proviene de la estructura química de la amilosa y la amilopectina, que son los componentes principales de los gránulos de almidón. En conjunto con el arreglo de zonas cristalinas y amorfas dentro del gránulo. Los componentes amiláceos; Básicamente amilosa y amilopectina y trazas de otros constituyentes; tales como materiales intermediarios, minerales, grasas proteínas y carbohidratos

menores forman esta discreta y agregada estructura cristalina llamada gránulo de almidón (Thomas y Atwell, 1999; Ball 1996, Kent, 1994).

2.9.1.2 Uso del Almidón.

Evidentemente que la llave para el mercadeo de los almidones para las diferentes aplicaciones son sus propiedades funcionales; ningún otro ingrediente o componente provee textura a los alimentos como los almidones. La extensión de las propiedades funcionales específicas de los almidones requerida por la industria es ilimitada.

Usos en alimentos: Viscosidad específica en frío y caliente, debido a cierto grado de viscosidad rápida transferencia de calor, resistencia al esfuerzo mecánico y acidez, claridad y opacidad, retención de aceite, propiedades de flujo capacidad emulsificante, características de suspensión, adhesividad, cristalinidad, lubricidad, formación de películas, encapsulante, desecante, entre otras.

Usos en otras industrias diferentes de la industria de alimentos; Adhesivos, agente enlazante, relleno, fijador de relleno, vehículos, películas biodegradable, desecante en baterías etc.

Como el uso actual está muy discutido, podemos señalar la producción de almidones como alimentos transgénicos a través de biotecnología. En este sentido hay numerosas publicaciones donde se trabaja en la introducción y/o supresión de genes y producción de clones de vegetales amiláceos. Una breve historia desde 1991 es reportada por Wasserman y col., 1995. En Europa y Estados Unidos se trabaja intensamente en la ingeniería genética a fin de definir la composición exacta de los polímeros, patrones de ramificación, largo, tamaño y forma de las cadenas y como se organizan, para la introducción de nuevos productos basados en almidones (Wasserman y col., 1995).

2.9.1.3 Propiedades Funcionales de los Almidones.

El carácter funcional de los almidones es función de la composición, estructura y propiedades de la fracciones de amilosa y amilopectina presente en los gránulos, los almidones se usan ampliamente en la industria de alimentación como agente gelificantes estabilizadores, emulsificantes, humectantes y espesantes; sin embargo no siempre se pueden emplear en su forma natural, sino que en muchos casos se requiere una modificación física o química para poder obtener de ellos las propiedades funcionales deseadas.

Existen diferentes tipo de almidones modificados, entre los cuales los principales son los hidrolizados, pregelatinizados, oxidados, acetilados y entrecruzados. Los almidones pregelatinizados se obtienen por un cocimiento seguido de un secado en tambor rotatorio y su principal característica es la facilidad con que se disuelven en agua fría.

2.9.1.3.1 Factores que Afectan las Propiedades Funcionales.

- **AGUA:** Es el principal factor que afecta las propiedades funcionales de los almidones. La intensidad y el grado de hinchamiento del almidón depende fundamentalmente de la cantidad total de agua que el sistema contenga, de tal forma que a medida que aumenta la cantidad de agua en el sistema, el hinchamiento es mayor y por consiguiente hay más almidón que se desprende del gránulo para solubilizarse.
- **AZUCARES:** El desarrollo de algunas propiedades por el almidón también es función de la presencia de azúcares, principalmente glucosa y sacarosa. Los azúcares presentan una competencia por el agua de hidratación del almidón, lo que trae consigo cambios en las propiedades reológicas del polisacárido. El efecto más importante que tienen los azúcares se refleja en

una reducción de la velocidad de gelatinización y en la viscosidad final que se obtiene de la pasta de almidón.

- **SALES:** La facilidad y velocidad de gelatinización también se ve afectada por la presencia de varias sales ya que algunas aumentan y otra la reducen. El almidón no tiene grupos ionizables como otros polímeros (por ejemplo pectinas o las proteínas), y por lo tanto debe ser relativamente insensible a las sales y a los cambios de pH; además, la concentración de sales en la mayoría de los alimentos es muy baja y el efecto de esto sobre la gelatinización del almidón debe ser mínimo. Sin embargo, en sistemas modelos, se ha visto que algunos almidones son definitivamente afectados por la concentración de aniones como fosfatos, acetatos, cloruros citratos, sulfatos y tartratos, y cationes como sodio y calcio.
- **pH:** la velocidad y la intensidad del hinchamiento de los gránulos del almidón es afectada por el pH del sistema, ya que generalmente los valores de pH menores a 5 o mayores de 7 tiende a reducir la temperatura de gelatinización y acelerar el proceso de cocción. A pH muy alcalinos se reduce considerablemente la temperatura y el tiempo requerido para el hinchamiento de los gránulos, mientras que en condiciones muy ácidas puede favorecerse una hidrólisis del enlace glucosídico del almidón, con la consecuente pérdida de la viscosidad de su suspensiones.

2.9.2 Amilosa.

Producto de la condensación de hexosas (D-glucopiranosas) forma cadenas largas lineales que pueden tener 200-2500 unidades, con pesos moleculares que pueden llegar hasta un millo de lb/mol. Los monosacáridos están unidos a través de enlaces glucosídicos α -D-(1 \rightarrow 4), (Ver figura 2.8) es decir, la amilosa es un α -D-(1 \rightarrow 4) glucano, siendo la α -maltosa la unidad repetitiva de esta estructura

química. Una propiedad de la amilosa es su facilidad para adquirir una conformación tridimensional helicoidal. La amilosa es un polímero lineal de residuos de D-glucosa unidos por enlaces α 1,4. Su masa molecular varía entre 20000 a 300000 lb/mol. En los gránulos de almidón, este polímero está presente bajo forma cristalizada, debido principalmente al gran, número de enlaces de hidrógeno existente entre los grupos hidroxilos

Los enlaces de hidrógeno de la amilosa también son responsable de la absorción de agua y de la formación de geles (originan redes tridimensionales), en el curso de la retrogradación, después de la gelatinización. Debido a su naturaleza cristalina, la amilosa sólo se hincha a una temperatura elevada.

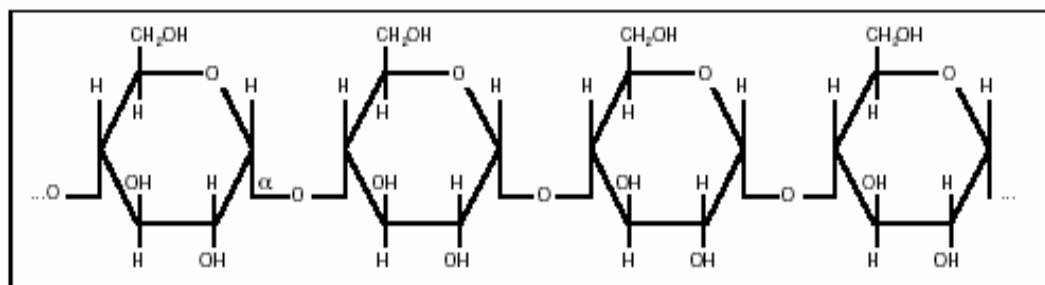


Figura 2.8 Estructura de la Amilosa.

2.9.3 Amilopectina.

La amilopectina es un polímero ramificado de D-glucosa (Ver figura. 2.9). Los enlaces son del tipo α 1,4, salvo a nivel de ramificación, donde son del tipo α 1,6. La amilopectina presenta un grado de cristalinidad muy inferior al de la amilosa. La masa molecular de la amilosa varía aproximadamente entre 200.000 y un millón de lb/mol. Durante la cocción, la amilopectina absorbe mucha agua y es, en gran parte, responsable de la hinchazón de los gránulos de almidón. Así los gránulos ricos en amilopectina son más fáciles de disolver en agua, a 95°C, que los que contienen mucha amilosa.

Debido al crecimiento estérico, las moléculas de amilopectina no tienen tendencia a la recrystalización y por lo tanto poseen un elevado poder de retención de agua, contrariamente a las de amilosa. Las soluciones de amilopectina no retrogradan.

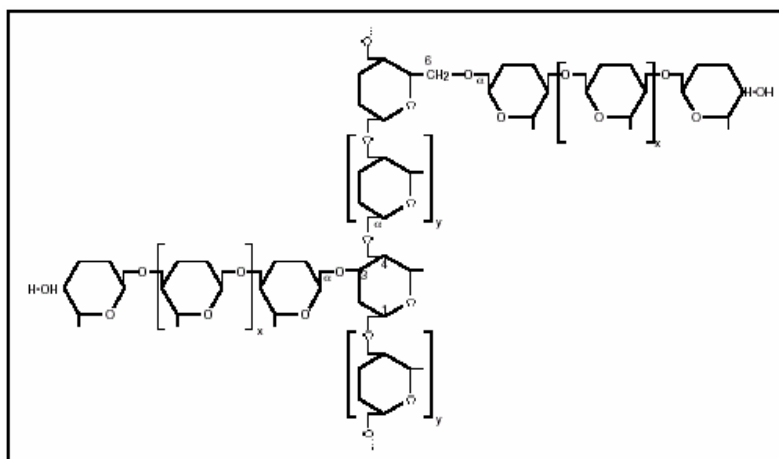


Figura 2.9 Estructura química de la Amilopectina.

2.9.4 Gelatinización.

De una manera lenta, a través de sus zonas amorfas, los gránulos de almidón absorben diferentes cantidades de agua, según la especie y la proporción de las fracciones constitutivas. El gránulo de almidón, en presencia de agua fría, se hincha y aumenta ligeramente de tamaño, lo cual solo se puede observar en el microscopio. Cuando las suspensiones de almidones se calientan a una temperatura de más de 50-55°C, los puentes de hidrógeno intermoleculares de las zonas amorfas se rompen y continúa la absorción de una mayor cantidad de agua, este fenómeno es conocido como gelatinización. En esta condición se puede apreciar visualmente un aumento considerable de tamaño del gránulo, que va paralelo a la pérdida de birrefringencia, debido a una ruptura de arreglo radial de los polímeros. A medida que se incrementa la temperatura aumenta el agua absorbida y parte de las moléculas de amilosa de bajo peso molecular se

disuelven y difunden fuera del gránulo, mientras que las cadenas de mayor tamaño permanecen en él, impidiendo que exista más solubilidad de las de bajo peso molecular. Cada almidón tiene un diferente grado de cristalización y por lo tanto se hincha y gelatiniza en distintas condiciones de temperatura.

La temperatura de gelatinización se expresa como un intervalo, ya que no todos los gránulos se hinchan y gelatinizan al mismo tiempo.

2.9.4.1 Temperatura de Gelatinización.

La temperatura a la que se pierde la birrefringencia y se produce el máximo hinchamiento de los gránulos del almidón se llama temperatura de gelatinización, y a esta temperatura existe un alto grado de absorción de agua que hace que las dispersiones de este polímero alcance altas viscosidades.

A medida que continúa este proceso, los gránulos se rompen y aparecen moléculas libre hidratadas de amilosa y amilopectina, y las viscosidades de la pasta se reducen hasta alcanzar cierto valor en lo que se estabiliza (Ver figura 2.10). La temperatura de gelatinización se expresa como un intervalo, ya que no todos los gránulos se hinchan y gelatinizan al mismo tiempo y temperatura debido a que algunos son mas resistente y por lo tanto pueden requerir hasta 10°C más que otro. (Tabla 2.10).

Tabla 2.10 Temperatura de Gelatinización de algunos Polisacáridos.

Tipo	Amilopectina %	Amilasa %	Temperatura de Gelatinización °C
Maíz	73	27	62 - 72
Tapioca	82	18	51 - 65
Papa	78	22	58 - 67

2.9.5 Retrogradación.

El fenómeno de retrogradación se define como la insolubilización y precipitación espontánea de las moléculas de amilosa, debido a que las cadenas lineales se orientan paralelamente e interaccionan con ellas por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos.

La retrogradación se puede efectuar por dos rutas diferentes que dependen de la concentración y de la manera de enfriamiento de la dispersión del almidón. Cada almidón tiene una diferente tendencia a la retrogradación, lo cual está directamente relacionado con su contenido de fracción de amilosa.

La retrogradación de la amilopectina es más difícil debido a que sus ramificaciones impiden la formación de puentes de hidrógeno entre moléculas paralelas; sin embargo, su insolubilización se produce cuando las soluciones de amilopectina se congelan y descongelan continuamente.

2.9.6 Pasteo.

Es el fenómeno siguiente al proceso de gelatinización en la disolución del almidón. Este involucra hinchamiento del gránulo, exudación de los componentes moleculares y eventual disrupción de los gránulos.

2.9.7 Birrefringencia.

Es la propiedad que se refiere a la formación de zonas cristalinas por la unión de moléculas lineales a través de puentes de hidrógeno, por lo que la presencia de moléculas ramificadas impide este arreglo cristalino.

Para temperatura entre 40-55 °C se rompen puentes de hidrógeno produciendo la adsorción de agua (Gelatinización) aumentando el tamaño de los gránulos y la pérdida de birrefringencia.

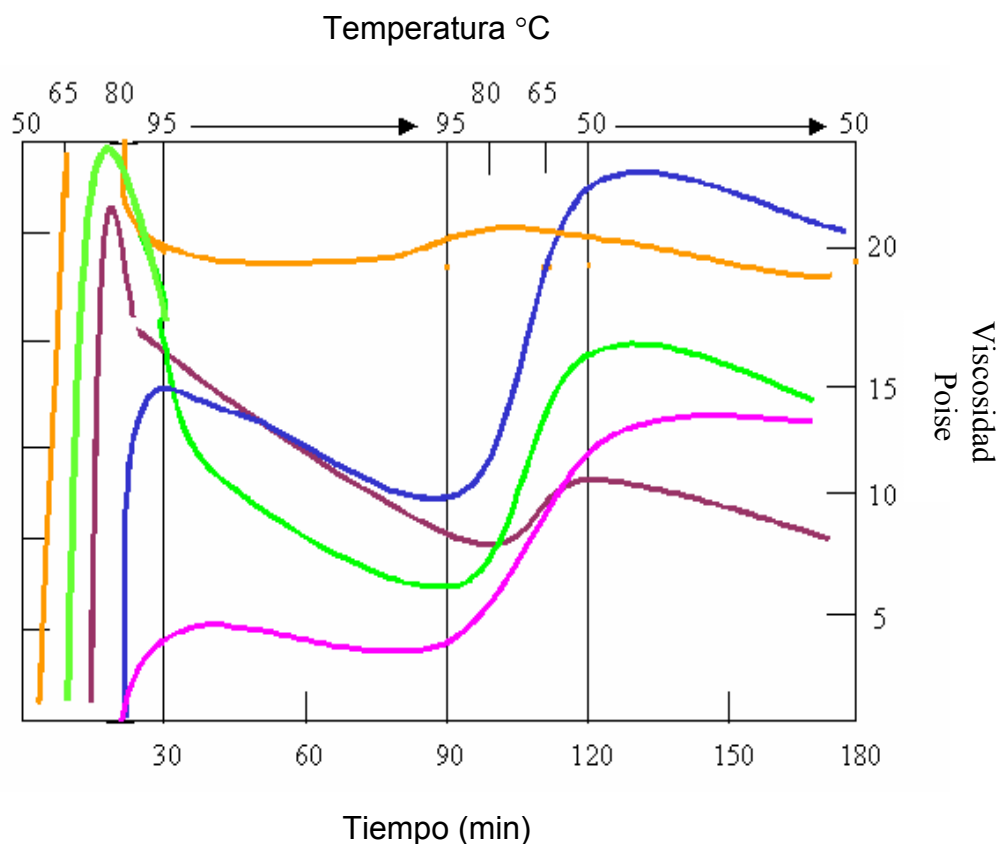


Figura 2.10 Curva de gelatinización-retrogradación del almidón.

2.9.8 Modificación del Almidón.

La aplicación industrial del almidón se ve limitada cuando este es usado en su forma nativa. Entonces el uso de esta fuente biológicamente renovable, podría ser potencialmente incrementado, si sirve como materia prima para producir almidones modificados.

Los almidones nativos de cada planta tienen sus propias y únicas propiedades y en lo posible estas características inherentes son explotadas por la industria de los alimentos para necesidades específicas. Los almidones nativos, sin embargo, carecen de versatilidad para funcionar adecuadamente en el rango de productos alimenticios, corrientemente encontrados en el mercado. La diversidad de la industria moderna de alimentos requiere que los almidones sean capaces de tolerar un amplio rango de técnicas de procesamientos; así como también, el manejo durante la distribución, almacenamiento y las condiciones finales de preparación del alimento (Slattery, 2000). Estas demandas son satisfechas cuando los almidones nativos son modificados por métodos químicos o físicos.

Debido a que los almidones nativos presentan ciertas limitaciones de uso, los almidones modificados se han tornado de relevante importancia en la industria; no solo de alimento, sino de otras fuentes tales como; papel textil, fármacos, petrolera, etc. (Thames, 1992.)

Los almidones se pueden modificar por las siguientes razones (Light, 1990, Thomas, 1999):

- Ellos proveen atributos funcionales a los productos donde son usados que no le son conferidos por los almidones nativos.
- Los almidones son abundantes y fácilmente disponibles.
- Por ultimo son más económicos que las gomas.

Aunque los almidones nativos han sido pilar fundamental para los científicos de alimentos por muchos años, los almidones modificados tienen ilimitadas aplicaciones. A medida que son desarrollados nuevos alimentos, se requieren nuevas modificaciones y nuevas técnicas para aplicar estas modificaciones.

Los almidones pueden ser modificados por diversas vías, bien sea física, química y biológica.

2.9.8.1 Principios Físicos de Modificación del Almidón.

Generalmente involucra la acción simultánea de la temperatura, presión, fricción y el contenido de humedad. Los procesos físicos de modificación pueden actuar sobre la estructura física del almidón con conservación o completa desorganización del gránulo y/o modificación en el ámbito molecular con degradaciones de las macromoléculas o monómeros (Colonna y col. 1984.)

Los autores señalan que los procesos de calentamientos con límite de agua no alteran la forma granular, pero ocurren cambios en la estructura cristalina, en especial los almidones con patrones cristalográficos tipo B, pudiéndose transformar estos en mezclas de patrones tipo A y B. Estos almidones calentados en límite de agua amplía el rango de temperatura de gelatinización y disminuye el poder de hinchamiento por reorientación de cadenas de los polímeros dentro del gránulo. En forma general los cambios que suceden en estos sistemas son: modificación estructural de las organizaciones del gránulo a 2 niveles:

- Deshidratación con cambio de los patrones cristalinos (A y B).
- Conversión de la amilosa a una estructura helicoidal reduciendo la solubilidad y el hinchamiento.

Importantes propiedades funcionales de los almidones se han obtenido a través de la modificación física, lo que ha inducido a nuevas aplicaciones industriales de este polímero. Para la producción de muchos almidones modificados, llamados pregeles o almidones instantáneos, el manufacturador utiliza técnicas de procesamiento que gelatinizan el almidón y luego los recuperan como un producto

deshidratado. Los métodos de pregelantización incluye: deshidratación con doble tambor, extrusión, irradiación (gamma y microondas). Los almidones modificados físicamente presentan ventajas con respecto a los modificados químicamente, sin embargo su mayor desventaja es su baja especificidad, en contraste con los polímeros sintéticos, los cuales son mejor adaptados para un uso.

2.9.8.1.1 Método de Deshidratación con Doble Tambor.

El método más común para producir pregeles, es la deshidratación con tambor, aunque este proceso es conceptualmente directo, la operación del equipo requiere experiencia para producir productos consistentes de alta calidad (Potter, 1987; Heldman y Sing, 1981). En general hay dos tipos de deshidratadores de tambor el de un tambor y el de doble tambor. En el tipo simple o de un solo tambor la pasta o lechada de almidón a una concentración de 30-40 % de sólido, es forzada a pasar a través del aplicador y la superficie del tambor. En el proceso de doble tambor, la pasta de almidón es alimentada sobre la superficie caliente de la brecha entre los dos tambores. El almidón cocido y seco es separado de las superficies calientes por cuchillas de acero. El almidón obtenido es molido a tamaño deseado (Pérez, E. 1994). Generalmente el uso del deshidratadores produce menos estrés mecánico en el almidón, por lo que se puede producir los llamados “película fina” (Colonia, y col, 1984). Una dispersión de almidón preparada de un almidón procesado por doble tambor tiende a producir geles con una mayor viscosidad que los preparados con un deshidratador de un solo tambor.

En este método de modificación también se pueden incorporar otros ingredientes durante el proceso de deshidratación. El perfil de viscosidades depende del tipo de almidón que se modifique. Por lo general un almidón modificado por doble tambor desarrolla viscosidad inicial; los gránulos actúan como esponjas, para inmediatamente imbibir el agua y producir viscosidad (Rincón, 1983; Pérez, 1984; Thomas, 1999).

Dependiendo del tipo de pregel, la viscosidad puede ser reducida con más tiempo de cocción. Aun cuando estos almidones están físicamente modificados ellos tiende a retener algunas propiedades fisicoquímicas de la materia base. Posiblemente los cambios más significantes que puede sufrir un almidón tratado por deshidratación con tambor, son en la dispersibilidad y la textura del mismo.

Estas propiedades son función del tamaño de las partículas. Ya que estos almidones son molidos después de la modificación, la dispersibilidad y la textura pueden manipularse, controlando el proceso de molienda y por ende el tamaño de las partículas resultantes. La deshidratación por doble tambor produce almidones fácilmente dispersables en agua fría y con mayor viscosidad que los extruidos. Aun cuando la estructura granular es destruida en ambos proceso, en la deshidratación con doble tambor en contraste con la extrusión no se degradan las fracciones de amilosa y amilopectina.

2.9.8.1.2 Método de Extrusión.

La modificación de almidón por el proceso de extrusión se fundamenta en que bajo ciertas condiciones de temperatura, humedad y presión; el gránulo de almidón es transformado por el proceso de gelatinización, alterándose su organización cristalina en forma parcial o total, acompañado de cambios de las propiedades fisicoquímicas y funcionales (Lancaster, 1999; Tovar y col, 1999). Este proceso se realiza en los extrusores, que pueden ser de varios tipos, siendo los mas comúnmente usado los de uno y dos tornillo (Rincón, 1993). Los de dos tornillos varían dependiendo de la posición de un tornillo con respecto al otro y de acuerdo a la dirección de la rotación de los mismos; en este sentido estos pueden ser intergranados o no y corrotatorios (Fitchall y Vander Vooert, 1989).

En los extrusores de tornillo, los mismos se encuentran dentro de un canon estacionario, donde se coloca el material que se va extruir, saliendo el producto

extruido a través de un orificio especialmente diseñado llamado boquilla. Varios parámetros como la configuración del tornillo, la velocidad del mismo y la temperatura de varias zonas del canon influyen en las propiedades de los productos finales y debe ser cuidadosamente controladas (Hauck y Huber, 1989).

Los extrusores pueden ser considerados bombas de fricción. Los materiales que van a ser extruidos, por ejemplo almidón (Henrist, 1999; Lancaster, 1999); se preacondicionan o premezclan en una cámara que alimenta directamente al extrusor. Bajo condiciones de temperatura controlada y presión el almidón mezclado es calentado con vapor y/o agua y manteniéndose así para permitir que la humedad penetre y suavice las partículas individuales. Una vez extruido el almidón seco es molido, la dispersabilidad y la textura pueden también manipularse, controlando el proceso de molienda y por ende el tamaño de las partículas resultantes (Fichttall y Vander Voort, 1989). Los autores específicamente señalan que la extrusión destruye la estructura cristalina organizada parcial o completamente, dependiendo de la relación de amilosa /amilopectina y de las variables de extrusión tales como humedad, tasa de cizalla y temperatura. La aplicación de cocción por extrusión, sobre el almidón provoca una desorganización de las estructuras cristalinas y desenredo de las macromoléculas de amilosa y amilopectina, las cuales son ligeramente despolimerizadas ocasionando cambios irreversibles. El proceso de extrusión induce a fusión del almidón y disrupción de los gránulos sin separación de la amilosa y amilopectina, en contraste con la deshidratación donde se produce una lixiviación parcial de amilosa durante el proceso.

