

**Universidad Nacional de Ingeniería**

**FACULTAD DE INGENIERIA DE PETROLEO**



**“ Estudio de Factibilidad para la  
Utilización de Polímeros en Fluidos de  
Perforación en Pétro-Perú S. A. Zona Nor - Oeste ”**

**T E S I S**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO PETROQUIMICO**

**Humberto Carlos Mochizuki Yamasaki**

*Promoción 1981 - 1*

**Lima - Perú - 1990**

## INDICE

I.	SUMARIO .....	6
II.	ANTECEDENTES .....	7
III.	INTRODUCCION .....	8
	3.1. Objetivo .....	8
	3.2. Historia de los Fluidos de Perforación .....	8
IV.	DESARROLLO TEORICO .....	11
	4.1. Generalidades .....	11
	4.1.1 Funciones de un Fluido de Perforación .....	11
	4.1.2 Composición y Clasificación de los Fluidos de Perforación .....	14
	4.1.3 Propiedades físicas y químicas de los Fluidos de Perforación .....	17
	4.1.4 Reología de los Fluidos de Perforación .....	57
	4.1.5 Fluidos de Perforación-Base Polímero .....	79
	4.2. Tecnología General .....	81
	4.2.1 Polímeros .....	81
	4.2.2 Clasificación de los Polímeros .....	86
	4.2.2.1 Por su origen .....	87
	a) Naturales .....	87
	b) Modificados .....	96
	c) Sintéticos .....	102

4.2.2.2	Por su estructura .....	112
a)	Elastómeros .....	112
b)	Fibras .....	115
c)	Plásticos .....	117
d)	Polielectrolitos .....	118
4.2.2.3	Por su utilidad .....	122
a)	Viscosificadores .....	122
b)	Floculantes .....	125
c)	Agentes de control de filtrado .....	128
d)	Agentes estabilizadores de arcilla .....	129
e)	Defloculantes .....	131
<b>V.</b>	<b>APLICACIONES .....</b>	<b>135</b>
5.1.	Descripción de la Zona Productiva .....	137
5.2.	Sistema elegido .....	138
5.3.	Parámetros utilizados .....	
5.4.	Ventajas operativas .....	
<b>VI.</b>	<b>EVALUACION ECONOMICA .....</b>	
6.1.	Costo del Fluido de Perforar por pie perforado	
6.2.	Costo Total del pozo perforado .....	
6.3.	Ventajas económicas .....	
<b>VII.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>151</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>153</b>
<b>IX.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>177</b>

## I. SUMARIO

El presente estudio contempla el desarrollo teórico práctico del sistema de lodos semi-dispersos, utilizado en la perforación de pozos de petróleo, en el pool de Leones, distrito de Pariñas, provincia de Talara, departamento de Piura; relacionándola con el sistema tradicional de lodos dispersos, en la misma área, analizando sus propiedades físicas y químicas, a fin de conseguir un óptimo económico con el consiguiente ahorro de divisas.

Se analiza las relaciones de concentraciones de polímeros/dispersantes, sólidos perforados/bentonita; y, viscosidad plástica/punto cedente, con el fin de determinar la formulación más conveniente a utilizar en el pool antes indicado.

Este fluido muestra en todo momento, tener condiciones técnico-económicas sustentables. Técnicas, por su constitución e interacción con las formaciones a ser perforadas; y económicas, puesto que al tener características inhibitorias, el pozo perforado mantendrá su estabilidad, disminuyendo así considerablemente los retrasos y riesgos del equipo durante el transcurso de la perforación.

## II. ANTECEDENTES

Inicialmente, los lodos de perforación utilizados eran del tipo disperso, en la cual se utilizaban altas concentraciones de dispersantes; mientras que los polímeros sólo eran adicionados para conseguir un mejor control de la filtración. Sin embargo, en el pool de Leones, se presentaron problemas de filtración de agua y continuos derrumbes de las formaciones superficiales debido a su poca compactación, a consecuencia del gran cauce de agua que corrió por dicha zona (quebrada de Pariñas) durante el período pluvial acaecido en el año 1983.

Esto trajo como consecuencia, que se bajarán forros de superficie (conductoras) de 13 3/8" de diámetro , hasta una profundidad de 200 pies; para luego correr forros intermedios de 9 5/8" de diámetro, hasta 380 pies; a fin de evitar los problemas indicados durante la perforación del pozo.