2.9.8.2 Principios Químicos de Modificación del Almidón.

El tipo más común de modificación de almidón en los Estados Unidos es el tratamiento del almidón nativo con pequeñas cantidades de reactivos químicos aprobados por el código de regulación federal de los Estados Unidos (CFR). La modificación química cambia las propiedades funcionales del almidón. La química envuelta en este proceso es bien directa y envuelve primariamente reacciones asociadas con los grupos hidroxilos del polímero de almidón. Una cantidad significativa de los almidones comerciales es modificada por enlaces cruzados o reacciones de sustitución. La modificación química generalmente se realiza en un medio acuoso. Una suspensión de almidón, usualmente de 30-40 % de sólidos, se trata con reactivos químicos bajo condiciones apropiadas de agitación, temperatura, y pH. Cuando las reacciones se completan el almidón se lleva al pH deseado con un agente neutralizante, se purifica por subsecuentes lavados con agua y se seca hasta obtener un almidón deshidratado.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

3.1. Diseño de las formulaciones de los sistemas de fluidos de perforación.

El propósito fundamental de este trabajo fue determinar en base a resultados de laboratorio, los efectos que tiene sobre los fluidos de perforación base agua el uso del FR-021M en sus tres estados como agente de control del filtrado y su contribución sobre las propiedades reológicas de los sistemas evaluados.

Las condiciones óptimas del fluido de perforación a determinar en este estudio se obtuvieron a partir de una matriz experimental de sistemas de lodos. Los sistemas escogidos para este estudio fueron: Poly-Plus®, Fro-Pro®, Formiatos® los cuales son patentes de una empresa de fluidos de perforación y el LLT que es un sistema polimérico optimizado en el Laboratorio de Fluido de Perforación de la UVC. En esta matriz se variaron el tipo y la concentración del agente FR-021M al ser usado como agente para el control del filtrado.

A cada matriz se le realizaron pruebas de densidad, pH, reológicas y filtrado para las formulaciones comerciales con el uso de un agente de control de filtrado convencional, los valores obtenidos sirvieron como patrones, para luego sustituir el agente de control de filtrado comercial por el FR-021M en sus tres estados a diversas concentraciones y así determinar los efectos que causa su uso en las propiedades del sistema.

Las pruebas reológicas se realizaron con un viscosímetro modelo FANN 35 a una temperatura de 120°F y presión atmosférica, para medir la densidad se empleó una balanza de lodo, el pH con un peachimetro digital y las pruebas de filtrado en un filtro prensa API. Todas estas pruebas se efectuaron cumpliendo las normas API 13B-1. (American Petroleum Institute).

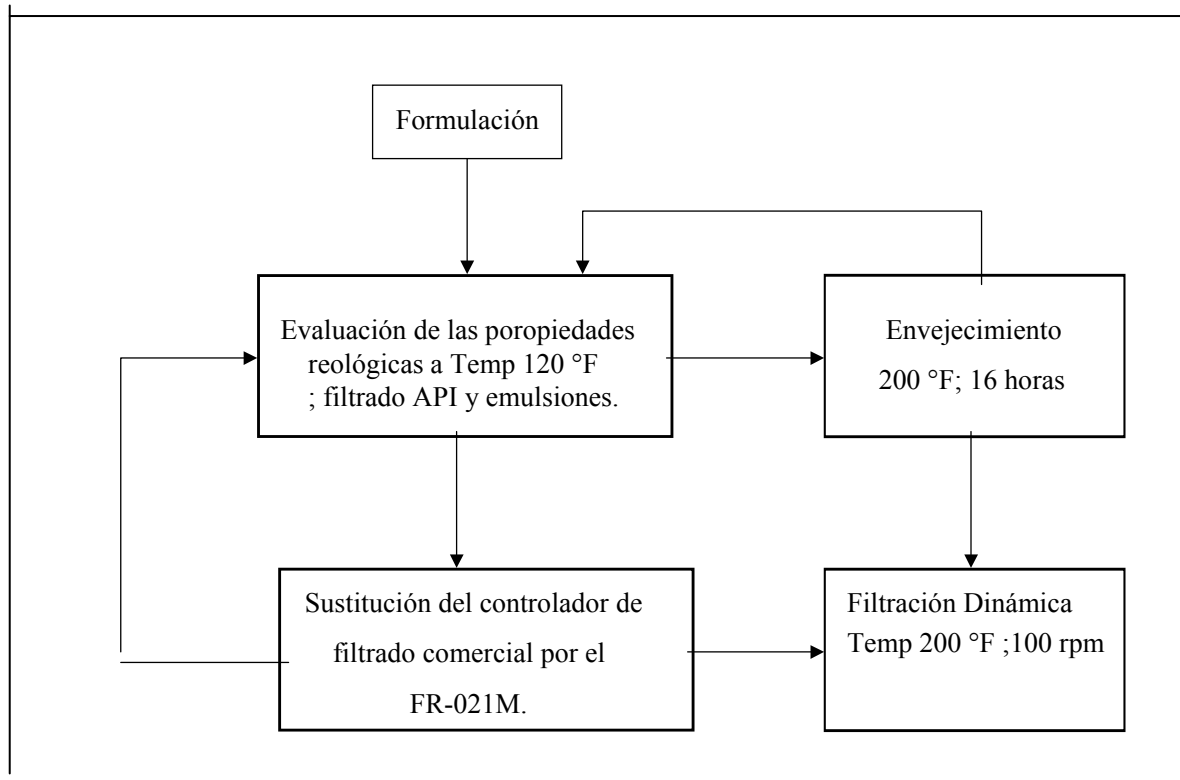


Figura 3.1 Diagrama de actividades de laboratorio.

El peso de cada fluido diseñado se encuentra en un rango de 9 a 10 lpg siendo el material densificante el carbonato de calcio (CaCO_3) de tamaño fino y 99% de pureza. De ser necesario se le agregará un antiespumante y el pH será controlado con hidróxido de sodio (NaOH) para mantenerlo en un rango de 9-10.

El agente para el control del filtrado FR-021M se empleó en tres estados diferentes, dichos estados son: el nativo, modificado físico y modificado químico.

Tabla 3.1 Nomenclatura para cada estado del FR-021M.

Estado del FR-021M	Nomenclatura
Nativo	Nativo
Modificación Química	M Q
Modificación Física	M F

3.2 Prueba de Envejecimiento.

Para simular las condiciones de circulación se les realizó a los fluidos de perforación un proceso de envejecimiento. Las condiciones del envejecimiento fueron: temperatura de 200°F, una presión de 150 lpc y una rotación de 100 rpm, para así simular las condiciones de pozos que debe soportar el lodo al ser utilizado en la perforación de un pozo.

Luego de ser envejecido se les realizaron nuevamente las pruebas reológicas y de filtrado (estático y dinámico) bajo las mismas condiciones iniciales.

Los resultados serán comparados con los valores iniciales para verificar los efectos causados por las condiciones de pozo simuladas, sobre las propiedades del lodo, permitiendo establecer que propiedades mantendrán valores dentro de un rango permitido.

3.3 Pruebas Especiales.

Para estudiar el comportamiento en el pozo por el fluido a ser diseñado, se analizaron pruebas de filtrado dinámico, como también pruebas de emulsiones.

Para la filtración dinámica se utilizó el equipo OFITE 170-50. Este equipo de filtración dinámica opera bajo un sistema automatizado que permite programar la

secuencia de pasos a seguir durante la prueba que se desea realizar. La prueba en este trabajo, se realizó utilizando el esquema que se muestra a continuación, programado previamente en la computadora del equipo.

Tabla 3.2 Secuencia de pasos seguidos durante la Filtración Dinámica.

Pasos	T (min.)	P (lpc)	ΔP (lpc)	T (°F)	γ (rpm)
1	0	0	0	200	100
2	3	600	0	200	100
3	5	600	0	200	100
4	0	600	200	200	100
5	50	600	200	200	100
6	0	0	0	200	100

En esta prueba se utilizarán papel filtro con las siguientes especificaciones: tamaño de garganta de poro de 60μ , diámetro externo de 1.027 pulg (2.608 cm) y diámetro interno de 1.023 pulg (2.598 cm).

Para la prueba de compatibilidad de los fluidos se crea una emulsión en un envase graduado con el lodo formulado y una muestra de petróleo de una gravedad API conocida en igual proporción, esta emulsión se colocada en un baño de María a una temperatura de 150 °F. Luego cada 5 minutos se mide el porcentaje en volumen de emulsión, petróleo y lodo reportándose en una tabla. La prueba tiene una duración de 30 minutos.

3.4 Proceso de Modificación.

Muchos polímeros no son solubles en agua, y por lo tanto no pueden ser aplicados a los fluidos de perforación base agua, amén que sean modificados. Los polímeros naturalmente modificados son muy comunes en los fluidos de perforación. Los polisacáridos y la celulosa son los dos polímeros naturales usados frecuentemente para producir polímeros naturalmente modificados. Para estudiar cual es el estado del producto que mejor efecto produce sobre el control del filtrado se evaluó su estado nativo y el producido luego de someterlo a procesos de modificación física (doble tambor) y química (base fuerte).

3.4.1 Modificación Física (doble tambor).

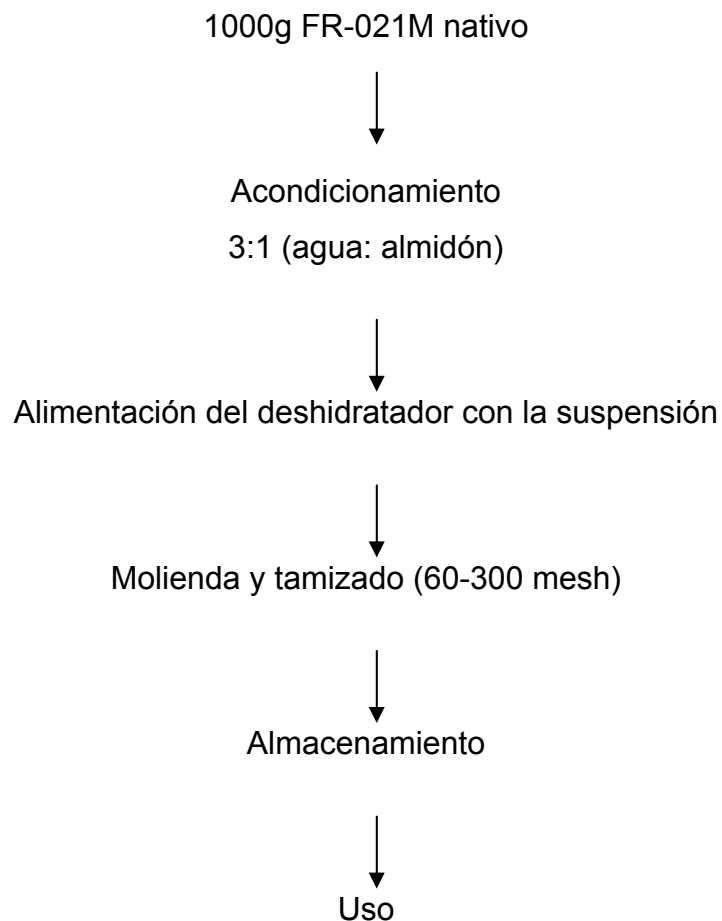


Figura 3.2 Flujograma de modificación por deshidratación con doble tambor.

La modificación física de doble tambor es obtenida al someter la mezcla de polisacárido prehidratada a condiciones de presión, temperatura y tasa de cizallamiento. El material nativo extraído de cada tubérculo, fue modificado por deshidratación usando el deshidratador de doble tambor. 1000 g de muestra fueron acondicionados en una relación agua-FR-021M de 3:1 siguiendo parámetros descritos por Colonia y col., 1984 y Doublier y col. 1986. El deshidratador fue alimentado con una suspensión del FR-021M a una velocidad de tambor de 9 rpm, y una presión de vapor de 60 lpc lo que equivale a 152,2 °C (306 °F). Las láminas obtenidas se someten a un proceso de molienda para obtener un tamaño de partícula comprendido en un rango de 60 a 300 mesh, usando un molino de martillo y tamices. El producto tamizado se depositó en envase de vidrio, para ser utilizado posteriormente.

3.4.2 Modificación Química (base fuerte).

Cuando el polisacárido es suspendido en una solución diluida con soda cáustica, los gránulos de polisacárido absorben parte del álcali disminuyendo la concentración de la solución en soda.

Estudios de laboratorio muestran que para gelatinizar polisacáridos es necesario adicionar la cantidad que es adsorbida mas una parte libre en la solución en torno a 0.75%.

La cantidad de soda que se agrega a la solución es calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$C = \frac{0.75 * (B) + 1.6 * (A)}{100} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En donde:

C: Peso (grs.) de soda.

A: Peso (grs.) de polisacárido base seca.

B: peso (grs.) de agua.

0.75: % de soda libre mínima.

Tabla 3.3 Relación de soda cáustica para gelatinizar polisacáridos en suspensión a concentraciones desde 1 hasta 5% en agua.

Polisacárido Base seca(grs.)	Agua (grs.)	Soda(grs.)	Viscosidades Iniciales (cp/25°C)	Viscosidades Finales (cp/25°C)
1	100	0.766	70	70
2	100	0.782	165	150
3	100	0.798	255	240
4	100	0.814	7480	350
5	100	0.830	560	400

La descripción y procedimientos de cómo se utilizan estos equipos es ampliado en el apéndice tres.

4. Discusión de los Resultados.

4.1 Sistema Flo-Pro.

Al evaluar los resultados obtenidos para el sistema Flo-Pro con el uso del FR-021M como agente controlador de filtrado, el FR-021M modificado físicamente (MF) por el método de doble tambor es el que tiene la mayor capacidad de controlar la pérdida de filtrado. En la figura 4.1 se puede observar el comportamiento del FR-021M en su estado nativo, modificado físico y químico.

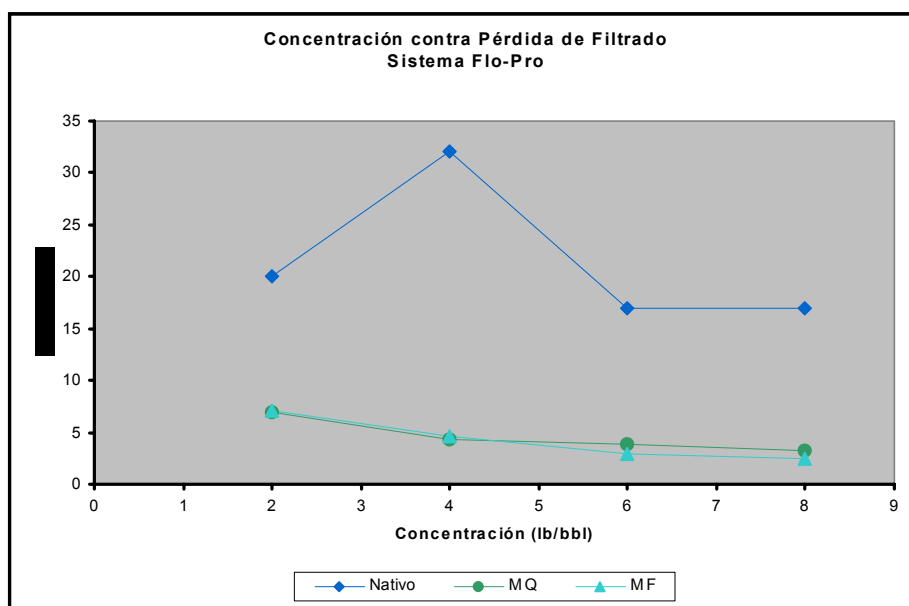


Figura 4.1 Comportamiento de la Pérdida de Filtrado en el sistema Flo-Pro.

El FR-021M modificado químicamente también proporciona un buen control de la pérdida de filtrado, pero los valores de pH alcanzan un rango 12 a 13.5 (tabla 2.7 y 9.1), siendo estos superior al recomendado para sistemas poliméricos.

Los valores de pH de este sistema deben estar comprendidos en un rango de 9 a 10, para así, evitar problemas de degradación o elongación de los polímeros a

valores de pH bajos o altos respectivamente. El proceso de modificación química fue elaborado por una ecuación empírica que debe ser optimizada para mejorar los problemas de pH (Darley, H. C. H., Gray, G. R. 1998).

El FR-021M en su estado nativo no proporciona una buena capacidad para controlar la pérdida de filtrado en este sistema de lodo (Ver figura 4.1). La pérdida de filtrado obtenida para las distintas concentraciones de FR-021M, siempre fue superior a los 16 cc, encontrándose fuera del rango de valores de filtrado de este sistema el cual es de 3 a 7 cc (Ver tabla 2.7).

En su estado natural, los polisacáridos no son hidrosoluble, simplemente flotan como partículas. Para que los polisacáridos sean eficaces en los fluidos de perforación, es necesario romper los puentes de hidrógenos que evitan la hidratación de los polisacáridos (Pérez, E. 1990).

Los gránulos del producto son calentados hasta que las células se rompan, lo cual permite la dispersión de la amilosa. Este proceso se llama gelatinización. Una vez disperso el polisacárido este se hidrata.

Para este sistema Flo-Pro, con el FR-021M modificado físicamente (DT), se escogió la concentración de 4 lpb, por ser esta la que proporciona menor pérdida de filtrado a menor costo (Ver tabla IV.2 apéndice 4).

Con la concentración de 4 lpb del FR-021M modificado físicamente la pérdida de filtrado es de 4,5 cc representando este valor, una leve disminución con la pérdida de filtrado obtenida con el regulador de filtrado comercial, la cual arrojó un valor de 5 cc (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Propiedades del sistema Flo-Pro comercial, y para una concentración de 4 lpb de FR-021M modificado.

Propiedades	Comercial	M Q	M F
Densidad lb/bbl	9.7	10	9.9
V. P cps	10	19	13
P .C lb/100ft ²	32	45	34
V .A cps	21	41	30
Gel 10" lb/100ft ²	18	18	10
Gel 10' lb/100ft ²	22	15	15
Índice Reológico	3.2	2.4	2.6
% Agua	87	86	87
%Sólidos	13	14	13
pH	9.9	12.5	9.5
Filtrado API (estático) cc	5	4.3	4.6

En las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se puede observar el comportamiento correspondientes a las propiedades reológicas en el sistema, al usar agente FR-021M en su estado nativo, modificado químicamente (M Q) y físico (D T), como agente de control de filtrado.

La viscosidad plástica es de 12 cps para la concentración de 4 lb/bbl modificada físicamente (Ver figura 4.2), representando este valor un aumento con respecto al que se obtiene con el uso del agente de filtrado comercial, que es de 10 cps (Ver Tabla 4.1).

El punto cedente es de 34 lb/100ft² para la concentración de 4 lb/bbl modificada físicamente (Ver figura 4.3), al igual que en la viscosidad plástica se produce un leve aumento con el valor que se obtiene con el agente de control de filtrado comercial el cual es de 32 lb/100ft².

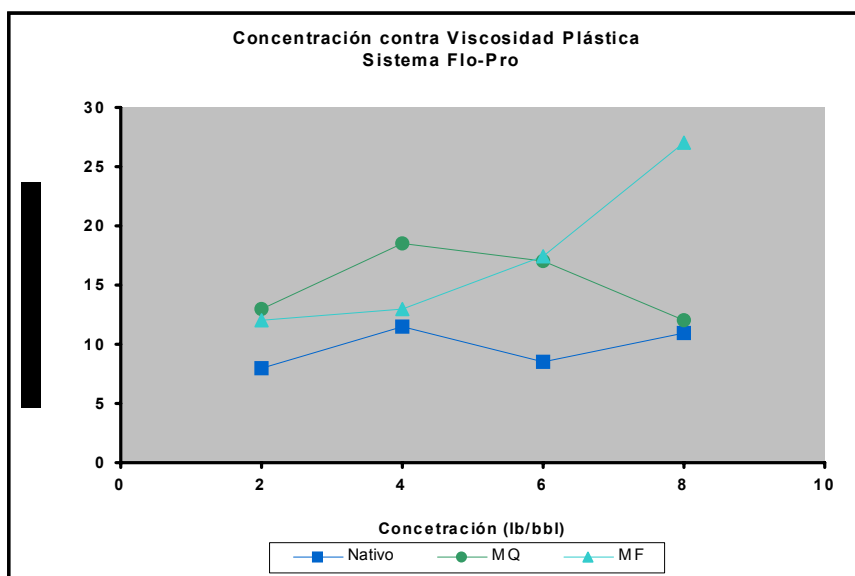


Figura 4.2 Comportamiento de la viscosidad plástica para el sistema Flo-Pro.

Estos aumentos tanto de la viscosidad plástica como del punto cedente pueden ser originados por la granulometría del FR-021M obtenida luego de que este es modificado físicamente a través del método de doble tambor. Posiblemente los cambios más significativos que sufre un polisacárido tratado por deshidratación con doble tambor, son la dispersibilidad y la textura del mismo. Estas propiedades dependen del tamaño de las partículas. Ya que estos polisacáridos son molidos después de la modificación, la dispersibilidad y la textura pueden manipularse, controlando el proceso de molienda y por ende el tamaño de las partículas resultantes y a través de este proceso lograr las propiedades requeridas.

En general un tamaño muy fino de partículas produce pregeles más difícil de dispersar y granos muy gruesos tienden a producir una textura pulposa con mejor dispersabilidad.

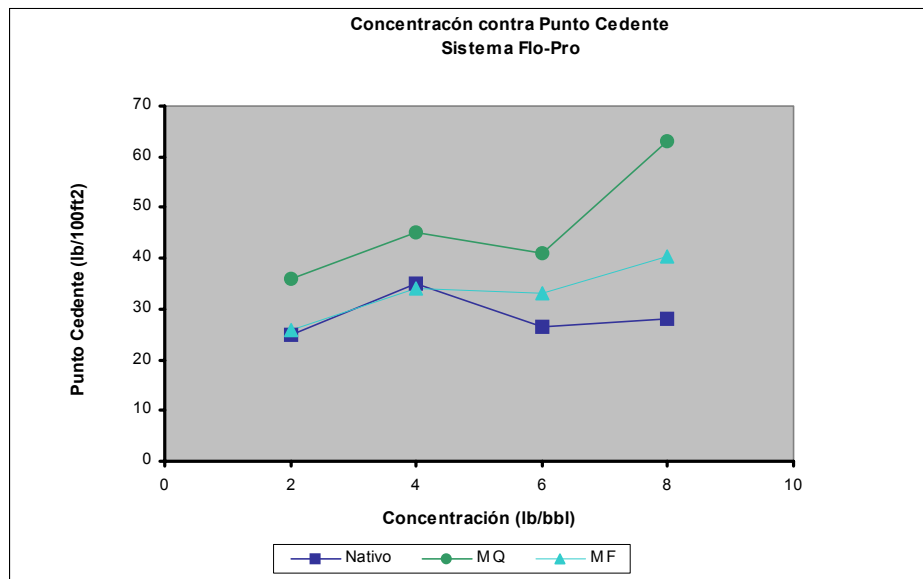


Figura 4.3 Comportamiento del punto cedente para el sistema Flo-Pro.

El comportamiento del índice reológico (Ver figura 4.4) prevalece el carácter de reología inversa ($PC > VP$) presentado por la gran mayoría de los sistema poliméricos. La reología inversa representa una propiedad importante para los sistemas poliméricos, ya que esto es un indicativo de la capacidad de limpieza que proporciona el lodo durante la perforación, mientras mayor es el valor de índice reológico, mayor es la capacidad de limpieza del lodo, implicando esto una disminución en los requerimientos de la potencia hidráulica durante la perforación.