En el segundo trimestre del año 1988, se comenzó a utilizar los lodos de base polímero (semi-disperso), aumentando fuertemente la viscosidad en los primeros 400 pies, evitando así el uso de la conductora de 13 3/8" de diámetro, disminuyendo también los problemas de tipo operativos tales como derrumbes, formación de puentes, etc.; reduciendo los días de perforación, e incrementando la tasa de penetración.

### III. INTRODUCCION

#### 3.1 OBJETIVO

El objetivo de este estudio es el de estudiar la factibilidad de utilizar lodos de base polímeros del tipo semi-disperso, comparando su performance con la de un lodo del tipo disperso; en el pool de Leones.

#### 3.2 HISTORIA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

La historia de los fluidos de perforación puede dividirse en tres periodos distintos. La primera, Epoca de la Experimentación, comprende desde su uso inicial hasta la completación del pozo de Lucas en el campo de Spindletop, cerca de Beaumont, Texas en 1901. Aquí se utilizaba agua como material de extracción de cortes, la cual se cargaba con materiales arcillosos provenientes del terreno atravesado. La casualidad hizo que inicialmente se perforara en zonas donde el aporte del terreno formaba con el agua circulada, un fluido de propiedades aceptables para la perforación.

Posteriormente, se presentaron inconvenientes debido a las diferentes y más profundas zonas atravesadas. Se comprobó

que ciertas capas de terreno eran más aptas para formar buenas mezclas con el agua, por lo que se buscaron afloramientos de dichas capas para las posteriores preparaciones de los fluidos.

En 1921, el Sr. Stroud, debido a los innumerables reventones e incendios; usó materiales densificantes que no dificultaran el bombeo. En el laboratorio preparó mezclas de agua con óxido de hierro finamente molido, obteniendo densidades de 15 a 18 lbs/gal. En 1922, Stroud usó sulfato de bario en lugar de óxido de hierro debido a que manchaba la piel de los operadores.

Este segundo periodo, comprendido entre 1901 y 1928, año en que se forma la primera compañía de fluidos de perforación, se denomina Epoca de la Práctica.

El tercer periodo, ó Epoca de la Ciencia, abarca desde 1928 hasta nuestros días; etapa en la cual se aceptó definitivamente la idea de que el lodo de perforación es de suma importancia para perforar en forma rápida, segura y económica.

En 1931, Marsh, introdujo el empleo del embudo para medir la viscosidad en el campo y para el laboratorio se recomendó el uso del viscosímetro de Stormer a 600 rpm.

En 1937, se reconoció el filtrado como una propiedad importante y se comenzó a emplear el filtro prensa para determinar pérdidas de agua y espesores de pared formada alrededor del pozo.

Después de 1950, se afina la instrumentación y se comienza a ocupar en determinar las propiedades de los fluidos a las condiciones efectivas de empleo; teniendo en cuenta las temperaturas y presiones que el lodo está recibiendo al atravesar los diferentes estratos.

Al irse perforando pozos más profundos y por las ventajas económicas derivadas del menor esfuerzo y de los gastos de mantenimiento del lodo que llevaba evidentemente a la reducción de las dificultades durante la perforación, se comenzó a formar toda una generación de ingenieros especializados en fluidos de perforación; así como compañías de ventas de productos y servicios que proliferan a nivel mundial.



## IV. DESARROLLO TEORICO

### 4.1. GENERALIDADES

#### 4.1.1. FUNCIONES DE UN FLUIDO DE PERFORACION

En la etapa inicial de la perforación rotativa, la función principal del lodo, era la de levantar continuamente los detritos perforados desde el fondo del hueco a la superficie. Posteriormente, sus funciones se ampliaron gradualmente y aumentaron las exigencias en cuanto a su composición y cualidades.

Durante la perforación el lodo cumple las siguientes funciones:

- a. Transportar los recortes de perforación y los derrumbes a la superficie, evitando un aumento de torsión, arrastre y presión hidrostática al acumularse estos en el espacio anular.
- b. Mantener en suspensión a los recortes y derrumbes en el espacio anular cuando se detiene la circulación.