Los valores de la fuerzas de gel 10 segundos y 10 minutos son de 10 y 15 respectivamente, encontrándose los mismos por debajo del sistema comercial, pero dentro del rango que debe presentar un sistema con estas características (Ver Tabla 2.7 y 4.1).

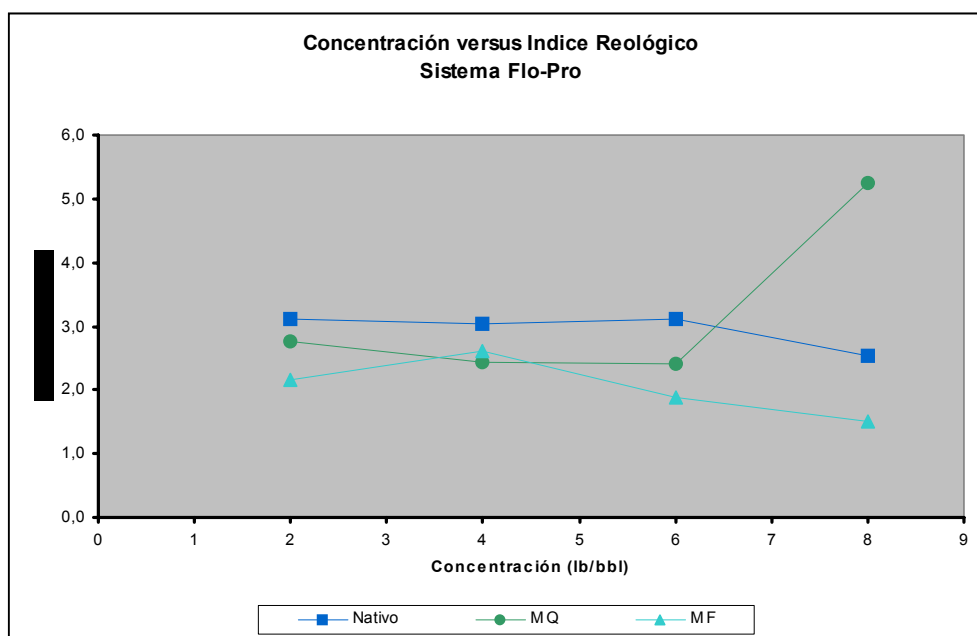


Figura 4.4 Comportamiento del índice reológico para sistema Flo-Pro.

La viscosidad aparente es de 30 cps (Ver grafico 4.5), lo que también representa un aumento con la obtenida al usar la formulación comercial que es de 21 cps (Ver Tabla 4.1). Este Aumento es generado por el uso del FR-021M ya que como se explicó anteriormente a través de los procesos de modificación lo que se busca es aumentar la capacidad de desarrollar viscosidad en frío por la mezcla de polisacárido, además de aumentar el valor de los pregeles que este pueda desarrollar y el aumento de la solubilidad en agua. Este aumento en la viscosidad aparente también contribuye en la capacidad de suspensión del material densificante ocasionando un aumento en la densidad del sistema.

Los porcentajes de agua y sedimentos son de 87 y 13 respectivamente (Ver Tabla 4.1), siendo estos valores iguales a los obtenidos con la formulación comercial, lo cual indica el carácter de bajo contenido de sólidos presentado por estos sistemas. Es este carácter una de las propiedades mas importantes que presenta

este sistema de lodo, ya que disminuyen notablemente los daños que se pueden causar a las formaciones productoras durante las operaciones de perforación.

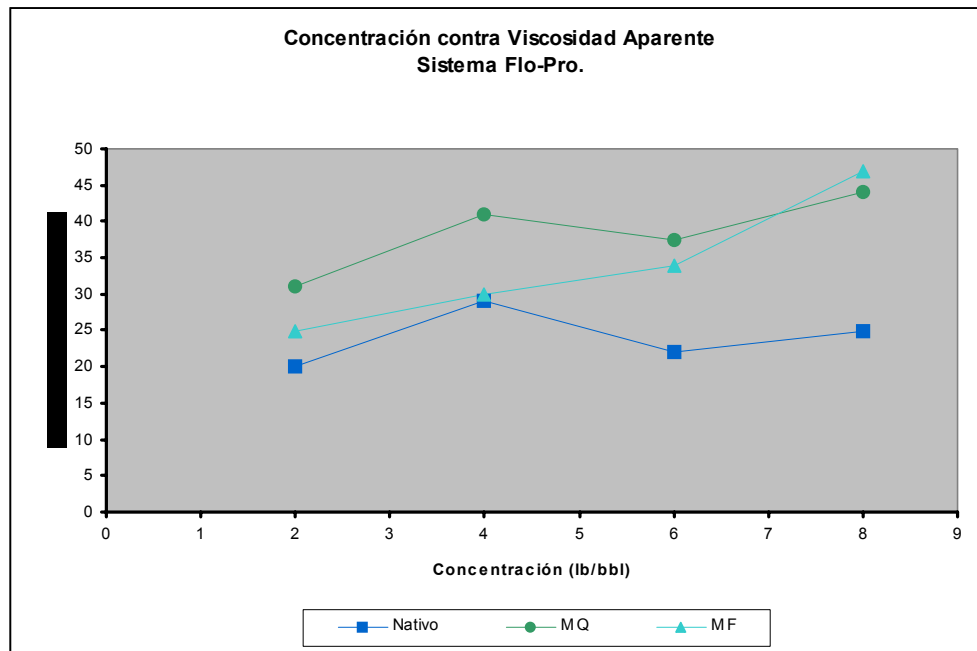


Figura 4.5 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema Flo-Pro.

El espesor presentado por los revoque varían entre 1/32 a 2/32 pulgadas (Ver anexos), corroborando la capacidad que tienen estos sistemas de lodos para formar revoques delgados a pesar de que en algunos casos la concentración de sólidos y densidad son elevadas, confirmando la alta compresibilidad de los componentes del sistema al formarse el revoque.

La permeabilidad del revoque puede ser afectada por los cambios en la presión diferencial de la filtración si el revoque es compresible. Si la presión deforma las partículas en el revoque o las une mas, como en los lodos poliméricos, ocurre una disminución de la permeabilidad, entonces la pérdida de fluido debe disminuir en igual cantidad.

4.1.1 Prueba de Envejecimiento.

Como se muestra en la tabla 4.2, las propiedades reológicas del sistema Flo-Pro para una concentración de 4 lb/bbl después de la prueba de envejecimiento disminuyen con respecto al sistema sin envejecer, aun cuando estos valores están dentro de los rangos recomendados para este tipo de fluido de perforación.

La pérdida de filtrado aumenta de 4,6 a 5,4 cc al ser sometida a condiciones que simulan las características de pozos (Ver Figura 4.6). Al ser bajo éste valor, disminuirían la posibilidad de daño a la formación, indicando la capacidad del producto a proporcionar el control del filtrado requerido a condiciones de pozo.

Tabla 4.2 Propiedades del sistema Flo-Pro antes y después de envejecido
(4 lb/bbl de FR-021M modificado físico)

Propiedades	Antes de Envejecer	Envejecido
Densidad lpg	9,9	9,7
V.P (cps)	13	11
P.C (lb/100ft ²)	34	30
Gel 10" (lb/100ft ²)	10	7
Gel 10' (lb/100ft ²)	15	12
Filtrado API 30' (cc)	4,6	5,4
Filtrado ATAP dinámico (cc)	10	11.2

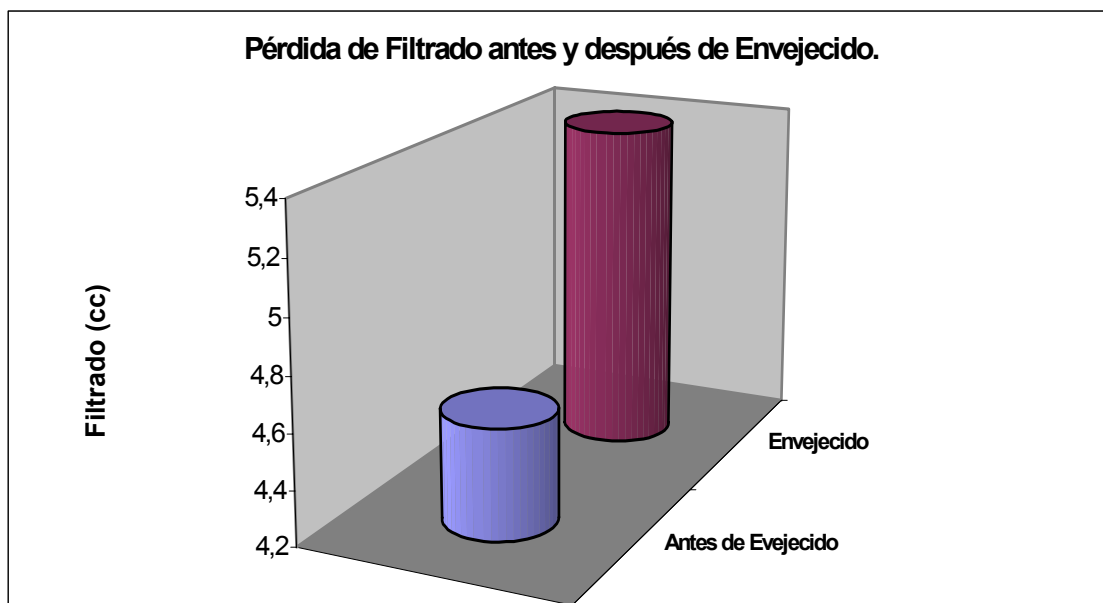


Figura 4.6 Pérdida de filtrado antes y después de envejecido el sistema Flo-Pro

La viscosidad plástica sufre una disminución leve con respecto a la obtenida con el agente comercial de 13 a 11 cps (Ver figura 4.7). Esta disminución es una consecuencia de la temperatura. Generalmente para fluidos base agua la viscosidad plástica decrece a medida que aumenta la temperatura ya que los polímero presente sufre alteraciones estructurales al ser expuesto por mucho tiempo a temperatura superiores a los 200 °F, a partir de esta temperatura se empiezan a romper las ramificaciones de los polímeros encargados de proporcionar viscosidad al sistema, implicando esto una merma en la capacidad de suspensión del lodo. El fenómeno anterior puede originar la disminución de la densidad del lodo (Ver tabla 4.2)

Después del proceso de envejecimiento, el punto cedente, las fuerzas de gel iniciales y finales caen notablemente (Ver Figura 4.8). Sin embargo, al igual que la viscosidad plástica los valores se mantienen dentro del rango aceptable (Ver tabla 4.2). Como se explicó anteriormente estas disminuciones son causadas por las

alteraciones estructurales que sufren los componentes del sistema al ser sometido a temperaturas altas.

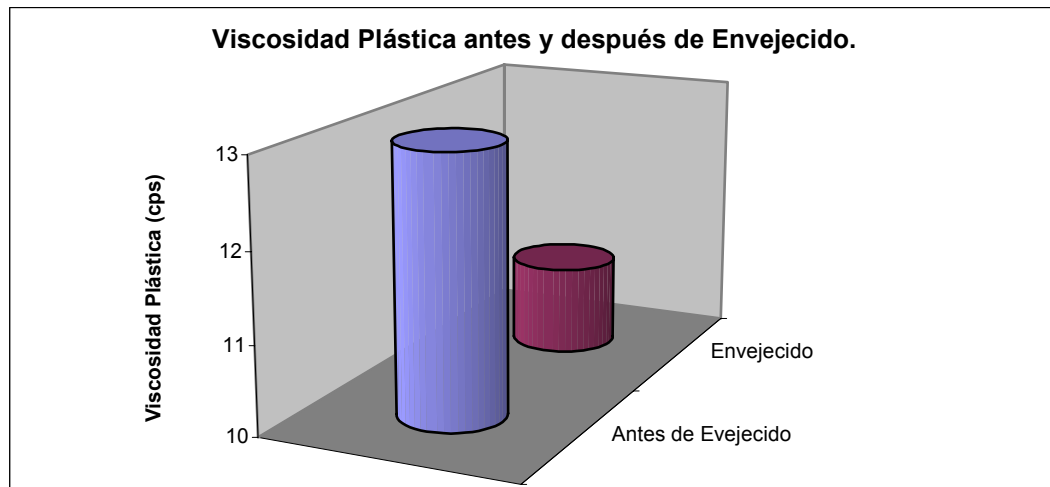


Figura 4.7 Viscosidad Plástica antes y después de envejecido el sistema Flo-Pro.

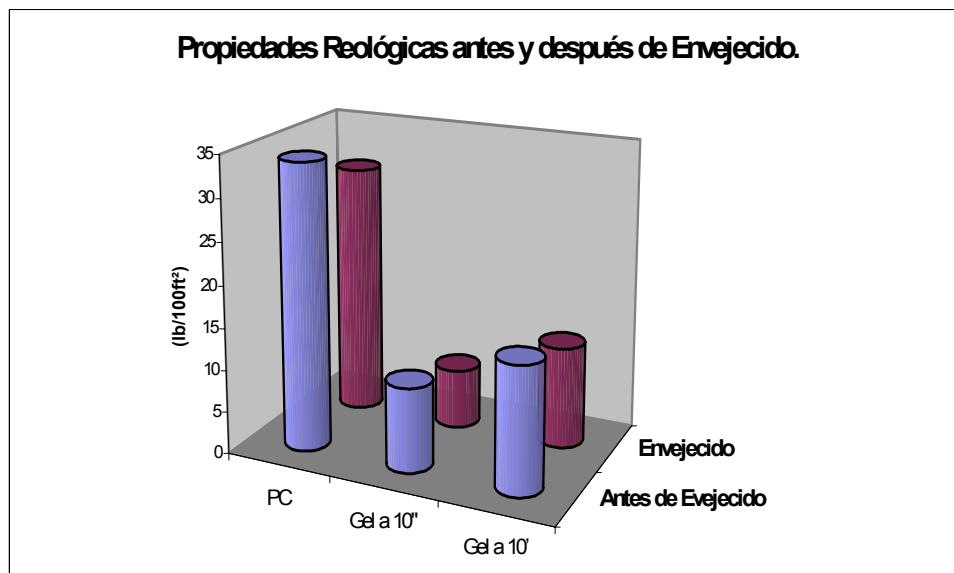


Figura 4.8 Propiedades Reológicas antes y después de envejecido el sistema Flo-Pro.

4.1.2 Prueba de filtración Dinámica.

Los resultados de la prueba de filtración dinámica, que se muestran en la figura 4.9 y 4.10, indican un bajo volumen de filtrado total al final de la prueba (30 min.), por debajo de 15 ml de volumen. Una pérdida de filtrado de 15 ml/30min (o inferior a ello) en el ensayo de filtración dinámica es usualmente un requerimiento para tener dificultades mínimas en el pozo cuando se esta perforando.

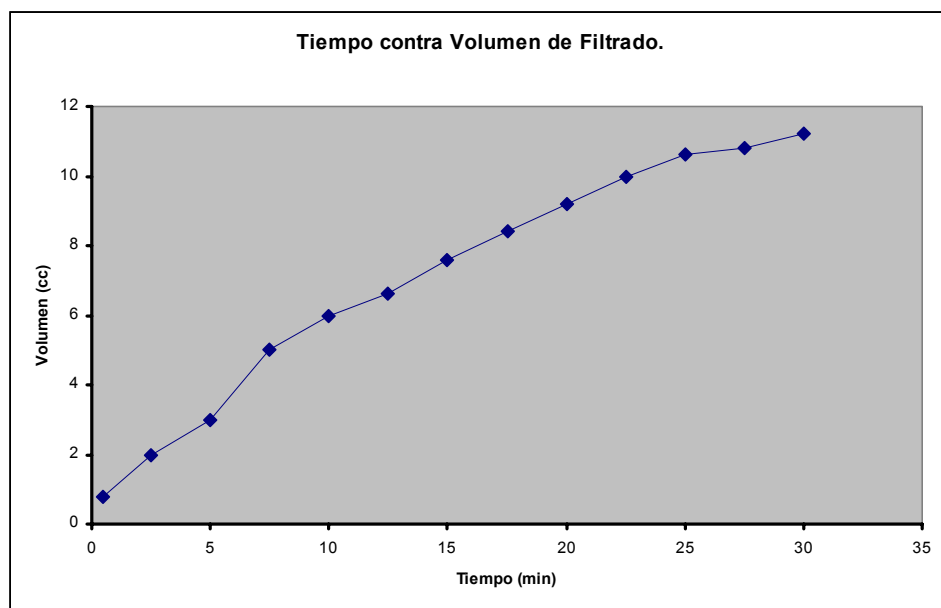


Figura 4.9 Filtración Dinámica para el sistema Flo-Pro
(4lb/bbl de FR-021M modificado físico).

El revoque resultante de esta prueba fue delgado y liso comprobando el carácter compresivo de los componentes del lodo. Ordinariamente el revoque dinámico es más delgado que el revoque estático, pero la pérdida de filtrado es mayor, esta disminución en el espesor del revoque es causada por el movimiento de la sarta de perforación y circulación del lodo, lo que genera la erosión del revoque.

El revoque se forma totalmente a los 10 minutos aproximadamente (estado de equilibrio cuando la deposición sobre el revoque es igual a la erosión), desde el inicio de la prueba, tal y como se observa en el cambio de pendiente de la curva de tasa de filtrado de la figura 4.10.

El volumen de filtrado final es de 11.2 ml/30min y la tasa de filtrado promedio es de 0.46 ml/s.m², siendo este un valor bajo y constante desde los 15 minutos de prueba aproximadamente. Estos resultados demuestran que el FR-021M, proporciona un buen control del filtrado a condiciones reales de pozo.

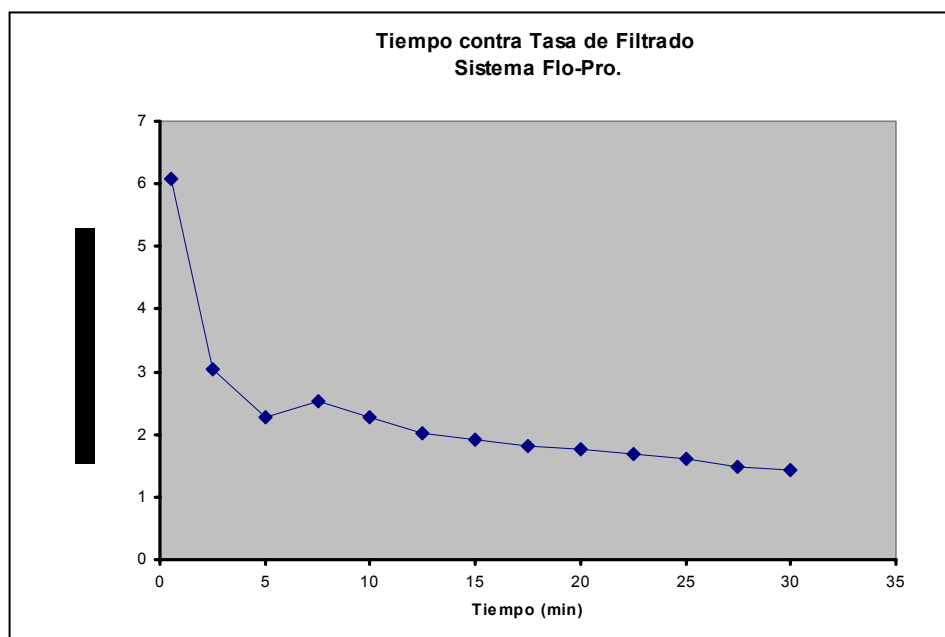


Figura 4.10 Tasa de Filtrado para el sistema Flo-Pro
(4lb/bbl de FR-021M modificado físico).

4.2 Sistema Poly-Plus®.

El comportamiento del FR-021M usado para controlar la pérdida de filtrado obtenida a través de los métodos de modificación física, química y su estado nativo, que se observa en la figura 4.11. Es claro que el FR-021M resultante de la modificación física de doble tambor ofrece un mayor control en la pérdida de filtrado, seguido por los modificado químicamente y por último los no modificado o nativos

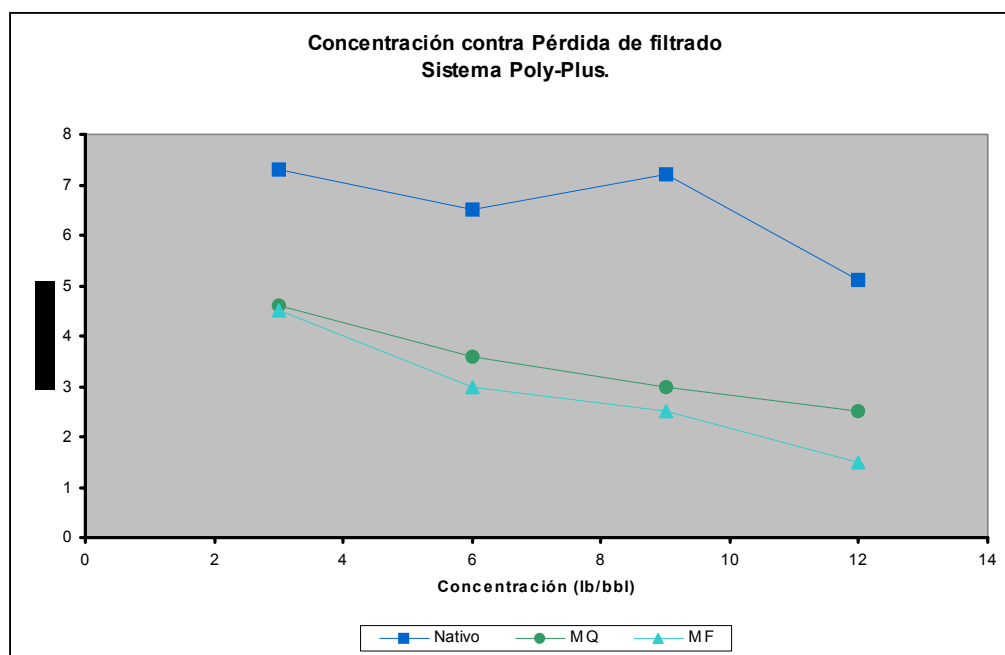


Figura 4.11 Comportamiento de la pérdida de filtrado para el sistema Poly-Plus.

El FR-021M modificados químicamente a pesar de ofrecer un buen control de filtrado, presentan valores alto de pH los cuales no son conveniente por lo explicado anteriormente en los sistema Flo-Pro y para su control requiere el uso de reguladores de pH lo que se traduce en aumento de costos del sistema.

La solubilidad de los polímero es afectada por el pH este determina frecuentemente el grado de ionización de los grupos funcionales a lo largo de la cadena del polímero.

Tabla 4.3 Propiedades del sistema Poly-Plus comercial y para una concentración de 3 lb/bbl de FR-021M modificado.

Propiedades	Comercial	M Q	M F
Densidad lpg	9.6	10	9.9
V. P cps	21	23	23
P .C lb/100ft ²	22	17	34
V .A cps	31	31	40
Gel 10" lb/100ft ²	3	3	5
Gel 10' lb/100ft ²	6	9	8
% Agua	83	83	83
%Sólidos	17	17	17
pH	9,7	12,8	9,5
Filtrado API (estático) cc	5,5	4,6	4,5

Para este sistema el FR-021M en su estado nativo también proporciona un control en la pérdida de filtrado para concentraciones mayores a 12 lb/bbl, pero después de ser sometidos a la prueba de envejecimiento presenta valores de reología que se encuentran fuera del rango recomendados para este tipo de sistema (Ver tabla 2.4 y I.21 apéndice 1)

Para el estado de modificación física de doble tambor del FR-021M se escoge la concentración de 3lpb, por ser está la que proporciona menor pérdida de filtrado a menor costo (Ver tablas IV.4 y IV.5).

En este sistema con una concentración de 3 lpb de FR-021M modificado físicamente la pérdida de filtrado es de 4.5 cc (Ver figura 4.11), siendo esta menor a los 5,5 cc que se obtiene con el controlador de filtrado comercial (Tabla 4.3).

La viscosidad plástica es de 23 cps (Ver figura 4.12), resultado levemente mayor a los 21 cps obtenido con el uso del producto comercial (Tabla 4.3). Este aumento puede ser causado por la granulometría del FR-021M modificado físicamente, o por la capacidad que tenga este de mejorar la viscosidad del sistema. A través de los procesos de modificación se busca aumentar la solubilidad de los polímeros en agua y su capacidad de desarrollar viscosidad.

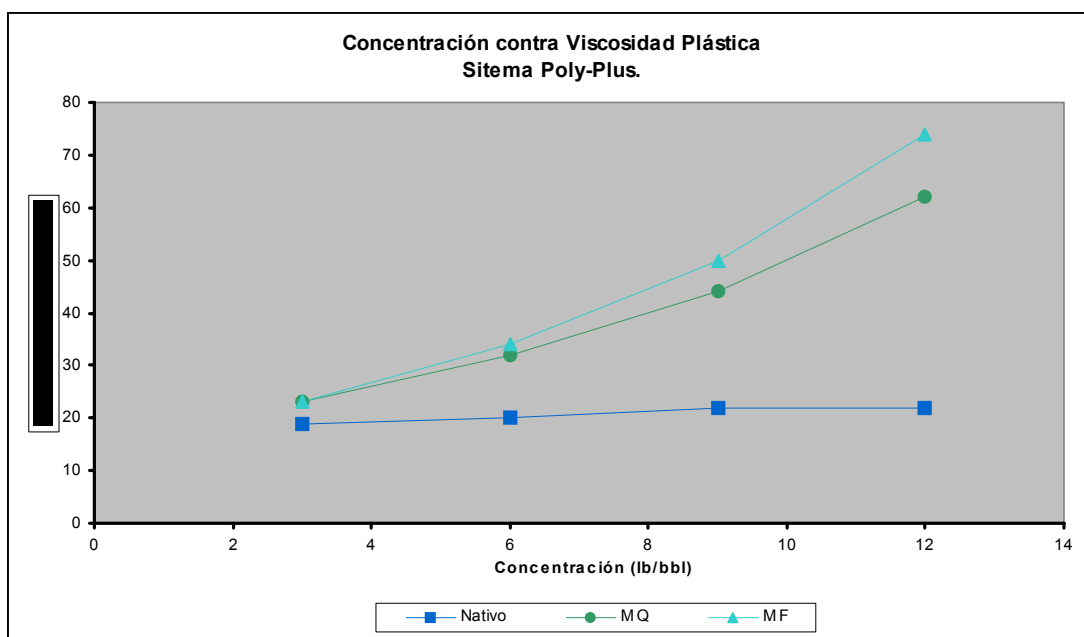


Figura 4.12 Comportamiento de la viscosidad plástica para el sistema Poly-Plus.

El punto cedente es de 34 lb/100ft² para la concentración de 3 lpb (Ver Figura 4.13), siendo este mayor al que se obtiene con el controlador de filtrado comercial para este sistema, el cual es de 22 lb/100ft² (Tabla 4.3). En cuanto a la fuerzas de gel (tabla 4.3) los valores son de 5 y 8 lb/100ft² para los geles a 10" y 10' respectivamente, representando estos valores un incremento con respecto a los obtenidos con la formulación comercial los cuales son de 3 y 6 lb/100ft² respectivamente. Lo valores de fuerzas de gel obtenido con el uso del FR-021M modificado físicamente se encuentra dentro del rango de valores que caracterizan

este tipo de sistema(Ver tabla2.4). Prevalece el carácter de geles instantáneos definidos por valores bajo con una diferencia no mayor a cinco unidades entre la fuerza de gel inicial y la final.

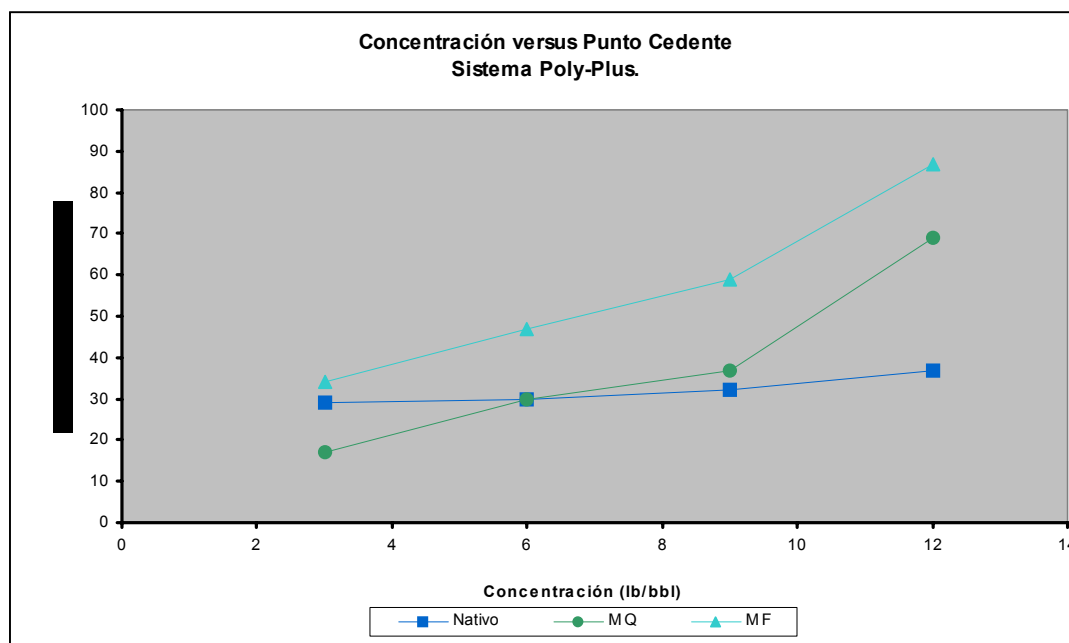


Figura 4.13 Comportamiento del punto cedente para el sistema Poly-Plus

A través de este resultado podemos decir que el FR-021M modificado físicamente actúa armónicamente con el viscosificante primario del sistema sin interferir con la capacidad que tiene este de desarrollar propiedades tixotrópicas. Además de lo mencionado anteriormente el FR-021M modificado físicamente es un producto no iónico y soluble tanto en agua dulce como en agua salada.

La viscosidad aparente es de 44 cps (Ver figura 4.14), representando un aumento con respecto a la obtenida con el agente controlador del filtrado comercial, la cual es de 31 cps (Tabla 4.3). Este aumento es originado por la capacidad que tiene el FR-021M modificado físicamente para desarrollar viscosidad en frío, además por el incremento del punto cedente y las fuerzas de gel, ya que la viscosidad

aparente denota todos los efectos que pueden causar restricciones al flujo. Este valor de viscosidad aparente proporciona al sistema un incremento en su capacidad de suspensión, representando esto una disminución en el fenómeno de decantación de los sólidos agregado que tienen como función principal suministrar el peso adecuado al lodo y como consecuencia una densidad estable.

En cuanto al comportamiento del índice reológico (figura 4.15) al igual que el sistema Flo-Pro, prevalece el carácter de reología inversa ($PC > VP$) presentado por la gran mayoría de los sistemas poliméricos. Como se explico anteriormente la reología inversa representa una propiedad importante para los sistemas poliméricos, ya que esto es un indicativo de la capacidad de limpieza que proporciona el lodo durante la perforación, mientras mayor es el valor de índice reológico, mayor es la capacidad de limpieza del lodo, implicando esto una disminución en los requerimientos de la potencia hidráulica necesaria durante la operaciones de perforación.

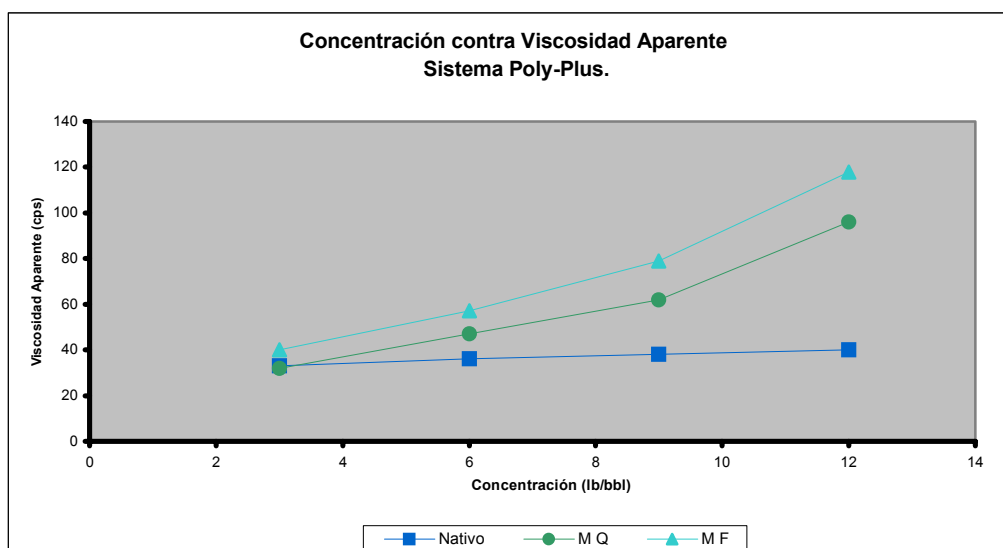


Figura 4.14 Comportamiento de la viscosidad aparente sistema Poly-Plus.

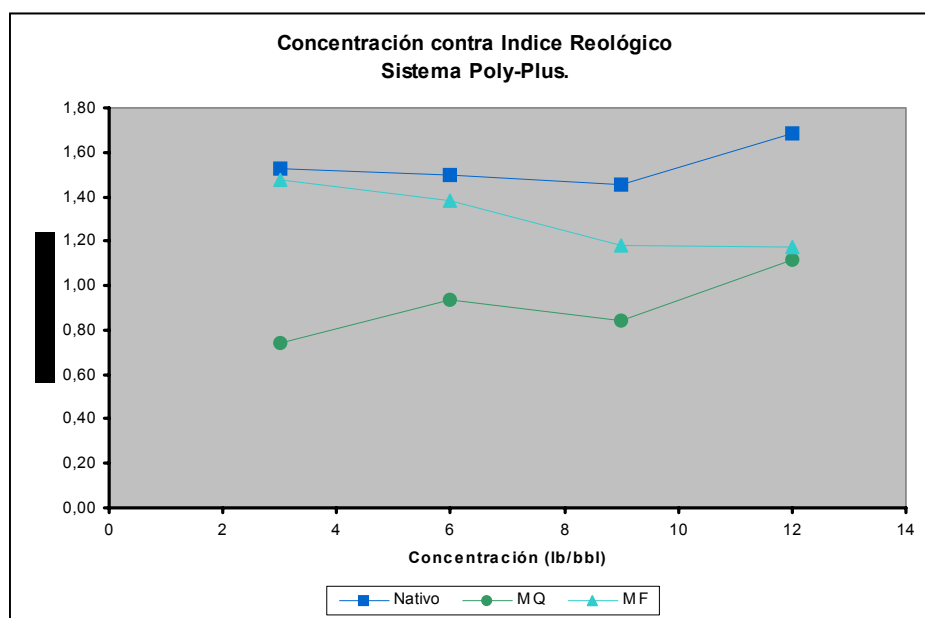


Figura 4.15 Comportamiento del índice reológico sistema Poly-Plus.

Los porcentajes de agua y sedimentos son de 83 y 17 respectivamente (Ver Tabla 4.3), siendo estos valores iguales a los obtenidos con el agente comercial, lo cual indica el carácter de bajo contenido de sólidos presentado por estos sistemas. Es esta característica una de las propiedades más importante que presentan este sistema de lodo a pesar de que el viscosificante primario es bentonita.

El espesor presentado por los revoques varían entre 1/32 a 3/32 de pulgadas (Figura de los revoques), mostrando la capacidad que tienen estos sistemas de lodos para formar revoques delgados a pesar de que de que en algunos casos la concentración de sólido y densidad son elevadas, confirmando así la alta compresibilidad de los componentes del sistema.

4.2.1 Prueba de Envejecimiento.

Como se muestra en la tabla 4.4, las propiedades reológicas del lodo después de la prueba de envejecimiento aumentan con respecto a las del lodo sin envejecer,

aun cuando estos valores están dentro de los rangos recomendados para este tipo de fluido de perforación.

La pérdida de filtrado aumenta de 5.5 a 6,5 cc después de ser sometida a condiciones que simulan las características de pozos (Ver Figura 4.6). A pesar de este aumento el valor de la pérdida de filtrado se encuentra dentro del rango recomendado, demostrado la capacidad del producto a proporcionar el control requerido a condiciones de pozo.

La viscosidad plástica sufre un aumento con respecto a la obtenida con el agente comercial de 21 a 25 cps (Ver tabla 4.4).

Tabla 4.4 Propiedades del sistema Poly-Plus antes y después de envejecer
(3 lpb de FR-021M modificado físico)

Propiedades	Antes de envejecer	Envejecido
Densidad lpg	9,9	9,9
V.P (cps)	21	25
P.C (lb/100ft ²)	22	30
Gel 10" (lb/100ft ²)	3	6
Gel 10' (lb/100ft ²)	6	7
Filtrado API 30' (cc)	5,5	6,5
Filtrado ATAP dinámico (cc)	12	14,4

Después del proceso de envejecimiento, el punto cedente, las fuerzas de gel a lo 10" y 10' aumentan. Sin embargo, al igual que la viscosidad plástica los valores se mantienen dentro del rango aceptable (Ver tabla 4.2). Estos aumentos de las

propiedades reológicas pueden ser causados por la temperatura así como la ruptura de las láminas de arcillas durante el proceso de envejecimiento.

Las arcillas poseen ciertas cargas positivas y negativas en el borde de las plaquetas como consecuencia del hecho de que las mismas son el producto de la ruptura de las láminas más grandes.

Las arcillas que poseen una carga de superficie negativa son láminas extensas y continuas tal y como se encuentran en los depósitos naturales. Sin embargo en los lodos estas láminas se rompen por cote mecánico, al ser sometidos a rotación durante el proceso de envejecimiento que simula las condiciones de circulación de un lodo en la perforación de un pozo. Esta ruptura de las láminas deja expuestas las valencias de ligadura en los bordes de las plaquetas. Muchos de estos sitios están cargados positivamente y de esta manera los bordes de las láminas de arcilla presentan a menudo una capa positiva de carga.

Los aniones tales como CO_3^{-2} , HCO_3^{-2} , etc., pueden encontrar entonces sitios par equilibrar las cargas.

El resultado es la atracción entre las partículas de arcilla y los aniones en sus bordes. Producto de la atracción excesiva de las cargas eléctricas las láminas de arcilla se unen cara –arista y/o arista –arista originando un aumento de la viscosidad.

El desorden en la disposición de las laminas de arcilla al formarse el revoque produce que estas no puedan proporcionar el arreglo necesario para crear un revoque impermeable teniendo como consecuencia un descontrol en la pérdida de filtrado.

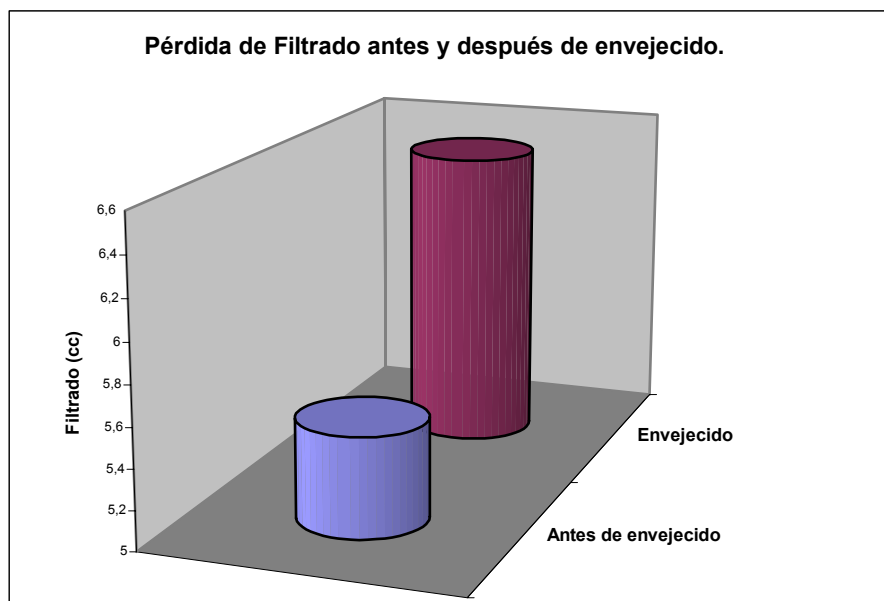


Figura 4.16 Pérdida de filtrado antes y después de envejecido.

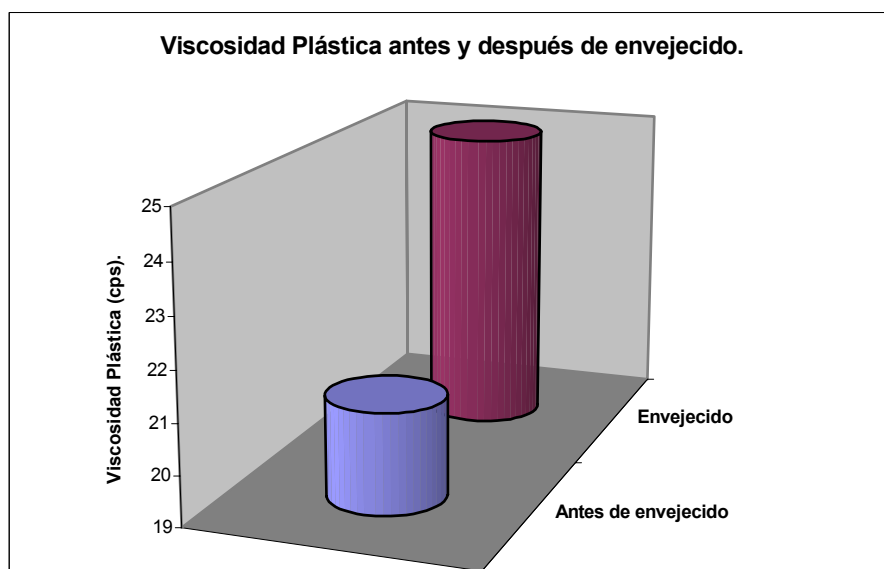


Figura 4.17 Viscosidad plástica antes y después de envejecido.



Figura 4.18 Propiedades reológicas antes y después de envejecido

4.2.2. Prueba de Filtrado Dinámico.

Los resultados de la prueba de filtración dinámica, que se muestran en la figura 4.19 y 4.20, indican un bajo volumen de filtrado total al final de la prueba (30 min), por debajo de 15 ml de volumen.

Al igual que para los sistemas anteriormente analizados, el revoque resultante de esta prueba fue delgado y liso comprobando el carácter compresivo de los componentes del lodo. (Ver anexos).

El revoque se forma totalmente a los 10 minutos, desde el inicio de la prueba, tal y como se observa en el cambio de pendiente de la curva de tasa de filtrado de la figura 4.20.

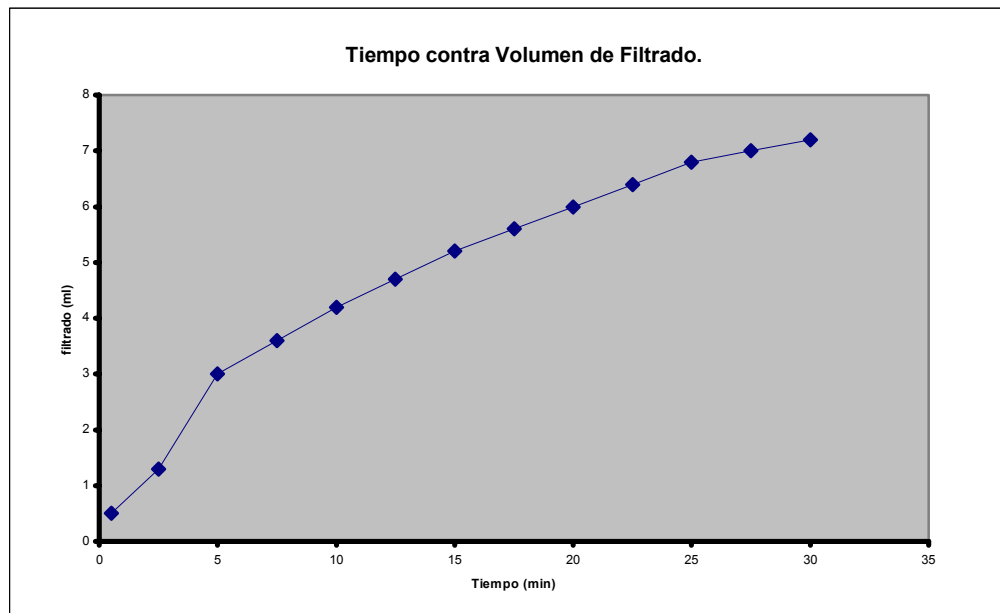


Figura 4.19 Filtración dinámica para el sistema Poly Plus.

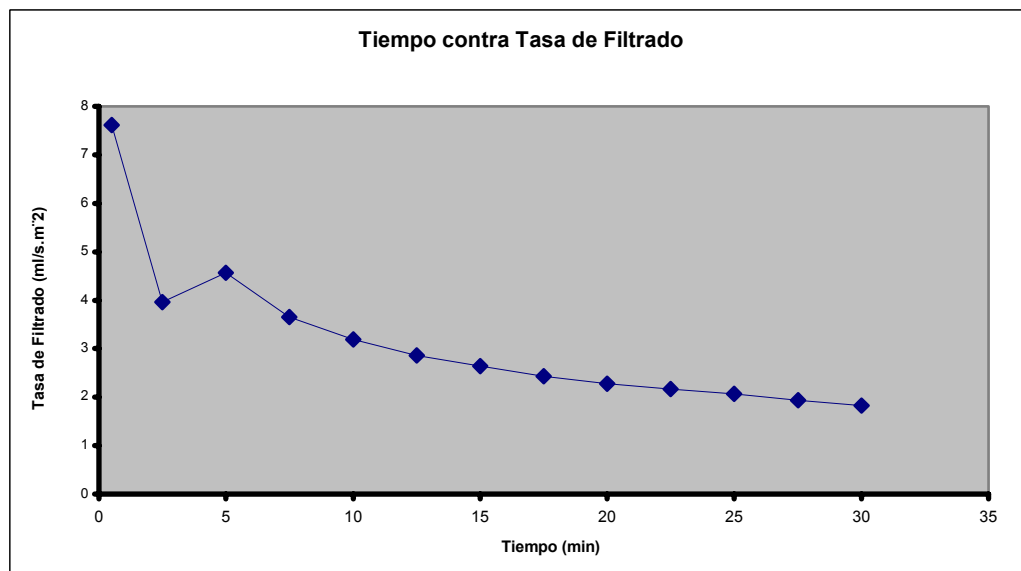


Figura 4.20 Tasa de filtrado para el sistema Poly-Plus.

Estos resultados demuestran que para el sistema Poly Plus el nuevo producto, proporciona un buen control del filtrado a condiciones reales de pozo.

4.3 Sistema Sales de Formiato.

Para escoger el estado del FR-021M que mejor control de la pérdida de filtrado proporciona al sistema, se procedió de manera similar al de la selección efectuada para los sistemas anteriormente discutidos.

En la figura 4.21 se observan los distintos estados del FR-021M a diversas concentraciones, notando que FR-021M modificados física y químicamente proporciona buen control filtrado y por último el FR-021M en su estado nativo.