Para llevar a cabo dichas funciones, deben minimizarse los siguientes efectos colaterales:

- a. Daño a las formaciones subterráneas, especialmente a las que pueden ser productivas; ya sea, por taponamiento físico por sólidos inertes ó de una reacción química entre los componentes del lodo y los de la formación; ó, inestabilidad de las paredes de la formación como consecuencia de reacciones químicas ó erosión física.
- b. Corrosión de la sarta de perforar y de los forros.
- c. Reducción de la velocidad de penetración, debido a una excesiva cantidad de sólidos, excesiva viscosidad y diferencia significativa entre la presión hidrostática del lodo y la presión de la formación.
- d. Problemas de presiones de succión, de pistón y de presión de circulación, debido a altas viscosidades, gran resistencia de gel ó exceso de sólidos.
- e. Pérdida de circulación, cada vez que la presión ejercida por el lodo excede la resistencia de la formación.
- f. Pegamiento de la sarta de perforar contra las paredes del pozo, cuando existen presiones diferenciales

entre la columna hidrostática y la formación, ésta última generalmente muy permeable.

- g. Erosión de las paredes del pozo, ya sea por medios físicos ó químicos.
- h. Retención de sólidos indeseables por el lodo en las piletas, debido a su estructura gelificante.
- i. Desgaste de las partes de las bombas de lodo, por presencia de sólidos abrasivos, generalmente arena.
- j. Contaminación con las mezclas de cemento durante la cementación de los forros.
- k. Contaminación del ambiente natural.

#### 4.1.2. **COMPOSICION Y CLASIFICACION DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION**

La composición de los lodos dependerá, generalmente, de los requerimientos que presente la formación a perforarse y a las operaciones de perforación.

Para escoger el tipo y características de un lodo, se debe tener en cuenta muchos factores, como son: económicos, de contaminación, presión y temperatura del reservorio; y otros de tipo técnico.

El agua sola, es muchas veces un fluido ideal de perforación y es usada frecuentemente en zonas libres de problemas de alta presión (presiones anormales).

En algunas áreas, la perforación puede iniciarse sólo con agua, los sólidos que se van cortando se incorporan en el agua dando como resultado una mezcla satisfactoria. En otras áreas será necesario agregar arcillas comerciales al agua para obtener un lodo con determinadas características.

Podemos clasificar a los lodos de la siguiente manera:

I. Lodos de base agua:

Son todos los lodos que tienen su fase continua líquida constituida por agua, dulce o salada. Ciertos materiales son mantenidos en suspensión y otros son disueltos.

Estos lodos, básicamente, tienen tres fases:

- a. Fase continua.- Constituida por agua, ya sea dulce, de mar, tratada, etc.
- b. Fase de sólidos reactivos.- Constituida por las arcillas comerciales, las arcillas hidratables incorporadas y las lutitas provenientes de las

formaciones perforadas y que se mantienen en suspensión.

Estos sólidos están sujetos a tratamiento químico para el control de las propiedades del lodo.

c. Fase de sólidos inertes.- Se refiere a aquellos sólidos en suspensión que son químicamente inactivos. Estos pueden ser: calizas, dolomitas ó arenas. La baritina es un sólido inerte cuya función es aumentar la densidad del lodo.

## II. Lodos de base petróleo:

Se caracterizan porque su parte líquida continua es el petróleo (emulsión inversa).

Estos tipos de lodo tienen un contenido bastante bajo de agua, proporcionando costras impermeables sobre las paredes del pozo, debido a que el filtrado a la formación es petróleo, y no se producen los efectos de hidratación de lutitas y/o arcillas de las formaciones atravesadas.

La desventaja del uso de estos lodos radica fundamentalmente en lo económico ya que resultan demasiado costosos.

### III.Lodos neumáticos:

La perforación con aire, niebla ó espuma, son bastante comunes en áreas en que las formaciones duras contienen una cantidad relativamente pequeña de fluidos de formación.

Este tipo de fluido de perforación es también útil en áreas en que la pérdida de circulación severa constituye un problema.

Las ventajas de usar este tipo de fluidos incluyen mayores velocidades de penetración, mayor vida útil de la broca, mejor control en áreas con pérdida de circulación, un daño mínimo a las formaciones productivas, y evaluación inmediata y continua de los hidrocarburos.

La principal desventaja en el uso de estos fluidos es la posibilidad de incendios ó explosiones en el fondo del pozo.

#### **4.1.3. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION**

1. DENSIDAD.- La densidad de un fluido de perforación es su peso por unidad de volumen. La densidad puede ser expresada en libras por galón (ppg), peso específico (sp-gr), libras por pie cúbico (pcf); y/ó, gradiente

de presión (psi/pie). El instrumento usado con más frecuencia para determinar la densidad de fluidos de perforación es la balanza de lodo (Fig. 4.1 ). Este instrumento permite mediciones con una precisión entre +/- 0.1 ppg, ó +/- 0.5 pcf. La balanza de lodo consiste de las siguientes partes: una base de soporte, un recipiente con cubierta, un brazo graduado con caballete móvil, y un punto de apoyo con una burbuja de nivel.

La balanza de lodo debe calibrarse periódicamente con agua dulce para asegurar su precisión. El agua dulce debe pesar 8.33 lb/gal ó 62.3 lb/pie<sup>3</sup>. Cualquier diferencia puede corregirse numéricamente, por ajuste del tornillo de la balanza ó por alteración de la cantidad de balines de plomo en el receptáculo ubicado en el extremo del brazo de la balanza.

PROCEDIMIENTO.- El procedimiento en la determinación de la densidad de una muestra de un fluido de perforación, es el siguiente:

1. Colocar el estuche que contiene la balanza en una superficie nivelada.
2. Abrir el estuche y remover la balanza y cubierta asegurándose que ambas esten limpios y secos.

3. Llenar el recipiente de la balanza hasta el tope con la muestra de lodo y lentamente asentar la cubierta con un movimiento giratorio firme. Parte del fluido será expulsado a través del orificio en la cubierta, indicando así que el recipiente está lleno. Asegurarse que todas las burbujas de aire escapen al cerrar el recipiente.
  4. Colocar el dedo pulgar sobre el orificio en la cubierta y lavar todo el lodo en el exterior del recipiente y del brazo.
  5. Colocar el brazo de la balanza sobre el soporte. El punto de apoyo en forma de cuchilla encaja en la ranura de la base y el cursor es movido hasta que el instrumento es balanceado. Esto sucede cuando la burbuja del nivel está centrada.
  6. La densidad del lodo se lee en el brazo graduado, exactamente al extremo izquierdo del cursor.
  7. La balanza de lodo debe lavarse y secarse completamente después de cada uso para prevenir la corrosión.
2. VISCOSIDAD.- La viscosidad es la medida de la resistencia interna de los fluidos al flujo. La unidad de viscosidad es el "poise" y se define como



la viscosidad de un líquido hipotético al que una fuerza tangencial de una dina hace que dos superficies paralelas en el seno del líquido, de un centímetro cuadrado de área y a un centímetro de distancia una de otra, se mueven a una velocidad relativa de un centímetro por segundo. En la práctica se emplea la centésima parte del poise "centipoise".

Para la medición simple de viscosidad se emplea el "EMBUDO MARSH", obteniéndose una mejor medición de las características reológicas mediante el empleo de un "VISCOSIMETRO ROTATORIO".

El embudo Marsh (Fig. 4.2) es un instrumento con una configuración definida, utilizado para determinar la viscosidad de embudo de una muestra de 1500 cm<sup>3</sup> de un fluido de perforación. El embudo tiene un diámetro de 6 pulgadas en el extremo superior y una longitud de 12 pulgadas. Su diámetro decrece hasta alcanzar un diámetro interno de 3/16 de pulgada con una longitud de 2 pulgadas. El embudo contiene un tamiz fijo de malla 10 a una distancia de 3/4 de pulgada del borde superior del embudo.

PROCEDIMIENTO.-

1. Calibración: Llenese el embudo con agua dulce a 21°C de temperatura. El tiempo de salida de un cuarto de galón (946 c.c.) de agua debe ser de 26 +/- 0.5 seg.
  2. Sostener el embudo en posición vertical con el dedo índice tapando el orificio de descarga.
  3. Llenar el embudo con la muestra de lodo a través del tamiz. Llenar hasta la marca en la parte inferior del cedazo.
  4. Retirar el dedo del tubo de salida y con un cronómetro registrar el número de segundos que tarda en pasar un cuarto de galón de la muestra.
  5. Registrar la temperatura del fluido en grados Fahrenheit ó Centígrados.
3. VISCOSIDAD APARENTE, VISCOSIDAD PLASTICA , PUNTO DE CEDENCIA Y RESISTENCIA DE GEL.- Estos parámetros se obtienen empleando viscosímetros rotatorios de lectura directa y de cilindros concéntricos (viscosímetros FANN-VG). 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 interior. El movimiento de éste último es restringido por un resorte de torsión, y un dial conectado registra el desplazamiento del cilindro interior a varias revoluciones por minuto de la camisa exterior.