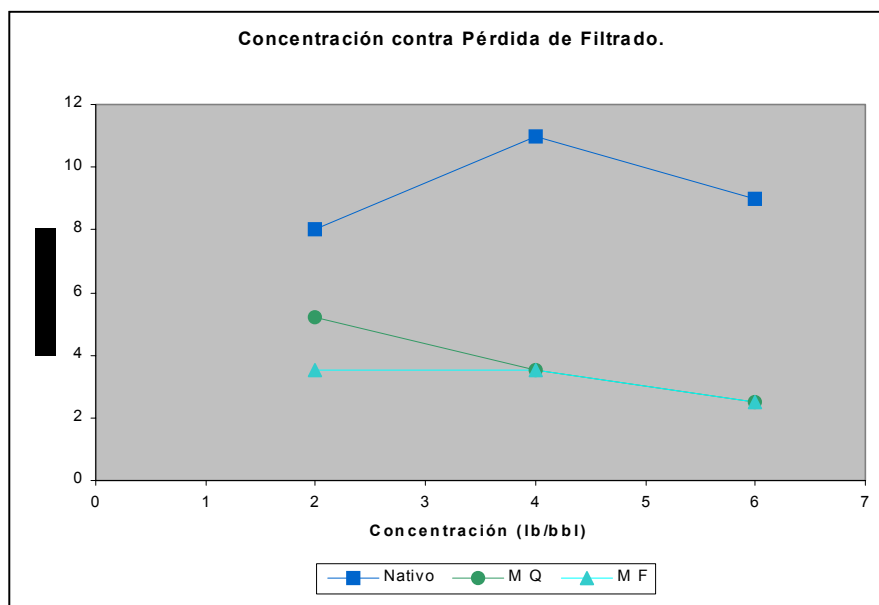


Figura 4.21 Comportamiento de la pérdida de filtrado sistema Formiato.

Para este sistema se escoge el FR-021M modificado físicamente (doble tambor), y en especial la concentración de 2 lpb, por ser esta la que mejor control del filtrado proporciona a menor costo (Ver tablas IV.7 e IV.8 apéndice 4)

Para esta concentración de 2 lpb por modificación física (DT), la pérdida de filtrado es de 3,5 cc representado este valor, un aumento leve con la pérdida de filtrado

obtenida con el uso del agente de control de filtrado comercial la cual es de 3 cc, pero dentro del rango de valores requerido para este tipo de sistema de lodo (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Propiedades del sistema Formiato comercial, y para una concentración de 2 lpb de FR-021M modificado.

Propiedades	Comercial	M Q	M F
Densidad lpg	9.5	9.4	9.5
V. P cps	11	10	11
P .C lb/100ft ²	33	23	25
V .A cps	30	22	23
Gel 10" lb/100ft ²	13	10	10
Gel 10' lb/100ft ²	20	14	16
Índice Reológico	3	2.3	2.3
% Agua	85	85	85
%Sólidos	15	15	15
pH	9.4	12	9.5
Filtrado API (estático) cc	3	5.2	3.5

Al igual que en los sistemas anteriormente discutidos, el FR-021M modificado químicamente también proporciona buen control de pérdida de filtrado, pero el valor del pH se encuentra fuera del rango requerido para este tipo de lodo (Ver tabla 4.4).

En la figura 4.22 se observa el comportamiento de la viscosidad plástica para los diversos estados del producto. Para la concentración de 2 lpb modificada físicamente, la viscosidad plástica es de 11 cps no representado un cambio a la que se obtiene con el uso del controlador de filtrado comercial.

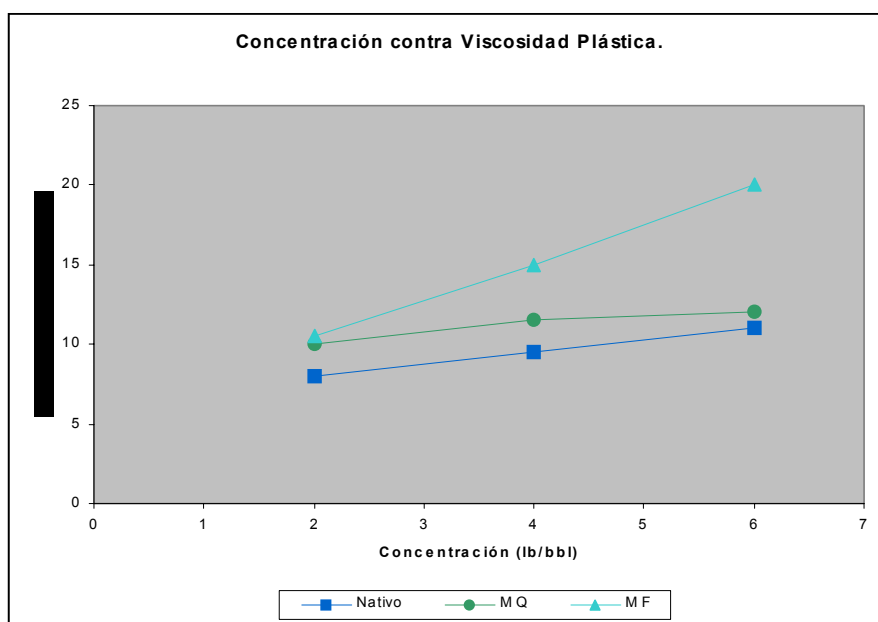


Figura 4.22 Comportamiento de la viscosidad plástica para el sistema Formiato.

En la grafica 4.23 se observa el comportamiento de el punto cedente para los tres estado del FR-021M. La concentración escogida anteriormente tiene un punto cedente de 25 lb/100ft² representando este valor una disminución con el que se obtiene con el uso del agente comercial el cual es de 33 lb/100ft²

Como se puede observar en la tabla 4.5, además del punto cedente las fuerzas de gel a los 10 segundo y 10 minutos también sufren una disminución con respecto a las que se obtuvieron con el uso de agente de control de filtrado comercial. Lo que indica una disminución de las restricciones al flujo causadas por las presencia de las cargas (fuerzas electroestáticas). Esta disminución de las cargas puede ser causada por la presencia de sales que disminuye la capacidad de interacción de los polímeros presentes en el sistema (disminución de las fuerzas de atracción entre los polímeros y deshidratación) además la capacidad que tiene la goma xantano (Viscosificante) de desarrollar propiedades tixotrópicas depende del comportamiento sinérgico con el FR-021M sustituto del controlador de filtrado comercial. En sistema donde existe competencia por el agua, el xantano como

otros polímeros no se hidrata fácilmente, la falta de agua inhibe su habilidad de hidratarse y también su estabilidad sobre un largo periodo de tiempo. El FR-021M es de carácter no iónico y soluble tanto en agua salada como en agua dulce

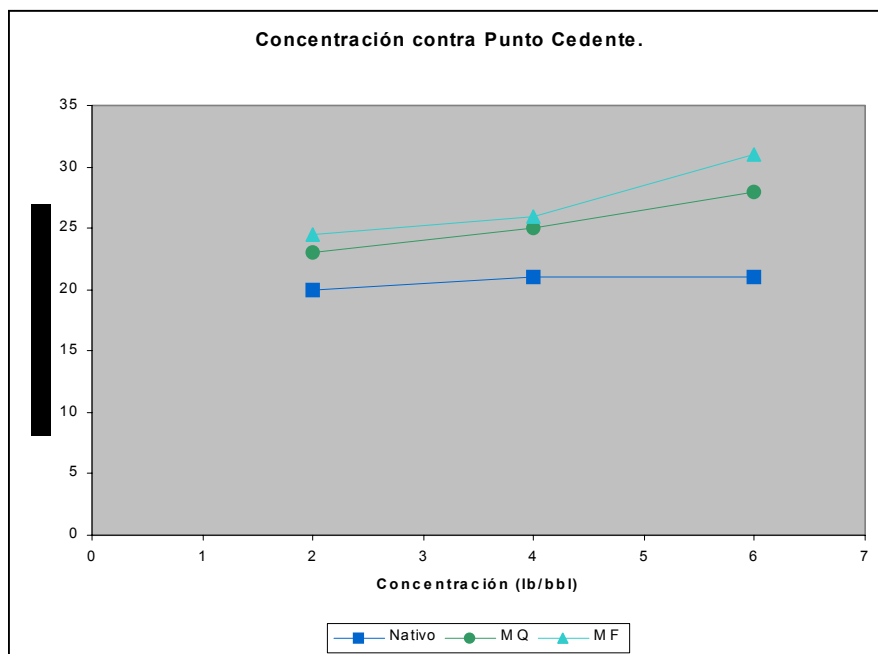


Figura 4.23 Comportamiento del punto cedente para el sistema Formiato.

Como se observa en la grafica 4.24, aunque ocurre una disminución en el valor del índice reológico de 3 a 2.3, prevalece el carácter de reología inversa el cual es una de las propiedades más importante de este tipo de lodo.

El porcentaje de agua y sedimentos es de 85 y 15 respectivamente siendo estos valores iguales a los obtenidos con el agente comercial.

4.3.2 Prueba de envejecimiento.

En la tabla 4.4 se presentan los resultados de la prueba de envejecimiento para el sistema de sales de formiato.

Tabla 4.6 Propiedades del sistema Formiato antes y después de envejecer
(2 lpb de FR-021M modificado físicamente).

Propiedades	Antes de Envejecer	Envejecido
Densidad lpg	9,5	9,5
V.P (cps)	11	11
P.C (lb/100ft ²)	25	25
Gel 10" (lb/100ft ²)	10	10
Gel 10' (lb/100ft ²)	16	14
Filtrado API 30' (cc)	3,5	4
Filtrado ATAP dinámico (cc)	8	8,4

Las propiedades reológicas permanecen constantes con excepción de la fuerza de gel a los 10 minutos que sufre una pequeña disminución de 16 a 14 lb/100ft². Los valores de las propiedades reológicas después de ser envejecido el sistema garantizan una excelente capacidad de limpieza y acarreo para la perforación de pozos de cualquier tipo en especial horizontal o altamente inclinado.

El control del filtrado fue excelente, la pérdida de filtrado después de ser envejecido el sistema fue de 4 cc/30min. representando este valor un leve aumento con la el valor obtenido ante de ser envejecido el sistema el cual es de 3,5 cc/30min (Ver tabla 4.6)

Los resultados demuestran la alta estabilidad térmica del sistema formiato, las sales orgánicas (formiatos) aumentan la temperatura de transición de los polímeros. Cuando se formula con formiato de sodio la estabilidad térmica del sistema puede alcanzar hasta una temperatura de 350°F.

4.3.2 Prueba de Filtración Dinámica.

Los resultados de la prueba de filtración dinámica, que se muestran en la figura 4.24 y 4.25, indican un bajo volumen de filtrado total al final de la prueba (30 min.), por debajo de 15 ml de volumen.

En la grafica 4.24 se puede apreciar que el revoque se formó totalmente aproximadamente a los 5 minutos de iniciarse la filtración tal como, lo indica el cambio de pendiente en la curva.

El volumen total del filtrado recolectado fue de 8.4 cc/30 min, este valor nos da una idea de la baja permeabilidad del revoque formado, además de demostrar la habilidad del FR-021M para controlar el filtrado a condiciones de pozo.

El tiempo de exposición a las condiciones de presión y temperatura a la que fue expuesto el revoque una vez formado, nos indica la alta resistencia compresiva de los componentes del sistema.

La tasa de filtrado promedio es de aproximadamente 0.29 ml/s.m², siendo este un valor bajo y constante desde los 5 minutos de prueba, el valor de la tasa de filtrado final es de 1.06 ml/s.m². Estos resultados demuestran que para el sistema Formiato, el FR-021M (M F), proporciona un buen control del filtrado a condiciones reales de pozo.

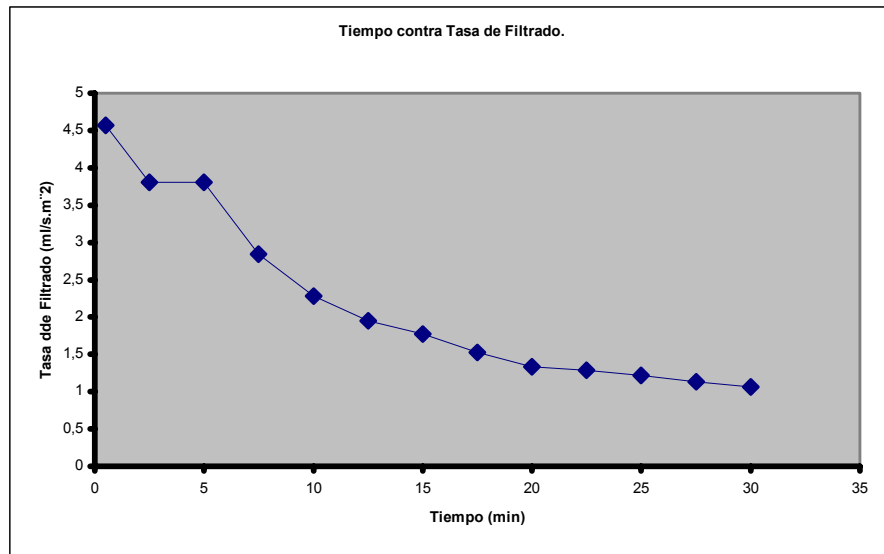


Figura 4.24 Tasa de filtrado para el sistema Formiato.

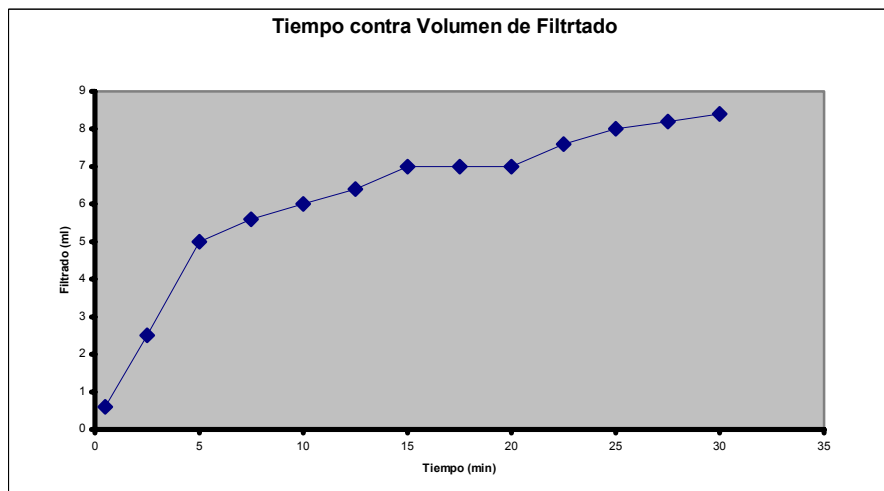


Figura 4.25 Filtración dinámica sistema Formiato.

4.4 Sistema LLT.

Al evaluar los resultados obtenidos para el sistema de lodos LLT con el uso del nuevo agente controlador de filtrado, el FR-021M modificado físicamente (MF) por el método de doble tambor es el que tienen la mayor capacidad de controlar la pérdida de filtrado. En la figura 4.26 se puede observar el comportamiento del FR-021M en su estado nativo, modificada física y químicamente.

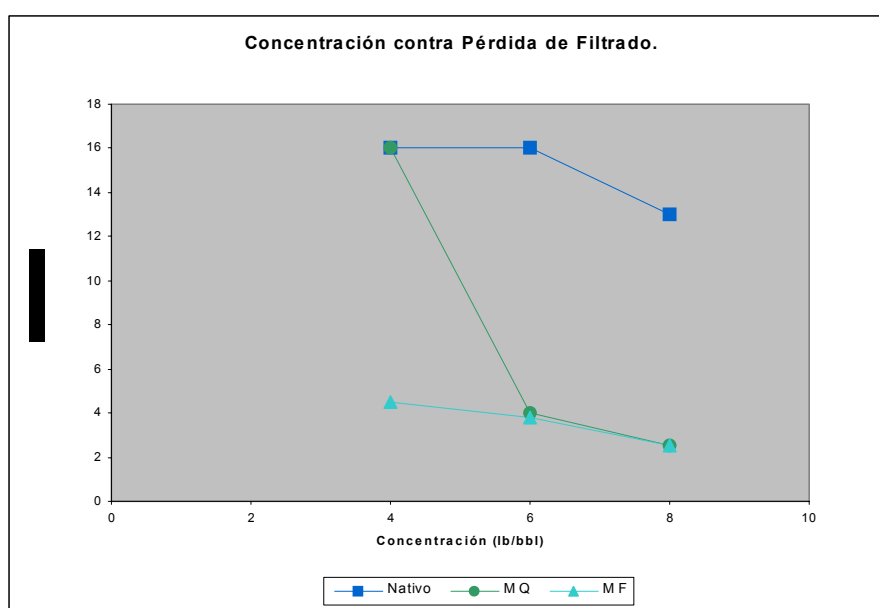


Figura 4.26 Comportamiento de la pérdida de filtrado para el sistema LLT.

Para concentraciones superiores a 6 lpb, el FR-021M modificado químicamente proporcionan un buen control en la pérdida de filtrado, pero los valores de pH alcanzan un rango 12 a 13.5, siendo estos superiores al recomendado para sistemas poliméricos. Los valores de pH de este sistema deben estar comprendidos en un rango de 9 –10.

Tabla 4.7 Propiedades del sistema LLT original y para una concentración de 4 lpb de FR-021M modificado.

Propiedades	Comercial	M Q	M F
Densidad lb/bbl	10.1	10	10.1
V. P cps	13	20	17
P .C lb/100ft ²	44	34	41
V .A cps	35	41	38
Gel 10" lb/100ft ²	13	11	9
Gel 10' lb/100ft ²	18	18	15
Índice Reológico	3.4	1.7	2.4
% Agua	87	85	87
%Sólidos	13	15	13
pH	9.5	13	9.5
Filtrado API (estático) cc	5	16	4.5

El FR-021M en su estado nativo no proporcionan buena capacidad para controlar la pérdida de filtrado en este sistema de lodo (Ver figura 4.26). La pérdida de filtrado obtenida para las distintas concentraciones siempre fue superior a los 13 cc, encontrándose fuera del rango de valores de filtrado de este sistema, el cual es de 4 a 8 cc (Ver tabla 2.6)

Para el sistema LLT con el FR-021M modificado físicamente (M F), se escogió la concentración de 4 lb/bbl, por ser está la que proporciona menor pérdida de filtrada a menor costo (Ver tablas IV.10 y IV.11).

Con la concentración de 4 lpb del FR-021M modificado físicamente, la pérdida de filtrado es de 4,5 cc representando este valor, una leve disminución a la obtenida con el regulador de filtrado comercial, la cual es de 5 cc (Ver tabla 4.7).

En las figuras 4.27, 4.28. y 4.29 se puede observar el comportamiento correspondientes a las propiedades reológicas en el sistema LLT al usar el FR-021M en su estado nativo, modificado química (M Q)y físicamente (M F), como

agente de control de filtrado. La viscosidad plástica es de 17 cps para la concentración de 4 lpb modificada físicamente, representando este valor un aumento con respecto al que se obtiene con el uso del agente de filtrado comercial, que es de 13 cps (Ver Tabla 4.1).

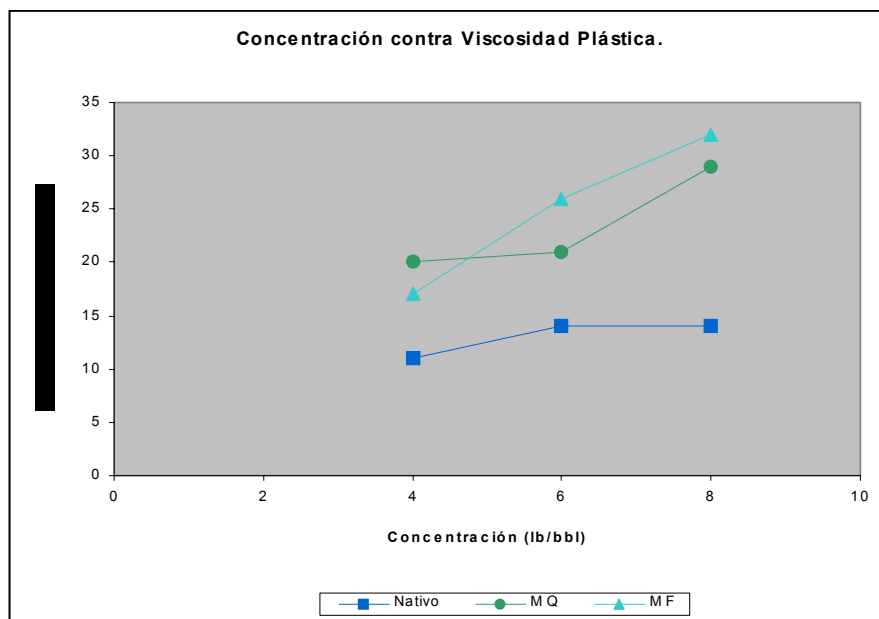


Figura 4.27 Comportamiento de la viscosidad plástica para el sistema LLT.

En cuanto al punto cedente es de 41 lb/100ft² (Ver figura 4.28) para esta concentración de 4 lpb de FR-021M, siendo este menor al obtenido con el uso del agente de control de filtrado comercial el cual tiene un valor de 44 lb/100ft² (Tabla 4.1).

Los valores de la fuerzas de gel a 10 segundos y 10 minutos son de 9 y 13 respectivamente, encontrándose los mismos por debajo del sistema original, pero dentro del rango que debe presentar un sistema con estas características (Ver Tabla 2.6.y 4.7).

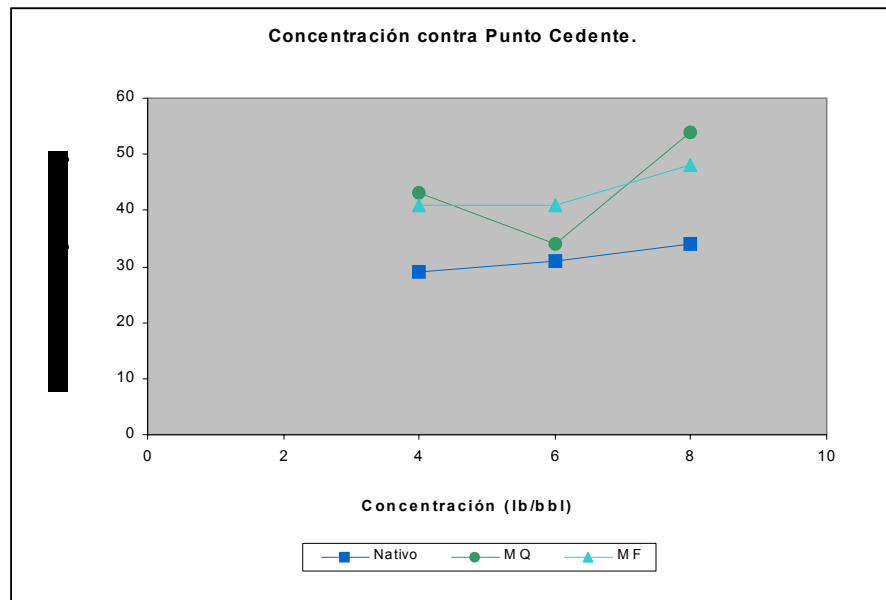


Figura 4.28 Comportamiento del punto cedente para el sistema LLT.

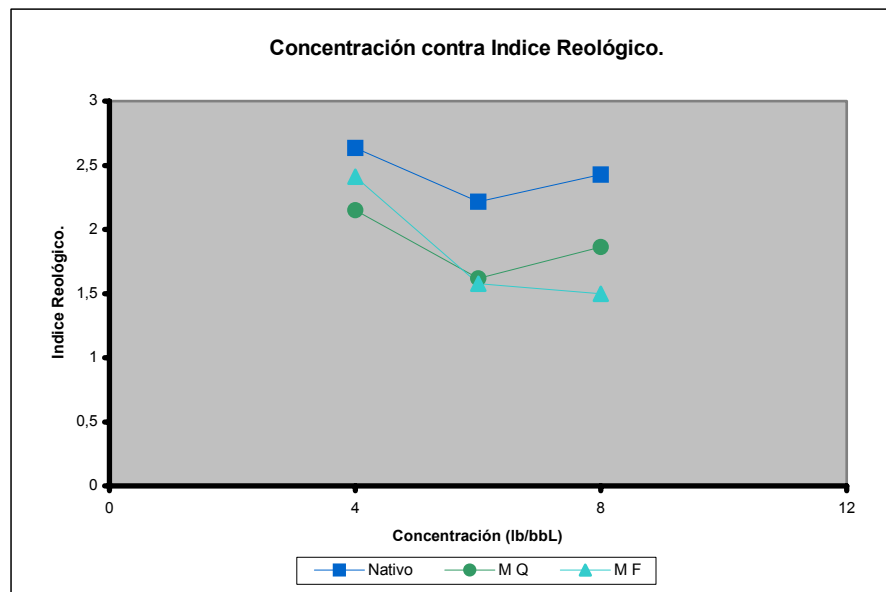


Figura 4.29 Comportamiento del índice reológico para el sistema LLT.

En el comportamiento del índice reológico (Ver figura 4.29.) prevalece el carácter de reología inversa (punto cedente mayor a la viscosidad plástica) presentado por la gran mayoría de los sistema poliméricos.

La reología inversa representa una propiedad importante para los sistemas poliméricos, ya que esto es un indicativo de la capacidad de limpieza que proporciona el lodo durante la perforación, mientras mayor es el valor de índice reológico, mayor es la capacidad de limpieza del lodo, implicando esto una disminución en los requerimientos de la potencia hidráulica durante la perforación.

En la grafica 4.30 se observa el comportamiento de la viscosidad aparente. Para la concertación de 4 lb/bbl de FR-021M modificado físicamente la viscosidad aparente es de 38 cps, lo que representa un aumento con la obtenida al usar la formulación original que es de 21 cps (Ver Tabla 4.1).

Este aumento es generado por el uso del FR-021M ya que como se explicó anteriormente a través de los procesos de modificación lo que se busca es aumentar la capacidad de desarrollar viscosidad en frío por la mezcla de polisacáridos, además de aumentar el valor de los pregeles que este pueda desarrollar y el aumento de la solubilidad en agua. Este aumento en la viscosidad aparente también contribuye en la capacidad de suspensión del material densificante, permitiendo obtener las densidades requeridas.

Los porcentajes de agua y sedimentos son de 85 y 15 respectivamente (Ver tabla 4.7), siendo estos valores iguales a los obtenidos en el sistema original, lo cual indica el carácter de bajo contenido de sólidos presentado por estos sistemas. Es este carácter una de las propiedades mas importante que presenta este sistema de lodo, ya que disminuyen notablemente los daños que se pueden causar a las formaciones productora durante las operaciones de perforación.

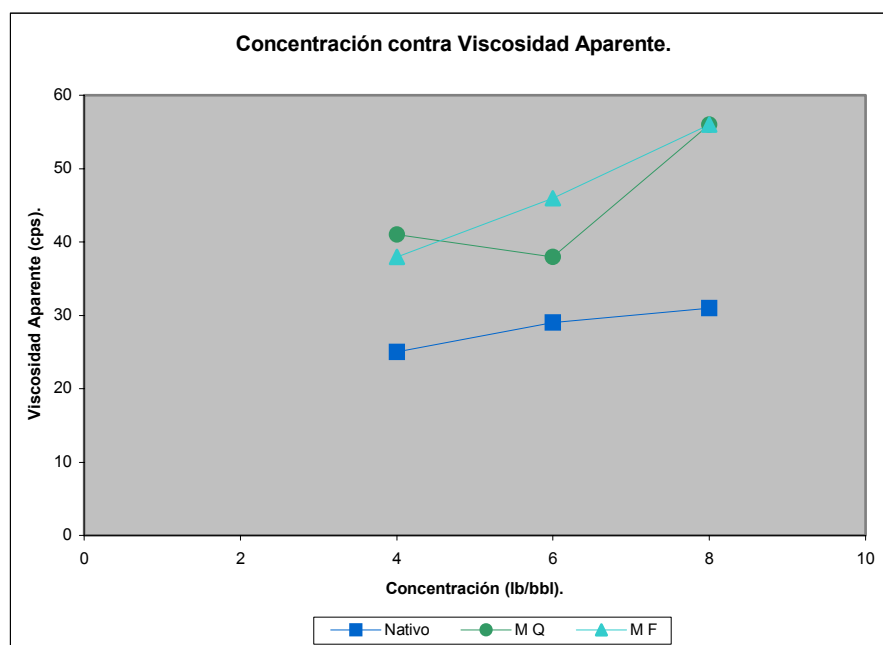


Figura 4.30 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema LLT.

El espesor presentado por los revoque varían entre 1/32 a 3/32 pulgadas (Ver anexos), comprobando la capacidad que tienen estos sistemas de lodos para formar revoques delgados, confirmando la alta compresibilidad de los componentes del sistema al formar el revoque.

4.4.2 Prueba de Envejecimiento.

Como se muestra en la tabla 4.8, las propiedades reológicas del lodo después de la prueba de envejecimiento disminuyen con respecto al lodo a condiciones iniciales, aun cuando estos valores están dentro de los rangos recomendados para este tipo de fluido de perforación.

La pérdida de filtrado aumenta de 4.5 a 7cc al ser sometida a condiciones que simulan las características de pozos (Ver Figura 4.31). Al ser bajo éste valor, disminuirían la posibilidad de daño a la formación, indicando la capacidad del producto a proporcionar el control del filtrado requerido a condiciones de pozo.

Tabla 4.8 Propiedades del sistema LLT antes y después de envejecido
(4 lb/bbl de FR-021M modificado físico)

Propiedades	Antes de Envejecer	Envejecido
Densidad lpg	10.1	10
V.P (cps)	17	15
P.C (lb/100ft ²)	41	38
Gel 10" (lb/100ft ²)	9	8
Gel 10' (lb/100ft ²)	15	13
Filtrado API 30' (cc)	4.5	7
Filtrado ATAP Dinámico (cc)	9	9,6

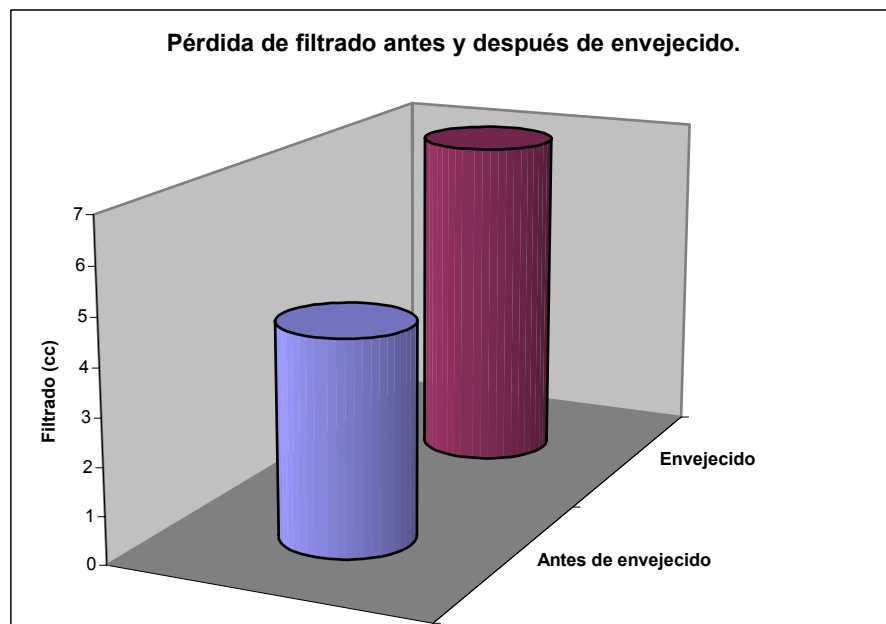


Figura 4.31 Pérdida de filtrado antes y después de envejecido el sistema LLT.

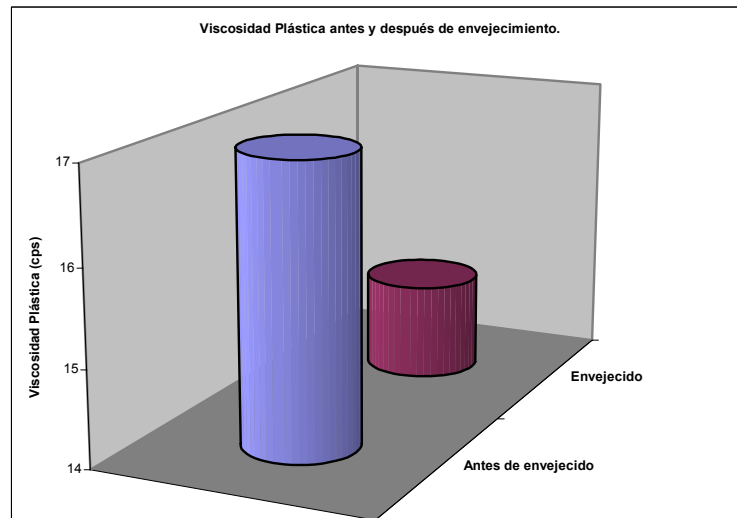


Figura 4.32 Viscosidad plástica antes y después de envejecido el sistema LLT.

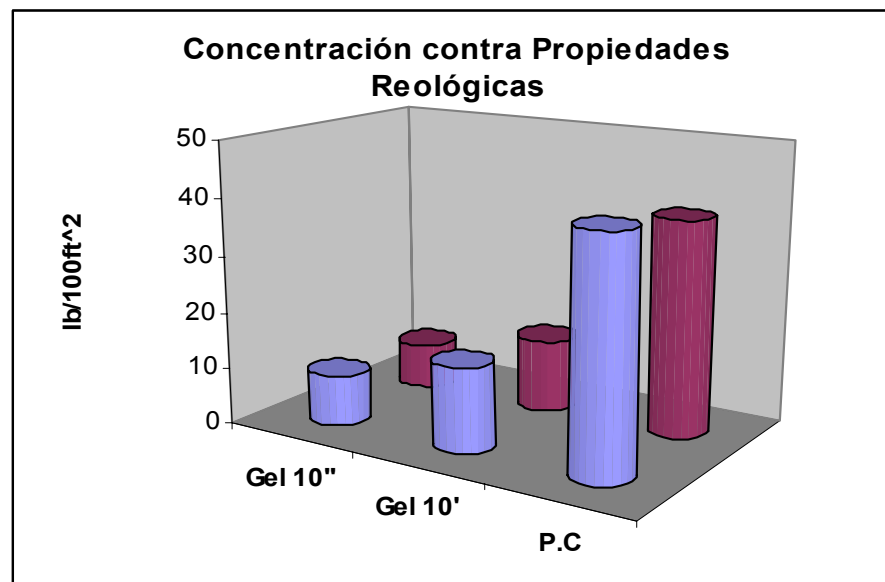


Figura 4.33 Propiedades reológicas antes y después de envejecimiento para el sistema LLT.

La viscosidad plástica sufre una disminución leve con respecto a la original de 17 a 15 cps (Ver figura 4.32).

Después del proceso de envejecimiento, el punto cedente, las fuerzas de gel a 10 segundos y 10 minutos también sufre una leve disminución. Sin embargo, al igual que la viscosidad plástica, los valores se mantienen dentro del rango aceptable para este tipo de sistema (Ver Figura 4.33).

Como se explicó anteriormente las propiedades reológicas de los lodos de perforación son afecta por la temperatura, generalmente disminuyen al aumentar la temperatura. Esta disminución es consecuencia de que los polímeros presentes en el sistema sufren alteraciones estructurales al ser expuestos por mucho tiempo a temperatura superiores a los 200 °F, a partir de esta temperatura se inicia un proceso de ruptura de las ramificaciones de los polímeros encargados de proporcionar viscosidad al sistema, implicando esto una merma en la capacidad de acarreo dinámico de los sólidos, además de disminución de la formación de estructuras de gel polimérica

4.43 Prueba de Filtración Dinámica.

Los resultados de la prueba de filtración dinámica, que se muestran en la figura 4.36 y 4.37, indican un bajo volumen de filtrado total al final de la prueba (30 min), por debajo de 15 ml de volumen.

Al igual que para el sistema Flo-Pro el revoque resultante de esta prueba fue delgado y liso comprobando el carácter compresivo de los componentes del lodo. El revoque se forma totalmente a los 5 minutos, aproximadamente desde el inicio de la prueba, tal y como se observa en el cambio de pendiente de la gráfica de tasa de filtrado de la figura 4.37.

El volumen de filtrado final es de 9.6 ml y la tasa de filtrado promedio es de aproximadamente 0.58 ml/s.m², siendo este un valor bajo y constante, desde los 15 minutos de prueba aproximadamente el valor de filtrado final es levemente mayor al que se obtiene con el agente de control de filtrado comercial, pero dentro del rango recomendado .Estos resultados demuestran que para el sistema LLT, el FR-021M, proporciona un buen control del filtrado a condiciones reales de pozo.

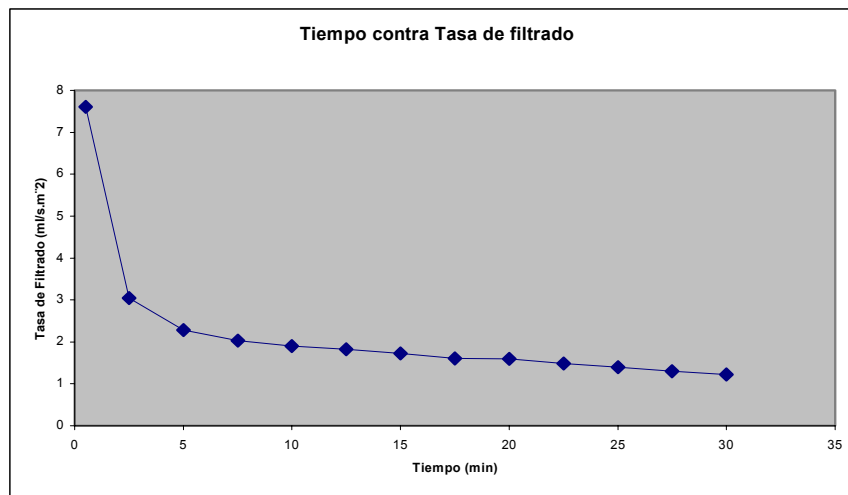


Figura 4.34 Tasa de filtrado del sistema LLT.

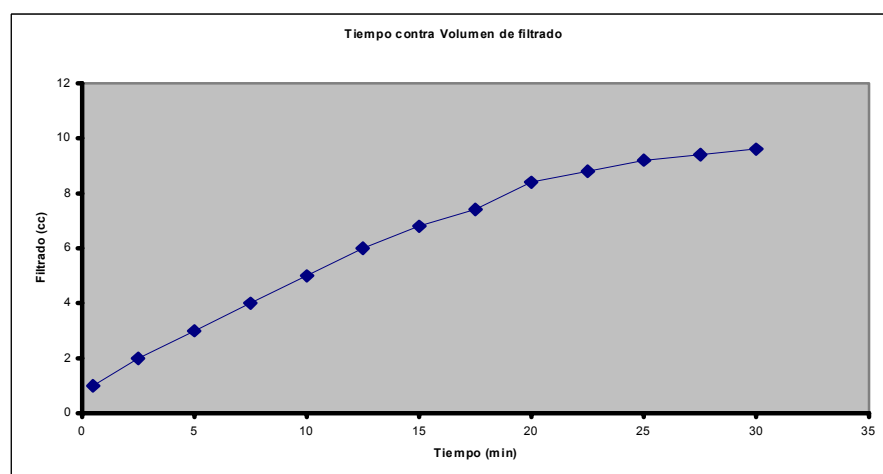


Figura 4.35 Filtración dinámica del sistema LLT

4.5 Prueba de Compatibilidad de los Fluidos

En la tabla 4.9 se presentan los resultados de la prueba de compatibilidad de los fluidos observado que luego de poner en contacto el lodo con una muestra de fluido de formación (petróleo de 22.5 ° API) a una temperatura de 150 °F, los lodos no generan emulsiones de alta viscosidad que puedan originar reducciones drásticas en la productividad del pozo.

Tabla 4.9 Resultados de la prueba de compatibilidad de los fluidos @ 150 °F

Sistemas	Flo-Pro			Poly Plus			Formiato			LLT		
Tiempo (min.)	O/L %	O %	L %	O/L %	O %	L %	O/L %	O %	L %	O/L %	O %	L %
0	100	-	-	100	-	-	100	-	-	100	-	-
5	15	45	35	80	10	10	80	10	10	80	20	-
10	15	45	35	70	20	10	70	20	10	70	20	10
15	15	45	35	50	25	25	60	30	10	40	30	30
20	10	45	45	40	35	25	40	30	30	40	30	30
25	10	45	45	30	40	30	30	40	30	20	40	40
30	10	45	45	30	40	30	20	45	35	20	40	40

Estos resultados nos dan una idea de la compatibilidad de los fluidos de la formación con los sistemas formulados con FR-021M modificado físicamente. Los fluidos al estar en contacto no forman emulsiones de alta viscosidad que puedan causar daños químicos severos a la formación contacto.

Además estos fluidos son diseñados con una mínima cantidad de sólidos para así disminuir los daños mecánicos causados a la formación por el arrastre de sólidos. Se sabe que los daños mas severos a la formación son inducidos durante las operaciones de perforación. Por tal razón en la actualidad existe una tendencia

de mejorar la propiedades de los lodos de perforación y así, minimizar los daño que se puedan causar.

En línea con lo explicado anteriormente, podemos decir que los sistemas evaluados son diseñados para disminuir los daños inducidos a la formación de tipo químico y mecánicos.

4.6 Análisis de Costos.

En el apéndice 2 se presentan las tablas de costos de los sistemas de fluidos de perforación evaluados técnicamente en este trabajo. El uso del FR-021M modificado físicamente ocasiona una disminución significativa de los costos en los sistemas de lodos de perforación evaluados

En la tabla 4.10 se puede observar el beneficio en costo que se tiene usando el FR-021M como agente de control del filtrado en los sistemas evaluados.

Tabla 4.10 Comparación de costo de los sistemas evaluados.

Sistemas	Flo-Pro \$/bbl	Poly Plus \$/bbl	Formiato \$/bbl	LLT \$/bbl
Costo Comercial	68,74	52,21	108,19	71,76
Costos con el FR-021M (MF)	66,88	51,53	97,63	70,88
Beneficios del FR-021M	1,86	0,72	10.56	0,88

Esta disminución es originada porque el FR-021M es extraído de un material que es producido masivamente en nuestro país, sumado a que los costos de su procesamiento son bajos y no requieren el uso de equipos de alta tecnología

El FR-021M modificado química y físicamente tiene un costo de 0,58 \$/lb, siendo este valor menor al del reguladores de filtrado comercial el cual tiene un precio de 2,93 \$/lb.

5. CONCLUSIONES.

- El producto FR-021M modificado físicamente por el método de doble tambor, proporciona un excelente control de la pérdida de filtrado en sistemas de lodos base agua, sin afectar significativamente los valores de las otras propiedades de los sistemas.
- El uso del FR-021M modificado físicamente como agente del control de filtrado, proporciona una disminución importante en los costos de los sistemas de lodos base agua evaluados.
- El FR-021M modificado físicamente es capaz de actuar armónicamente con los viscosificantes primarios para mejorar la viscosidad.
- El uso del FR-021M modificado físicamente, permite a los sistemas evaluados mostrar excelente propiedades reológicas.
- En su estado nativo, el FR-021M es ineficaz en el control de la pérdida de filtrado para fluidos de perforación base agua.
- El FR-021M modificado químicamente, proporcionan el control del filtrado necesario en lodos base agua pero los valores de pH se encuentran fuera de rango requerido por los sistemas de lodos evaluados.
- Las pruebas de envejecimiento realizada a los cuatros sistemas de lodos, demuestran que el FR-021M posee una excelente estabilidad térmica en las condiciones de pozo evaluada (Temperatura de 200 °F).
- El FR-021M modificado físicamente tiene la capacidad de proporcionar el control de filtrado necesario a condiciones de pozos, además de permitir la

formación de revoque liso, delgados de baja permeabilidad y alta resistencia compresiva a una temperatura de 200 °F.

- El uso del FR-021M como agente de control del filtrado en fluidos de perforación base agua no permite la formación de emulsiones de alta viscosidad al perforara arenas productoras que pueden originar reducciones drásticas de la productividad del pozo.

6. RECOMENDACIONES.

- En el sistema formiato se recomienda hacer aumento de la densidad para verificar el comportamiento de FR-021M en sistemas con densidades superiores a las 10 lpg.
- Optimizar las ecuaciones empíricas que permiten la modificación química para mejorar el valor del pH que se obtiene a través de esta ecuación.
- Evaluar el uso del FR-021M como viscosificante primario en lodos base agua.
- Evaluar el FR-021M modificado físicamente por el método de extrusión, como agente controlador del filtrado en lodos base agua y aceite.
- Realizar contaminación a los sistemas de lodos con sólidos inertes y reactivos, para verificar la capacidad del FR-021M de proporcionar el control de filtrado necesario.
- Realizar pruebas de envejecimiento a temperatura superiores a los 200° F para verificar la temperatura a la que el FR-021M se degrada.
- Realizar pruebas para establecer la tendencia a fermentación del producto y resistencia a la degradación bacteriana.
- Realizar prueba de contaminación con sólidos para verificar el comportamiento del FR-021M en lodos contaminados.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Lummus, J. L., Azar, J.J. **Drilling Fluids Optimización-A Practical Field Approach**, PennWell Publishing Company, Tulsa (Oklahoma), 1986, págs 35-55, 150-185.
2. Valera Hernán. **Selección del Tamaño de Partículas de Carbonato de calcio en fluidos del tipo Drill-In: Teoría y Aplicación**, Caracas, Mayo 1999, págs 5-10,15-22.
3. Tovar de Guillén, Leonor. **Diseño de Formulación un Fluido de Perforación Tipo Polimérico e Incidencia de la Contaminación con Sólidos de Perforación en este Sistema**, Caracas, Octubre, págs. 10-70.
4. Torre, Luis. **Variación de las Propiedades Reológicas en Fluidos Base Aceite al ser Contaminado con Sólidos de Perforación**, Caracas, Mayo 2000, págs 90-120.
5. MI Drilling de Venezuela C.A Drilling Fluids Engineering Manual. Capítulos 3-6-12.
6. Tecnología Aplicada de Lodos, IMCO Services, a Halliburton Company, Capítulo 3-4-7-9-14-16.
7. Darley, H. C. H., Gray, G. R. **Composition and Properties of Drilling and completion Fluids**, Gulf Publishing Company, Fifth edition, 1998.
8. Petrucci, R. H. **Química General**, Fondo Educativo Interamericano, S.A., New York. U.S.A., 1977, págs. 460-480,550-589.

9. Outmans, H. D. **Mechanics of Static and Dynamic Filtration in the Borehole**. SPE Journal 236-244, September 1963.
10. Chenevert, N. E. **Applied Drilling Engineering**. A. T Bourgoyne. SPE Text Book series Vol 2 Capítulos 4-5. 1991.
11. Peng, C and Penden, J. M **Predition of Filtration Under Dinamic Conditions**. SPE paper 23824. 1992.
12. Ponte, Gabriel. **Correlación de Esfuerzos de Corte, Diferencial de Presión y las Propiedades del Revoque de un Fluido de Perforación, con los Mecanismos de Remoción del mismo en presencia de un Lavador Químico**, Caracas, Octubre, 1999, págs. 11-32.
13. Mantilla, Sergio. **Modificación de Asfaltos y Lignitos, para ser usados como Agentes Adelgazantes y Controladores de Arcilla y Filtrado en Fluidos de Perforación Base Agua**, Caracas, Abril, 1995 págs 20-35.
14. Colonna, P., Doublier, J. **Extrusion Cooking and Dring of Wheat Starch**, 1984 págs 538-543.
15. Atwell, W., Hood, L., Linerback, D., **The Terminology and Metodologi Associated with Basic Starch**. Cereal Food world magazine, 1988.
16. Pérez, Elevina. **Caracterización de las Propiedades Funcionales de Almidones Nativos y Modificados**, Caracas, Junio, 1994.