El viscosímetro manual (Fig. 4.3) tiene velocidades rotacionales de 300 y 600 rpm, las cuales se obtienen al rotar manualmente una manivela externa.

La viscosidad aparente, es la viscosidad que el fluido aparentaría tener a una determinada velocidad de corte, y que varía al aumentar ó disminuir ésta. Su unidad es el centipoise.

La viscosidad plástica, cuya unidad es el centipoise, se trata de la resistencia al flujo de lodo, causada principalmente por la fricción de las partículas suspendidas y también por la viscosidad de la fase fluida. La viscosidad plástica es afectada por la concentración, tamaño y forma de las partículas sólidas suspendidas en el lodo.

El punto de cedencia ó yield point, tiene como unidad las libras por cada 100 pies cuadrados. El punto de cedencia es la parte de la resistencia al flujo causada por las fuerzas de atracción entre

partículas. La magnitud de esa fuerza es una función de :

1. El tipo de sólidos y las cargas eléctricas asociadas con ellos.
2. La cantidad de sólidos.
3. La concentración iónica de las sales contenidas en la fase fluída del lodo.

La resistencia de gel, llamado también gelatinosidad, es el valor del esfuerzo de corte necesario para iniciar una velocidad de corte apreciable en un fluido. Esta resistencia, viene a ser una característica tixotrópica de los fluidos de perforación; es decir, la capacidad de desarrollar una estructura de gel rígida o semirígida durante periodos de reposo y volver a convertirse en una suspensión líquida una vez incrementado el régimen de corte.

Los esfuerzos de gel pueden clasificarse como progresivo fuerte, y frágil o débil. Un amplio margen entre la lectura inicial de gel y la lectura a los 10 minutos se denomina gel progresivo e indica acumulación de sólidos. Si la lectura inicial y la de 10 minutos son ambas elevadas, con pequeña diferencia

entre las dos, se trata de un gel instantáneo, lo que indica floculación.

La magnitud de la gelificación, así como el tipo de resistencia de gel, son importantes para la suspensión de recortes y de material densificante. Las resistencias de gel no deben ser excesivamente altas ya que pueden originar las siguientes complicaciones:

1. Retención de aire ó gas en el lodo.
2. Excesivas presiones de bomba para iniciar la circulación después de un viaje.
3. Reducción de la velocidad a la que se sedimentan la arena y los recortes en el tanque de sedimentación.
4. Excesiva succión al sacar la columna.
5. Excesiva sobrepresión al introducir la columna.
6. Imposibilidad de hacer llegar las herramientas de perfilaje hasta el fondo.

La resistencia de gel y el punto de cedencia son, ambas, medidas de las fuerzas de atracción en un

sistema de lodo. La primera, mide las fuerzas de atracción estáticas; mientras que la segunda, mide las fuerzas de atracción dinámicas.

#### PROCEDIMIENTO.-

1. Obtener una muestra de lodo de un punto de agitación del sistema superficial.
2. Sin demora de más de cinco (05) minutos; ó, una pérdida máxima de  $5.5^{\circ}\text{C}$  , transferir el lodo a un recipiente adecuado para efectuar las mediciones. Registrar la temperatura de la muestra.
3. Sumergir la camisa rotatoria en la muestra de lodo hasta la marca indicada.
4. Con la camisa rotando a 600 rpm, registrar la lectura del dial, una vez que se ha estabilizado.
5. Cambiar la velocidad de rotación a 300 rpm y registrar nuevamente la lectura del dial.

La viscosidad aparente (AV) en centipoises se determina al dividir la lectura a 600 rpm entre dos.

La viscosidad plástica (PV) en centipoises se determina al restar la lectura a 300 rpm de la lectura a 600 rpm.

El punto de cedencia (YP) en lbs/100 pies<sup>2</sup> es igual a la lectura a 300 rpm menos la viscosidad plástica.

6. Agitar la muestra de lodo en el viscosímetro por 10 segundos. Hacer girar el rotor lentamente en dirección opuesta a la de las manecillas del reloj para producir una lectura positiva del dial. La lectura máxima es la resistencia de gel a 10 segundos en lbs/100 pies<sup>2</sup>.