17. Pérez, Elevina. **Evaluación del Comportamiento Reológico de Harina de Arroz, Maíz y Yuca Sometidas a Diferentes Tratamientos**, Caracas, Octubre, 1984.
18. Leach, H. **Gelatinization of Starch**, academic Press U.S.A 1965, Vol 1 págs 55-75
19. Marcanos, D., Cortes, L. **Fundamentos de Química Orgánica**, Ediciones Vicerretrado Académico-UCV (SADPRO), 1998, págs.305-314,412-583.
20. Fernandez, Fidel. **Medicción de Viscosidad y Densidad**, Ediciones Vicerretrado Académico-UCV, Paraguná, Junio, 1999, págs 10-70.

8. LISTA DE SIMBOLOS.

API :	Instituto Americano de Petróleo.
Cm :	Centímetro.
Cps :	Centipoise.
° C :	Grados Celsius.
Cc o cm^3	Centímetros cúbicos.
° F :	Grados Fahrenheit.
ft :	Pies.
GE o γ :	Gravedad Específica.
gr :	Gramos.
Gr/cc :	Gramo por cc.
H ₂ O :	Agua.
IR :	Índice Reológico.
KCL :	Cloruro de Potasio.
L ₁₀₀	Lectura @ 100 rpm.
L ₂₀₀	Lectura @ 200 rpm
Lb :	Libra.
lb/100ft ² :	Libras por cada 100 pies cuadrado
lpg :	Libra por galón.
lpb :	Libra por barril.
lpc :	Libras por pulgada cuadrada.

Min :	Minutos
' :	Minutos.
MF :	Modificación química.
M Q :	Modificación Física.
O/L :	Relación aceite-agua.
PC :	Punto cedente
pH :	Grado de Alcalinidad.
ppm :	Partes por millón
® :	Marca Registrada.
rpm :	Revoluciones por minutos
T :	Esfuerzo de corte.
" :	Segundos.
VP :	Viscosidad plástica
VA :	Viscosidad Aparente
V _f :	Volumen del filtrado
μ :	Viscosidad
ρ :	Densidad
ΔP :	Caída de Presión.
@ :	A condiciones.

9. GLOSARIO.

- **Barril:** unidad volumétrica de medición usada en la industria que equivale a 42 galones.
- **Barril equivalente:** unidad utilizada en el laboratorio para la evaluación o pruebas de lodos de perforación. Un gramo de aditivo, añadido a 350 cc de lodo, es equivalente a la adición de 1 lb de material a un barril (42 galones).
- **Carbonato de calcio:** una sal insoluble de calcio usada en lodos poliméricos como material densificante.
- **Centímetro cúbico o cc:** unidad del sistema métrico para la medición de volumen. Este es equivalente a un mililitro.
- **Concentración:** peso por unidad de volumen en un fluido se puede expresar en lb/bbl.
- **Darcy:** unidad de permeabilidad. Un medio poroso tiene la permeabilidad de un darcy cuando a una presión de una atmósfera sobre una muestra de 1 cm de longitud y 1cm cuadrado de área de sección se hace forzar un líquido de 1 cp de viscosidad a través de la muestra a una tasa de 1 cc por segundo.
- **Densidad:** medida de masa por unidad de volumen expresada en libras por galón (lb/gal), libras por pulgada cuadradas por cada 1000 pie de profundidad (lpc/1000 pies) y libras por pies cúbicos (lb/p³). La densidad es comúnmente referida como peso.

- **Diferencial de presión:** es la diferencia de presión entre la presión de la columna hidrostática de fluido y la presión de la formación o medio filtrante.
- **Espacio anular:** espacio entre la columna de perforación y la pared del pozo.
- **Erocionabilidad:** acción erosiva de un fluido sobre la superficie del revoque.
- **Filiación:** proceso de separación de los sólidos suspendidos de su líquido al forzar su paso a través de un medio poroso por acción de un diferencial de presión.
- **Filtrado:** fluido que ha pasado a través de un medio filtrante.
- **Fluido:** sustancia que tiene la capacidad de adoptar la forma del recipiente que lo contiene.
- **Fluido de perforación:** Fluido que circula a través de la tubería de perforación para desempeñar algunas funciones requeridas durante la perforación.
- **Inhibidor:** sustancia que es considera como contaminante de lodos de perforación, como sal o sulfato de calcio, que es agregan al fluido para retardar una reacción química.
- **Micrón:** unidad de longitud igual a la millonésima parte de un metro o una milésima parte de un centímetro.

- **Perdida de fluido:** medición del aumento del filtrado a través de la formación permeable cuando el fluido esta sujeto a una presión diferencial.
- **Permeabilidad:** propiedad que posee la roca de permitir el paso de fluido a través de sus canales interconectados.
- **Polímero:** sustancia formada por la unión de dos o más moléculas (monómeros).
- **Reología:** ciencia que se ocupa de la deformación y flujo de fluidos.
- **Revoque:** material sólido depositado sobre la pared del pozo, es el resultado de la filtración de la fase continua hacia la formación.

1. Tablas de Resultados

Tabla I.1 Propiedades del sistema Flo-Pro®.

Densidad lpb	9,7
L600	52
L300	42
V. P cps	10
P .C lb/100ft ²	32
V .A cps	21
Gel 10" lb/100ft ²	18
Gel 10' lb/100ft ²	22
% Agua	87
%Sólidos	13
pH	9,9
Filtrado API (estático) cc	5
Filtrado API (dinámico) cc	11

Tabla I.2 Comportamiento de la pérdida de filtrado para sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	Filtrado API 30' Nativo (cc)	Filtrado API 30' M Q(cc)	Filtrado API 30' M F(CC)
2	20	7	7,1
4	32	4,3	4,6
6	17	3,8	3

Tabla I.3 Comportamiento de la viscosidad plástica para sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	VP (Cps) Nativo	VP (Cps) M Q	VP (Cps) M F
2	8	13	12
4	12	19	13
6	9	17	18

Tabla I.4 Comportamiento del punto cedente para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	PC (lb/100ft²) Nativo	PC (lb/100ft²) M Q	PC (lb/100ft²) M F
2	25	36	26
4	35	45	34
6	27	41	33

Tabla I.5 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10" para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10"(lb/100ft²) Nativo	Gel 0"(lb/100ft²) M Q	Gel 10" lb/100ft²) M F
2	10	12	10
4	13	13	10
6	17	18	10

Tabla I.6 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10' para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10' (lb/100ft ²) Nativo	Gel 10' lb/100ft ²) M Q	Gel 10' lb/100ft ²) M F
2	18	20	16
4	19	18	15
6	19	21	12

Tabla I.7 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	VA (Cps) Nativo	VA (Cps) M Q	VA (Cps) M F
2	20	31	25
4	29	41	30
6	22	38	34

Tabla I.8 Comportamiento del porcentaje de agua y sedimentos para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	Nativo %		M Q %		M F %	
	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos
2	87	13	87	13	87	13
4	87	13	86	14	87	13
6	86	14	86	14	87	13

Tabla I.9 Comportamiento del pH para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	pH Nativo	pH M Q	pH M F
2	9,5	13	9,6
4	9,6	12,5	9,5
6	9,5	13	9,5

Tabla I.10 Comportamiento del índice reológico para el sistema Flo-Pro.

Concentración (lb/bbl)	IR Nativo	IR M Q	IR M F
2	3,125	2,76	2,16
4	2,9	2,36	2,6
6	3	2,41	1,8

Tabla I.11 Propiedades del sistema Poly Plus®.

Densidad lb/bbl	9,6
L600	64
L300	43
V. P cps	21
P .C lb/100ft ²	22
V .A cps	31
Gel 10" lb/100ft ²	3
Gel 10' lb/100ft ²	6
% Agua	83
%Sólidos	17
pH	9,7
Filtrado API (estático) cc	5,5
Filtrado ATAP(dinámico) cc	12

.Tabla I.12 Comportamiento de la pérdida de filtrado para sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	Filtrado API30' Nativo (cc)	Filtrado API 30' M Q(cc)	Filtrado API 30' M F(cc)
3	7,3	4,6	4,5
6	6,5	3,6	3
9	7,2	3	2,5
12	5,1	2,5	1,5

. Tabla I.13 Comportamiento de la viscosidad plástica para sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	VP (Cps) Nativo	VP (Cps) M Q	VP (Cps) M F
3	19	23	23
6	20	32	34
9	22	44	50
12	22	62	74

Tabla I.14 Comportamiento del punto cedente para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	PC (lb/100ft²) Nativo	PC (lb/100ft²) M Q	PC (lb/100ft²) M F
3	29	17	34
6	30	30	47
9	32	37	59
12	37	69	87

Tabla I.15 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10" para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10" (lb/100ft²) Nativo	Gel 10" (lb/100ft²) M Q	Gel 10" (lb/100ft²) M F
3	4	3	5
6	3	6	5
9	4	11	7
12	6	12	11

Tabla I.16 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10' para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10' (lb/100ft²) Nativo	Gel 10' (lb/100ft²) M Q	Gel 10'(lb/100ft²) M F
3	7	9	8
6	9	14	9
9	12	20	10
12	10	29	15

Tabla I.17 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	VA (Cps) Nativo	VA (Cps) M Q	VA (Cps) M F
3	33	32	40
6	36	47	57
9	38	62	79
12	40	96	117

Tabla I.18 Comportamiento del porcentaje de agua y sedimento para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	Nativo %		M Q %		M F %	
	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos
2	82	18	83	17	83	17
4	82	18	83	17	83	17
6	82	18	83	17	82	18

Tabla I.19 Comportamiento del pH para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	pH Nativo	pH M Q	pH M F
3	9	11.8	9.5
6	9.3	12.5	9.4
9	9.5	13	9.5
12	9.5	13	9.5

Tabla I.20 Comportamiento del índice reológico para el sistema Poly Plus.

Concentración (lb/bbl)	IR Nativo	IR M Q	IR M F
3	1,53	0,74	1,48
6	1,5	0,94	1,38
9	1,45	0,84	1,19
12	1,68	1,11	1,18

Tabal I.21 Sistema Poly Plus envejecido (12 lb/bbl).

Propiedades	Antes de Envejecido	Envejecido
Densidad lpg	10.1	9
V.P (cps)	22	40
P.C (lb/100ft ²)	37	84
Gel 10" (lb/100ft ²)	5	18
Gel 10' (lb/100ft ²)	6	25
Filtrado API 30' (cc)	5.1	15

Tabla I.22 Propiedades del sistema Formiato®.

Densidad lb/bbl	9,5
V. P cps	11
P .C lb/100ft ²	33
V .A cps	30
Gel 10" lb/100ft ²	13
Gel 10' lb/100ft ²	20
Índice Reológico	3
% Agua	85
%Sólidos	15
pH	9.4
Filtrado API (estático) cc	3
Filtrado API (dinámico) cc	10

Tabla I.23 Comportamiento de la pérdida de filtrado para sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	Filtrado API 30' Nativo (cc)	Filtrado API30' M Q(cc)	Filtrado API 30' M F(CC)
2	8	5,2	3,5
4	11,1	3,5	3,5
6	11	2,5	2,5

Tabla I.23 Comportamiento de la viscosidad plástica para sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	VP (Cps) Nativo	VP (Cps) M Q	VP (Cps) M F
2	8	10	11
4	10	12	15
6	11	12	20

Tabla I.24 Comportamiento del punto cedente para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	PC (lb/100ft²) Nativo	PC (lb/100ft²) M Q	PC (lb/100ft²) M F
2	20	23	25
4	21	25	26
6	21	28	31

Tabla I.25 Comportamiento de la fuerza de Gel a los 10" para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10" (lb/100ft²) Nativo	Gel 10" (lb/100ft²) M Q	Gel 10" (lb/100ft²) M F
2	10	10	10
4	10	10	7
6	11	8	8

Tabla I.26 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10' para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10' lb/100ft²) Nativo	Gel 10' (lb/100ft²) M Q	Gel 10' (lb/100ft²) M F
2	14	14	16
4	14	15	12
6	16	14	12

Tabla I.27 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	VA (Cps) Nativo	VA (Cps) M Q	VA (Cps) M F
2	18	22	23
4	20	24	28
6	22	26	35

Tabla I.28 Comportamiento del porcentaje de agua y sedimentos para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	Nativo %		M Q %		M F %	
	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos
2	85	15	85	15	85	15
4	85	15	85	15	85	15
6	84	16	85	15	85	15

Tabla I.29 Comportamiento del pH para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	pH Nativo	pH M Q	pH M F
2	9,5	11,7	9.5
4	9,4	12	9.5
6	9,4	12,5	9.6

Tabla I.30 Comportamiento del Índice reológico para el sistema Formiato.

Concentración (lb/bbl)	IR Nativo	IR M Q	IR M F
2	2,5	2,3	2,3
4	2,1	2,1	1,73
6	1,90	2,33	1,55

Tabla I.31 Propiedades del sistema LLT comercial.

.Densidad lb/bbl	10,1
V. P cps	13
P .C lb/100ft ²	44
V .A cps	35
Gel 10"lb/100ft ²	13
Gel 10' lb/100ft ²	18
Índice Reológico	3,4
% Agua	87
%Sólidos	13
pH	9.4
Filtrado API (estático) cc	5
Filtrado API (dinámico) cc	10

Tabla I 32 Comportamiento de la pérdida de filtrado para sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	Filtrado API 30' Nativo (cc)	Filtrado API 30' M Q(cc)	Filtrado API 30' M F(CC)
2	16	6	4,5
4	15	4	3,8
6	12,5	2,5	2,5

Tabla I.33 Comportamiento de la viscosidad plástica para sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	VP (Cps) Nativo	VP (Cps) M Q	VP (Cps) M F
2	11	20	17
4	14	21	26
6	14	30	32

Tabla I.34 Comportamiento del punto cedente para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	PC (lb/100ft²) Nativo	PC (lb/100ft²) M Q	PC (lb/100ft²) M F
2	29	43	41
4	31	34	41
6	34	54	48

Tabla I 35 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10" para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10"(lb/100ft²) Nativo	Gel 10"(lb/100ft²) M Q	Gel 10" (lb/100ft²) M F
2	9	11	8
4	12	13	6
6	13	11	6

Tabla I.36 Comportamiento de la fuerza de gel a los 10' para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	Gel 10' (lb/100ft²) Nativo	Gel 10' (lb/100ft²) M Q	Gel 10' (lb/100ft²) M F
2	14	18	12
4	20	19	12
6	22	18	12

Tabla I.37 Comportamiento de la viscosidad aparente para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	VA (Cps) Nativo	VA (Cps) M Q	VA (Cps) M F
2	25	42	38
4	29	38	47
6	31	56	56

Tabla I.38 Comportamiento del porcentaje de agua y sedimentos para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	Nativo %		M Q %		M F %	
	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos	Agua	Sólidos
2	86	14	88	12	87	13
4	87	13	88	12	87	13
6	87	13	88	12	85	15

Tabla I.39 Comportamiento del pH para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	pH Nativo	pH M Q	pH M F
2	9,4	13	9.3
4	9,5	12,9	9.4
6	9,4	12,5	9.5

Tabla I.40 Comportamiento del índice reológico para el sistema LLT.

Concentración (lb/bbl)	IR Nativo	IR M Q	IR M F
2	2,63	2,15	2,4
4	2,21	1,62	1,58
6	2,43	1,8	1,5

2.1 Formulación de los fluidos de perforación.

La formulación de los fluidos de perforación debe cumplir con un “balance de masas”, el cual debe estar en función de 1 bbl como volumen total del fluido. En condiciones de laboratorio, 1 bbl en campo de cualquier fluido equivale a 350 cc del mismo fluido.

Según la ecuación II.1 se tiene:

$$(V_1 \cdot \rho_1) + (V_2 \cdot \rho_2) + (V_3 \cdot \rho_3) + \dots + (V_n \cdot \rho_n) = V_f \cdot \rho_f \quad \text{Ecuación II.1}$$

Pero se sabe que:

$$\text{Gr.Espc.} = (\rho_{\text{elemento}}) / (\rho_{\text{agua}}). \quad \text{Ecuación II.2}$$

Donde $(\rho_{\text{agua}}) = 1 \text{ gr/cc}$.

$$(\rho_{\text{elemento}}) = (\text{Gr.Espc}) \cdot (\rho_{\text{agua}})$$

$$V = m / (\text{Gr.Espc} \cdot \rho_{\text{agua}}) \quad \text{Ecuación II.3}$$

$$\rho_{\text{Xantano C}} = 1.5 \cdot 8.33 \text{ lpg} = 12.50 \text{ lpg}$$

$$V(\text{bbl}) \text{ Xantano C} = (1.7 / 12.50 \cdot 42) = 0.0032 \text{ bbl}$$

$$V(\text{cc}) \text{ Xantano C} = 0.0032 \cdot 350 = 1.134 \text{ cc}$$

$$V_{\text{CaCO}_3} = ((\rho_{\text{agua}} - \rho_{\text{odo}}) / (\rho_{\text{agua}} - \rho_{\text{CaCO}_3})) \cdot V_f \quad \text{Ecuación II.4}$$

Donde la $\rho_{\text{CaCO}_3} = 23.234 \text{ lpg}$

$$V_{\text{CaCO}_3} = ((8.33 - 10) / (8.33 - 23.234)) \cdot 1 \text{ cc} = 0.111.$$

$$M \text{ CaCO}_3 = 0.111 \cdot 23.234 \cdot 42 = 109.1 \text{ lb.}$$

Tabla II.1 Volúmenes y masas de los aditivos del fluido de perforación LLT.

Componente	Masa (lb)	Volumen(bbl)	Volumen(cc)
Inhibidor de Arcillas	12.64	0.0180	6.291
Viscosificante	1.7	0.0032	1.134
Encapsulante	0.3	0.0006	0.222
FR-021M	4	0.0076	2.668
Agente densificante	109.1	0.1114	38.980
Agua	300.705		49.295
	428.44521		300.705

2.2 Densidad teórica del lodo.

$$V = m / (\text{Gr.Espc} * \rho_{\text{agua}})$$

Ecuación II.3

$$\rho_{\text{lodo}} = (\text{Masa} / \text{Volumen})_{\text{lodo}}$$

$$\rho_{\text{lodo}} = 428.44 / 350 * 8.33$$

$$\rho_{\text{lodo}} = 10.19 \text{ lpg}$$

2.3 Viscosidad Plástica y Punto Cedente.

El siguiente cálculo corresponde a la sistema Flo-Pro comercial los datos fueron tomados de las tabla de resultados apéndice 1.

$$L600 = 52$$

$$VP = L600 - L300$$

$$L300 = 42$$

$$VP = 52 - 42$$

$$VP = 10 \text{ cps}$$

$$PC = L300 - VP$$

$$PC = 42 - 10$$

$$PC = 32 \text{ lb}/100\text{ft}^2$$

2.4 Cantidad de hidróxido de sodio necesaria para la modificación química.

Según la ecuación 3.1.

$$C = \frac{0.75 * (B) + 1.6 * (A)}{100} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

En donde:

C. Peso (grs.) de soda cáustica adicionada.

A: Peso (grs.) de FR-021M base seca.

B: peso (grs.) de agua.

0.75: % de soda cáustica mínima.

Para una base seca de FR-021M de 1 gr y 100 grs de agua se tiene:

$$C = \frac{0.75 * (100) + 1.6 * (1)}{100} \quad C = 0.766 \text{ grs de soda cáustica.}$$

3. Descripción y uso de los Equipos

Para la preparación y evaluación de los lodos de perforación de los distintos sistemas comerciales utilizados en este trabajo especial de grado, se utilizaron equipos con fines específicos, que se encuentran en el laboratorio de fluidos de perforación y cementación de la escuela de petróleo de la Universidad Central de Venezuela.

3.1. Balanza electrónica.

Con este equipo se pesan todos los materiales que se le agregan a los lodos de perforación, esta balanza posee una gran sensibilidad; de hasta 0,001 (Ver figura III.1).



Figura III.1 Balanza electrónica.

3.2 Determinación de la densidad del fluido.

Para determinar la densidad de los fluidos de perforación se utilizó la balanza de

lodo. Este tipo de balanza es la más utilizada para la medición de la densidad de los lodos de perforación. La cual nos permite realizar mediciones con errores de precisión entre 0.1 lpg y 0.5 lpg. Como se aprecia en la figura III.2 la balanza consta de:

- Una base de soporte.
- Un recipiente con cubierta.
- Un brazo graduado con caballete móvil.
- Un punto de apoyo con una burbuja de nivel.
- El procedimientos seguido para la determinar la densidad de los fluidos de perforación es:
 - Colocar el estuche que contiene la balanza en una superficie nivelada.
 - Asegurarse de que tanto la balanza como su cubierta estén limpias y secas.
 - Llenar el recipiente de la balanza hasta el tope con la muestra del fluido de perforación y lentamente asentar la cubierta con un movimiento giratorio firme.
 - Colocar la balanza sobre el soporte. El punto de apoyo en forma de cuchilla encaja en la ranura de la base y el caballete móvil se utiliza para equilibrar el brazo. El brazo está en equilibrio cuando la burbuja está en el centro del nivel.
 - La densidad de la muestra se lee al borde del caballete más cercano a la base del soporte, utilizando la escala de la balanza en lbs/gal.

- La balanza de lodo debe ser calibrada periódicamente con agua dulce para asegurar su precisión. El agua dulce debe pesar 8.33 lb/gal o 62.3 lb/pc.



Figura No III.2 Balanza para lodos de perforación

3.3 Determinación del porcentaje de sólidos

Para determinar la cantidad de sólidos y de líquidos en los fluidos de perforación se utilizó la retorta (Ver figura III.3). En la retorta, una muestra del lodo se coloca en una cámara de acero de 10 cc de volumen y se calienta, vaporizando así los componentes líquidos del fluido. Los vapores pasan a través de una unidad de condensación y el líquido es recolectado en un cilindro graduado. El volumen del líquido se mide en porcentaje y todos los sólidos se determinan por diferencia.

El procedimiento de la prueba es el siguiente:

- Limpiar y secar la cámara de la retorta antes y después de cada uso. Asegurarse que el interior de la cámara permanezca uniforme.
- Obtener una muestra del fluido, recientemente agitado.
- Depositar 10 cc de muestra del lodo en la cámara de la retorta.
- Colocar la tapa sobre la cámara y limpiar el exceso de lodo que sale a través del orificio.
- Colocar una laminilla de metal en la parte superior de la retorta y luego acoplar a la unidad de condensación.
- La cámara de la retorta debe quedar dentro de la unidad de calentamiento.
- Colocar un cilindro graduado bajo la espiga de la unidad de condensación y conectar la retorta.

- Dejar que la retorta caliente hasta tanto la condensación cese y luego permitir 10 minutos de calentamiento adicional.
- Leer el volumen de líquido (aceite y agua) recolectado en el cilindro graduado.
- El volumen de sólidos presente en el lodo se determina por diferencia.



Figura III.3 Componentes de la retorta

3.4 Determinación de las Propiedades Reológicas de los Fluidos de Perforación.

La viscosidad plástica, el punto de cedencia y la resistencia de gel de los fluidos de perforación se determinan con el viscosímetro rotatorio cilíndrico. En este aparato, un cilindro exterior rota concéntricamente alrededor de un cilindro interior o bobina, la cual esta suspendida de un resorte de torsión. El espacio anular entre la bobina y el cilindro exterior es muy angosto, alrededor de 1mm.