7. Agitar la muestra nuevamente por 10 segundos a una alta velocidad y permitir que permanezca quieta por 10 minutos. La medición se hace exactamente como la anterior y se registra la resistencia de gel a 10 minutos en lbs/100 pies<sup>2</sup>.

4. pH Y ALCALINIDAD.— El término pH indica el grado de acidez ó alcalinidad relativa de un fluido.

En la escala de pH, el rango de acidez varía entre menos de 1 hasta 7 (en acidez decreciente) y el rango de alcalinidad comienza en 7 hasta llegar a 14 (en alcalinidad creciente). Un pH de 7 es neutro. Los lodos son casi siempre alcalinos. Un rango habitual de pH es de 9.0 a 10.5; sin embargo pueden encontrarse lodos de pH más alto, entre 12.5 a 13.0.

El pH de los lodos afecta la dispersibilidad de las arcillas, la solubilidad de varios productos y sustancias químicas, la corrosión de materiales de acero y las propiedades reológicas de los lodos.

#### PROCEDIMIENTO.-

Hay dos métodos para determinar el pH de los lodos. Ambos métodos están sujetos a error en la presencia de altas concentraciones de sal. Estos métodos son:

a) Método colorimétrico.- Se basa en el efecto de los ácidos y los álcalis sobre el color de ciertos indicadores químicos colocados sobre tiras de papel de pH (Fig. 4.4). El papel de prueba está disponible en un amplio rango permitiendo la estimación del pH hasta 0.5 de unidad. Papeles de rango más estrecho también se usan, hasta 0.2 de unidad. Ambos tipos de papel traen una tabla de colores estándar para la comparación necesaria.

1. Colocar una pequeña tira de papel indicador con cuidado sobre la superficie del fluido de perforación, permitiendo que se humedezca.
2. Dejar el tiempo necesario para que la tira de papel estabilice su color. Esto no debe tomar más de 30 segundos.





Fig 4.4 Papel de pH

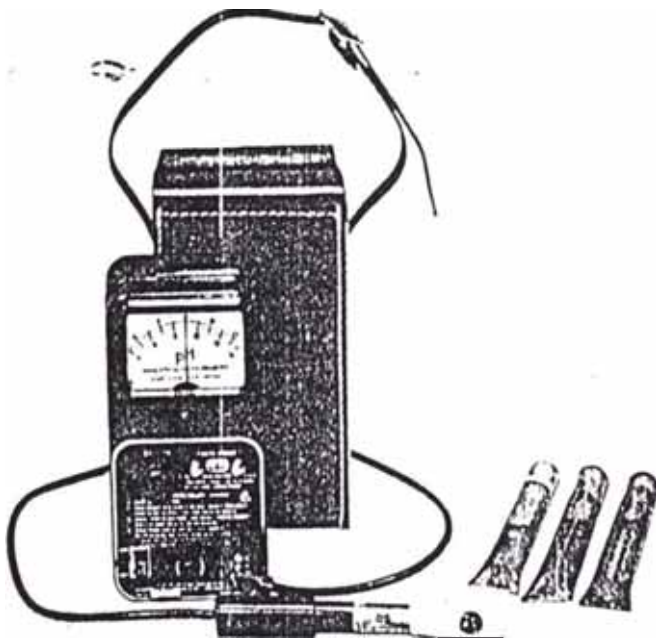


Fig.4.5 Medidor analítico de pH

3. Comparar el color resultante en el lado superior del papel, con los colores de referencia que vienen en la tabla suministrada.
  4. Registrar el pH del fluido con una aproximación de 0.5 ó 0.2 de unidad, según la escala de colores del papel indicador usado.
- b) Método electrométrico.- Se basa en el voltaje desarrollado entre dos electrodos especiales (uno de vidrio de pared delgada en el cual un electrolito y electrodo están sellados; y otro, de referencia el cual es una celula de calomel saturado, y que está rodeada por un tubo que contiene una solución de cloruro de potasio saturada), colocados en un tubo de vidrio el cual se introducirá en la muestra de lodo que se está analizando.

Este voltaje (potencial eléctrico) generado en el sistema del electrodo de vidrio por los iones de hidrógeno en el lodo es amplificado y opera el medidor calibrado ó digital el cual indica el pH (Fig. 4.5 ).

1. Hacer los ajustes necesarios para poner el medidor de pH en funcionamiento.

2. Calibrar el medidor con soluciones provistas.

Nota.- Si es posible, corregir el medidor para la temperatura correcta.