La muestra de lodo es contenida en el espacio anular y el cilindro exterior gira a una velocidad constante lo cual produce cierta torsión sobre el cilindro exterior.

Existen variados modelos de viscosímetro rotatorio pero el usado en este trabajo es el de 6 velocidades (FANN 35). 600, 300, 200, 100, 6 y 3 r.p.m.

El siguiente es el procedimiento para determinar viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto de cedencia y resistencia de gel de los fluidos de perforación base agua usando un viscosímetro de 6 velocidades.

- Obtener una muestra de lodo.
- Colocar la copa de calentamiento del viscosímetro en 120 °F.
- Llenar la copa de calentamiento con muestra de lodo y luego sumergir la camisa rotatoria (cilindro exterior) del viscosímetro en la muestra de lodo hasta la marca indicada (agujeros del cilindro).
- Con la camisa rotando a 600 r.p.m., registrar la lectura del dial, una vez se ha estabilizado.

- Cambiar la velocidad de rotación a 300 r.p.m., y registrar la lectura de 600 r.p.m. por dos.
- La viscosidad plástica en centipoes, se determina al substraer la lectura de 300 r.p.m. de la lectura de 600 r.p.m.
- El punto de cedencia en $\text{lb}/100 \text{ ft}^2$ es igual a la lectura de 300 r.p.m. menos la viscosidad plástica.

Para determinar la resistencia del gel del fluido en $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$, se debe dejar en reposo el lodo por espacio de 10 segundos, luego se registra la lectura del dial a 3 r.p.m. Ese valor se reporta como resistencia de gel a los 10 segundos. El valor de resistencia de gel del lodo a los 10 minutos se determina dejando en reposo al fluido por ese tiempo y luego se registra la lectura del dial a 3 r.p.m. En el interior de la copa de calentamiento se coloca la muestra de fluido de perforación a ser probado; esta copa consta de un termostato que mantiene constante la temperatura del lodo durante toda la prueba.



Figura III.4 Copa de calentamiento de viscosímetro FANN 35.



Figura III.5 Viscosímetro FANN 35 de 6 velocidades.

3.5 Prueba de Envejecimiento

Para la investigación del desempeño de los fluidos base agua contaminados, se diseñó simular las condiciones de pozo lo más aproximadamente posible. Para ello se sometió a los lodos a la prueba de envejecimiento dinámico usando para ello un horno de envejecimiento para altas temperaturas. Este equipo es utilizado para simular las condiciones críticas del fluido de perforación, el cual se asemeja cuando se hace circular el lodo a través del pozo. Esta constituido principalmente por cuatros rodillos rotatorios uno al lado del otro. El cual se enciende desde afuera del horno, por un interruptor, y en el mismo tablero de control se localiza otro interruptor para el encendido del horno y regulador de temperatura el se encuentra en un rango de 150 a 550 F. También se encuentra una celda para retener el lodo a simular.

Procedimiento de prueba:

- Conseguir una muestra del fluido de perforación.
- Abra la celda de envejecimiento removiendo la tapa exterior y la tapa interior.
- Coloque la cantidad apropiada de muestra en la celda de envejecimiento.
- Coloque la tapa interior sobre la celda de envejecimiento asegurándose que esté apoyada correctamente (inspecciones el anillo de teflón y reemplácelo de ser necesario).
- Coloque la tapa exterior sobre la celda de envejecimiento y ajústela a mano.

- Ajuste los tornillos fuertemente con una llave Allen.
- Inserte el vástago de la válvula dentro del hueco roscado en el centro de la tapa interior y ajústelo con una llave ajustable.
- Coloque el regulador de la celda del filtro AP-AT sobre el vástago de la válvula.
- Asegure el regulador sobre el vástago de la válvula insertando el pasador de retención.
- Cierre el tornillo en T sobre el regulador hasta que se obtenga la presión apropiada de acuerdo a la tabla.
- Abra el vástago hasta la mitad para presurizar la celda.
- Cierre el vástago de la válvula cuando se obtenga la presión requerida.
- Abra el tornillo en T sobre el regulador hasta que gire fácilmente.
- Abra la válvula de alivio de presión.
- Remueva el pasador de retención.
- Remueva el regulador de presión del vástago de la válvula.
- Prenda el horno de envejecimiento y póngalo a la temperatura deseada (no girar los rodillos).

- Cuando el horno esté tibio, coloque la celda de envejecimiento conteniendo la mezcla presurizada y dentro del mismo (haga girar los rodillos).
- Envejezca por un período de 16 horas.
- Remueva la celda y permita que se enfríe.
- Coloque una tela u otro material sobre la abertura del vástago de la válvula.
- Abra el vástago de la válvula lo suficiente para aliviar toda la presión dentro de la celda. No intente abrir el vástago de la válvula para aliviar la presión si la temperatura de la celda está por encima de 200 °F.
- Afloje lentamente el conjunto de tornillos sobre la tapa de la celda.
- Remueva la tapa exterior.
- Remueva la tapa interior. Observe la condición del lodo.
- El volumen y la presión del lodo recomendada para el envejecimiento a alta temperatura se muestra en la tabla 10.1.



Figura III.6 Celdas de envejecimiento dinámico



Figura III.7 Horno de envejecimiento dinámico.

3.6 Mezcladores y Multimezcladores.

Los mezcladores de tres velocidades Hamilton Beach y los multimezcladores de 5 ejes se utilizan para las pruebas de mezclado en le laboratorio de fluido de perforación. Ambos mezcladores éstas para 115 o 230 voltios, con las cuchillas provistas por cada fabricante.

El multimezclador utilizado es de 115 voltios y los 5 ejes tienen agitadores inferiores ondulados que operan a una velocidad de 11500 r.p.m sin carga. Adicionalmente se uso con este equipo un vaso para el mezclado del lodo.



Figura III.8 Agitador multimixer.

3.7 pH-metro digital.

Este equipo tiene forma de tester y se utiliza para caracterizar el pH del lodo de perforación. Propiedad importante, ya que esta nos indica si el lodo presenta un ambiente básico, ácido, o neutro. El lodo debe presentar características básicas pero no muy fuertes porque corroe la tubería de perforación, y puede degradar algunos polímeros utilizados en los lodos, por lo general estos lodos deben estar en un rango de pH entre 9 y 10.

El medidor de pH contiene un sistema de electrodo construido de vidrio especial en el cual un electrolito adecuado y electrodo están sellados y un electrodo de referencia, el cual es una célula de calomel saturada. Una solución de cloruro de potasio está contenida en un tubo que rodea a la célula de calomel y a través de esta, se establece una conexión eléctrica con el lodo.

El modelo del laboratorio de este equipo es un medidor de alta calidad, tipo banco, diseñado para medir la escala completa del pH (0-14). Es un equipo que trabaja en un amplio rango de milivoltios (0-1999) y es fácilmente convertible de 115 a 230 voltios AC, si se usa un interruptor instalado convenientemente. Esta unidad provee una precisión de lectura de 0.01 en el pH.

El rango de compensación automático de lectura (ATC) va de 0 a 100 °C. El probador de ATC se conecta en el panel frontal del medidor y automáticamente ajusta la lectura a la medida de la variación de la temperatura en el fluido.

El procedimiento seguido para la determinar el pH de los fluidos de perforación es:

- Encender el equipo.
- Calibrar el medidor de pH con una solución adecuada.

- Lavar el electrodo cuidadosamente con agua destilada y secarlo.
- Tomar una muestra de lodo e introducir el electrodo y girar la muestra.
- Medir el pH de la muestra siguiendo las instrucciones provistas con la unidad, esperar que se estabilice el indicador y registrar el pH.



Figura III.9 Medidor de pH.

3.8 Filtrado Estático Estándar API.

Este equipo de filtrado recomendado en las normas API, permite evaluar las pérdidas de filtrados en los fluidos de perforación en condiciones estáticas a temperatura ambiente y a presiones bajas. Consta fundamentalmente de un cuerpo cilíndrico con una celda construida de materiales altamente resistentes a soluciones alcalinas, para contener el lodo, contiene un medio para sellar la celda o cámara en orden de aplicar presión con nitrógeno, dispone de un medio apropiado para colocar el papel filtro. Por debajo de este se encuentra un tubo de drenaje para descargar el filtrado, también reguladores de presión que están conectados a las prensas.

Para evaluar la pérdida de filtrado estático de las distintas formulaciones de los lodos en estudio, se utilizó el equipo estándar API a temperatura ambiente siguiendo el siguiente procedimiento:

- Obtener una muestra de lodo previamente agitada
- Asegurarse de que todas las piezas del filtro prensa estén limpias y secas y que las empacaduras estén en buen estado.
- Colocarle a la tapa inferior la rejilla de acero, el papel filtro y la empacadura de goma y terminar de armar la cámara.
- Llenar de lodo la celda aproximadamente un cuarto de pulgada desde el asiento de la empacadura inferior y colocar la cámara en el soporte o base del filtro prensa, y colocarle la tapa superior y ajustarla con el tornillo en forma de T.

- Colocar un cilindro graduado de 25 cc bajo el tubo de drenaje para recibir el filtrado.
- Cerrar la válvula de seguridad y ajustar el regulador para una presión de 100 psi esta presión debe ser aplicada en un periodo de 30 minutos.
- Después de los 30 minutos, cortar la presión y abrir la válvula de seguridad y asegurarse que toda la presión es liberada.
- El volumen de filtrado se registra en cc como filtrado API.
- Remover la cámara de su soporte desechar el lodo, desarmar la cámara y preservar el papel filtro con el revoque y por ultimo lavar todas las piezas.

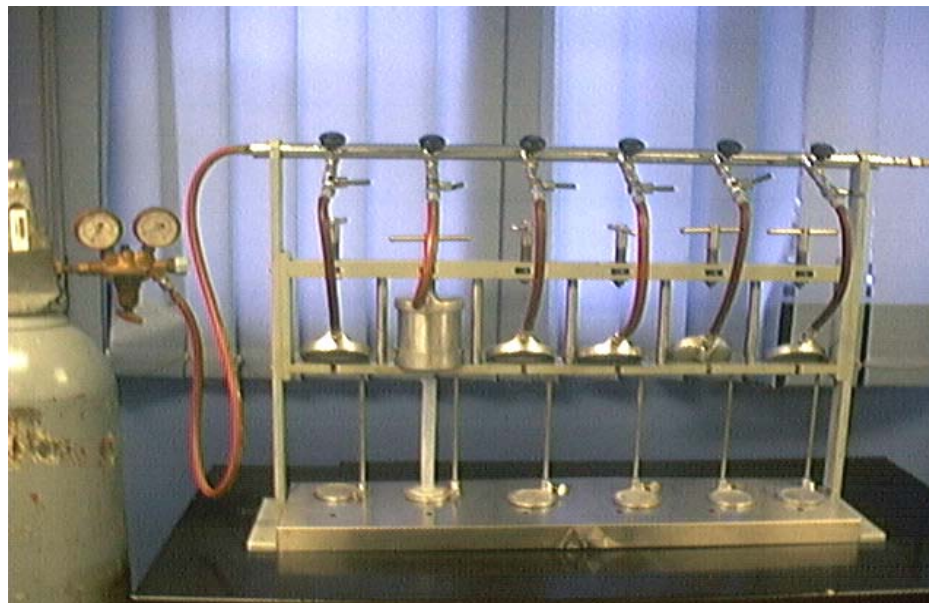


Figura III.10 Equipo de filtrado estático API.

3.9 Equipo de filtrado dinámico.



Figura III.11.Equipo OFITE 170-50 HPHT.

La prueba de pérdida de filtrado a alta presión y alta temperatura se realiza a una temperatura de 300 F y una presión diferencial de 500 Lpc. En este caso se hace circular un flujo de agua y se coloca una velocidad de 200 RPM, además presenta la ventaja de que el fluido puede circular en ambos sentidos (sentido de las manecillas de un reloj y en sentido contrario a las manecillas de un reloj).

Este equipo está constituido por:

- Camisa de calentamiento, montada sobre una base.

- Cámara para la muestra, construida para soportar presiones de trabajo de 1000 lpc (área de filtración de 3,5 pulgadas cuadradas).
- Termómetro (lecturas hasta 500 F).
- Eje.
- Manguera de circulación.
- Regulador para conjunto superior con la habilidad para regular 1000 lpc desde cualquier fuente de presión.
- Cámara presurizada receptora del conjunto interior diseñada para soportar contrapresiones de trabajo de por lo menos 500 lpc.
- Probeta graduada para recibir el filtrado.

NOTA: debe tenerse extrema precaución al efectuarse la prueba y todo el equipo debe mantenerse en buenas condiciones de trabajo.

El procedimiento es el siguiente:

1. Conectar la camisa de calentamiento al voltaje correcto para la unidad. Colocar el termómetro en el receptáculo correspondiente en el exterior de la camisa.
2. Calentar la camisa a 10 F por encima de la temperatura ajustando el termostato. Revisar todos los empaques y anillos y reemplazar los que lo necesiten.

3. Agitar la muestra de lodo durante 10 minutos y transferirla a la cámara (250 cc aproximadamente), asegurándose que la válvula interior esté cerrada. La cámara no debe llenarse en exceso de $\frac{1}{2}$ pulgada de la pestaña en el borde superior.
4. Colocar un papel filtro o cerámica sobre la pestaña.
5. Se coloca el eje previamente conectado al flujo de agua y asegurar los tornillos Allen. Tener cuidado que ambas válvulas estén cerradas y luego colocar la cámara en la camisa de calentamiento.
6. Colocar la unidad de presión sobre la válvula superior y asegurarla colocando el perno correspondiente.
7. Colocar la unidad receptora de baja presión sobre la válvula inferior y asegurarla colocando el perno correspondiente.
8. Al eje se le coloca la correa al motor del equipo (ajustar en la parte lateral del equipo).
9. Aplicar 100 lpc a ambas unidades de presión y abrir la válvula superior $\frac{1}{4}$ de vuelta en la dirección contraria a las manecillas de un reloj.
10. Al alcanzar la temperatura de prueba, aumentar la presión de la unidad superior a 600 lpc y abrir la válvula inferior, $\frac{1}{4}$ de vuelta en dirección contraria a las manecillas del un reloj, para comenzar la filtración.
11. Se prende el equipo (RUN) y se le coloca la velocidad de 200 RPM.
12. Se regula el termostato hasta que la camisa de calentamiento tenga 300 F.

13. El filtrado debe recolectarse en una probeta graduada por un periodo de 30 minutos.
14. Mientras la prueba ocurre, la temperatura de prueba debe mantenerse dentro de un rango de ± 5 °F. El filtrado debe drenarse cuidadosamente de la cámara receptora cuando la contrapresión excede 100 lpc.
15. Después de 30 minutos. Cerrar ambas válvulas y aflojar el tornillo del regulador de presión. Recolectar todo el filtrado y agotar toda la presión de la unidad interior y luego agotar la presión del regulador superior. Remover la cámara de la camisa de calentamiento y enfriarla a temperatura ambiente en posición vertical. (la cámara contiene aún 500 lpc aproximadamente).
16. Se mide la cantidad de fluido recolectado en cc y duplicar el resultado.
17. Dejar enfriar la cámara y luego agotar la presión cuidadosamente a través de la válvula opuesta al papel filtro. Cerrar esa válvula y luego abrir la otra en el extremo opuesto para agotar cualquier presión que aún exista. Desarmar la cámara y desechar la muestra de lodo.
18. Medir el espesor del revoque y reportar las características del mismo.

3.10 Baño de Maria.



Figura III.12 Baño de Maria.

El equipo es diseñado para mantener la temperatura de la prueba constante. Consiste en un recipiente de 50 por 25 cm y un termómetro para medir la temperatura a la que se necesita la prueba.

El procedimiento para usar el equipo es fácil, solo requiere llenar el recipiente con agua hasta la marca indicada y encender el equipo a través del interruptor.

Esperar que el agua llegué a la temperatura de la prueba verificar el volumen de agua para reponer el agua que se evapora.

4. Costos.

Tabla IV.1 Costos del sistema Flo-Pro ®.

Aditivo	\$/lb	Comercial (\$)
Agua	-	-
Viscosificante	8,83	14,13-
Inhibidor de arcillas	0,51	2,55
Controlador de Filtrado	2,09	4,18
Densificante	0,45	47,22
Controlador del pH	0,63	0.67
Total		68,74 \$/bbl

Tabla IV.2 Costos del sistema Flo-Pro con el uso del FR-021M (4 lpb).

Aditivo	\$/lb (\$)	Nativo (\$)	M F (\$)	M Q (\$)
Agua	-	-	-	-
Viscosificante	8,83	14,13	14,13	14,13
Inhibidor de arcillas	0,51	2,55	2,55	2,55
Controlador de Filtrado	0,58	1,24	2,32	2,32
Densificante	0,45	47,22	47,22	47,22
Controlador del pH	0,63	0.67	0.67	0.67
Total		65,80 (\$/bbl)	66,88 (\$/bbl)	66,88 (\$/bbl)

Tabla IV.3. Costos del sistema Flo-Pro formulado con FR-021M.

Concentración (lb/bbl)	Nativo (\$/bbl)	M Q (\$/bbl)	M F (\$/bbl)
2	65,18	65,72	65,72
4	65,80	66,88	66,88
6	66,42	68,04	68,04

Tabla IV.4 Costos del sistema Poly Plus ®.

Aditivo	(\$/lb)	Comercial (\$)
Agua	-	-
Viscosificante	0,1	0,7
Agente Encapsulante	2,97	2,97
Densificante	0,45	45,45
Controlador del pH	0,63	0,67
Controlador de Filtrado	0,81	1,62
Regulador Reológico	0,8	0,8
Total		52,21 (\$/bbl)

Tabla IV.5. Costos del sistema Poly Plus con el uso del FR-021M (3 lpb).

Aditivo	(\$/lb)	Nativo (\$)	M F (\$)	M Q (\$)
Agua	-	-	-	-
Viscosificante	0,1	0,7	0,7	0,7
Agente Encapsulante	2,97	2,97	2,97	2,97
Densificante	0,45	45,45	45,45	45,45
Controlador del pH	0,63	0,67	0,67	0,67
Controlador de Filtrado	0,58	0,93	1,74	1,74
Total		50,72 (\$/bbl)	51,53 (\$/bbl)	51,53 (\$/bbl)

Tabla IV.6. Costos del sistema Poly Plus formulado con FR-021M.

Concentración (lb/bbl)	Nativo (\$/bbl)	M Q (\$/bbl)	M F (\$/bbl)
3	50,05	50,86	50,86
6	50,72	51,53	51,53
9	51,91	54,34	54,34

Tabla IV.7 Costos del sistema Formiato®.

Aditivo	(\$/lb)	Comercial (\$)
Agua	-	-
Densificante	1,5	66
Viscosificante	8,83	13,25
Agente de Puenteo	0,45	16,34
Controlador del pH	0,63	0,67
Bactericida	0,2	0,213
Controlador de Filtrado	2,93	11,72
Total		108,19 (\$/bbl)

Tabla IV.8. Costos del sistema Formiato con el uso del FR-021M (2 lpb).

Aditivo	\$/lb (\$)	Nativo (\$)	M F (\$)	M Q (\$)
Agua	-	-	-	-
Densificante	1,5-	66	66	66
Viscosificante	8,83	13,25	13,25	13,25
Agente de Puenteo	0,45	16,34	16,34	16,34
Controlador del pH	0,63	0,67	0,67	0,67
Bactericida	0,2	0,213	0,213	0,213
Controlador de Filtrado	0,58/0,31	0,62	1,16	1,16
Total		97,07 (\$/bbl)	97,63 (\$/bbl)	97,63 (\$/bbl)

Tabla IV.9 Costos del sistema Formiato formulado con FR-021M.

Concentración (lb/bbl)	Nativo (\$/bbl)	M Q (\$/bbl)	M F (\$/bbl)
2	97,09	97,63	97,63
4	97,71	98,79	98,79
6	98,33	99,95	99,95

.Tabla IV.10 Costos del sistema LLT.

Aditivo	(\$/lb)	Comercial (\$)
Agua	-	-
Viscosificante	6,48	11,02
Controlador del pH	0,63	0,67
Inhibidor de arcillas	0,51	6,45
Regulador Reología	2,97	0,89
Controlador de Filtrado	0,8	3,2
Agente densificante	0,45	49,53
Total		71,76 (\$/bbl)

Tabla IV.11. Costos del sistema LLT con el uso del FR-021M (4 lpb).

Aditivo	\$/lb	Nativo (\$)	M F (\$)	M Q (\$)
Agua	-	-	-	-
Viscosificante	6,48	11,02	11,02	11,02
Controlador del pH	0,63	0,67	0,67	0,67
Inhibidor de arcillas	0,51	6,45	6,45	6,45
Regulador Reología	2,97	0,89	0,89	0,89
Controlador de Filtrado	0.31/0.58	1,24	2,32	2,32
Agente densificante	0,45	49,53	49,53	49,53
Total		69,80 (\$bbl)	70,88 (\$/bbl)	70,88 (\$/bbl)

Tabla IV.12 Costos del sistema LLT formulado con FR-021M.

Concentración (lb/bbl)	Nativo (\$/bbl)	M Q (\$/bbl)	M F (\$/bbl)
2	68,51	69,05	69,05
4	69,13	70,21	70,21
6	69,75	71,37	71,37

Los costos de los aditivos son tomados de la lista de precio de una compañía de lodo certificada por PDVSA y por una empresa nacional.

11. ANEXOS.



Figura 11.1 Revoque del filtrado dinámico sistema Flo-pro.

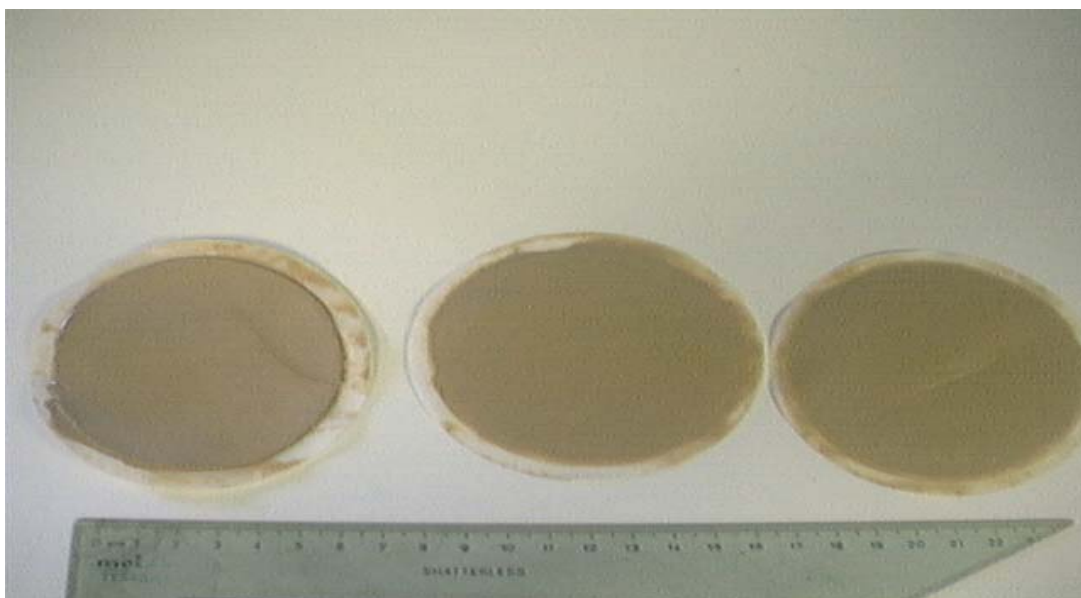


Figura 11.2 Revoque del sistema Flo-Pro con FR-021M en sus tres estados.



Figura 11.3 Revoques de sistema Poly-Plus con FR-021M en sus tres estados