3. Lavar los extremos de los electrodos y secarlos cuidadosamente.

4. Insertar el electrodo en la muestra de prueba contenida en una cubeta de precipitación pequeña.

5. Agitar el fluido alrededor de los electrodos rotando la cubeta.

6. Registre el pH de la muestra cuando se estabilice el indicador, con una aproximación de 0.1 de unidad.

5. FILTRADO.- Mientras se está perforando, las formaciones pueden comportarse como una malla o tamiz. Los sólidos se depositan sobre las paredes del pozo formando una capa permeable que recibe el nombre de costra; y el fluido que atraviesa esa capa e invade la formación se denomina filtrado. La filtración ó pérdida de filtrado, es el volúmen de la fase líquida del lodo. Esta pérdida de filtrado que tiene lugar mientras la costra se está formando se conoce como pérdida inicial.

El proceso de filtración debe ser controlado mediante el régimen velocidad de filtración, espesor y textura de la costra; y las propiedades químicas del filtrado. Esto, con el fin de tener una costra delgada y resistente sobre la superficie de las formaciones permeables e impedir una pérdida excesiva de filtrado; ayudando así a mantener un pozo estable y minimizar los daños a la formación.

Mediante una atención y control apropiados de las pérdidas de filtrado, se pueden obtener los siguientes beneficios:

1. Menor riesgo de aprisionamiento de la tubería.
2. Mayor protección para las formaciones productivas.
3. Mejor interpretabilidad de los perfiles eléctricos.
4. Efectos beneficiosos para la estabilidad del pozo.

Los principales factores que influyen en la filtración son:

1. Tiempo.— La velocidad de filtración es directamente proporcional a la raíz cuadrada del

tiempo, contado desde la pérdida inicial del filtrado. La relación es la siguiente:

$$v_2 = v_1 \sqrt{t_2/t_1}$$

donde :  $v_1$  = pérdida real del filtrado en el momento  $t_1$ , en c.c.

$v_2$  - pérdida calculada del filtrado en el momento  $t_2$ , en c.c.

$t_1$  - intervalo de tiempo para la pérdida de filtrado  $v_1$ , en minutos.

$t_2$  - intervalo de tiempo para la pérdida de filtrado  $v_2$ , en minutos.

El API especifica que la pérdida de filtrado debe ser reportada en  $\text{cm}^3/30$  minutos.

2. Temperatura.- Un aumento de la temperatura incrementa la velocidad de filtración porque, generalmente, la viscosidad del petróleo ó del agua en la fase continua del lodo se reduce y, también, porque la alta temperatura produce cambios químicos en el lodo, además se disminuye la eficacia de muchos aditivos para el control de pérdida de fluido.

3. Presión.- Los efectos de la presión sobre la velocidad de filtración dependen, en gran medida, de las características de la costra.

Si la costra es compresible, un aumento de la presión reduce su permeabilidad y disminuye la pérdida de filtrado.

Si la costra es incompresible, la velocidad de filtración varía con la raíz cuadrada de la presión. Una costra incompresible implica que la permeabilidad de la misma, no es afectada por la presión.

La compresibilidad de la costra depende del tipo, tamaño, forma y distribución de los sólidos en dicha costra.

#### PROCEDIMIENTO.-

Hay dos métodos API estándar para medir la pérdida relativa de filtrado de un lodo.

Los dos ensayos son similares, pero se diferencian en la presión aplicada al lodo y en la temperatura del lodo.

Uno de los ensayos, se realiza a temperatura ambiente y a una presión de 100 psi. El otro ensayo se lleva a cabo, generalmente, a 300 °F y 500 psi (Fig. 4.6).

1. Obtener una muestra de lodo recientemente agitada y registre la temperatura en °F ó °C.
2. Asegúrese de que cada pieza de la prensa filtro esté limpia y seca, y que los empaques no estén desgastados ó deformados. Llenar la cámara hasta 1/4 de pulgada del borde superior de ésta.
3. Encajar el empaque (O'ring) en su alojamiento y colocar por encima un papel filtro de 9 cm. (Whatman N° 50, ó equivalente).
4. Terminar de armar la cámara y colocarla en el soporte.
5. Colocar una probeta graduada seca bajo el tubo de drenaje de la cámara para recibir el filtrado.
6. Cerrar la válvula de alivio ó seguridad y ajustar el regulador de presión para obtener 100 +/- 5 psi. Esta presión debe ser aplicada en menos de 30 segundos.

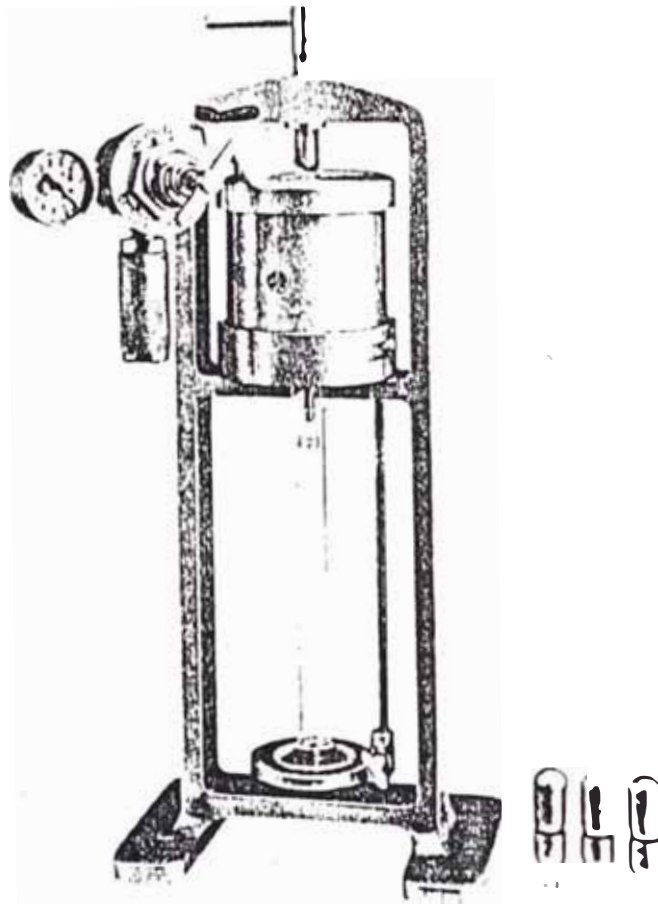


Fig. 4.6 Filtro prensa



7. La prueba debe efectuarse por 30 minutos, comenzando al momento de la aplicación de presión.
  8. Después de 30 minutos, cortar la presión desatornillando el regulador y abrir la valvula de alivio seguridad asegurándose que toda la presión sea liberada.
  9. El volúmen de filtrado se registra en  $\text{cm}^3$  como filtrado API.
  10. Remover la cámara de su soporte y desarmarla.
  11. Desechar el lodo y preservar el papel filtro sin causar daño a la costra.
  12. Lavar cuidadosamente la costra con agua.
  13. Medir el espesor de ésta en  $1/32$  de pulgada y registrarlo en el informe de lodo.
  14. La consistencia de la costra debe anotarse utilizando adjetivos tales como "firme", "dura", "blanda", "resistente" ó "suave".
6. ALCALINIDAD.- Se determina en los lodos tratados con hidróxidos ó carbonatos alcalinos.

La alcalinidad del filtrado (Pf), es el volúmen de ácido requerido para llegar al punto final, dividido por el volúmen de la muestra de filtrado. El punto final de la titulación a la fenolftaleína ocurre cuando el pH es 8.3.

La alcalinidad del filtrado (Mf), se obtiene continuando la titulación anterior hasta obtener el punto final de la titulación al anaranjado de metilo, cuando el pH es 4.3

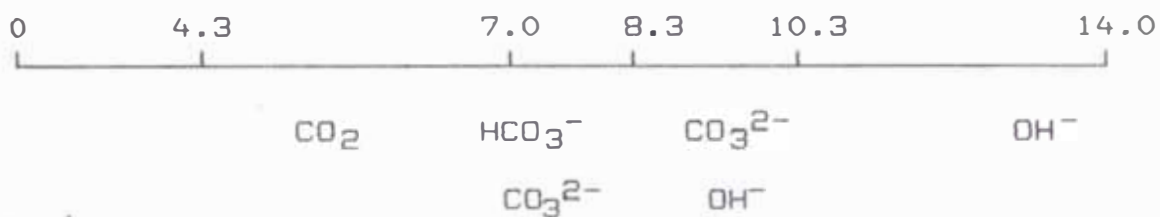
Este método presupone que la alcalinidad es debida a los iones carbonato, bicarbonato y oxidrilo. Además considera que no se encuentran agentes amortiguadores (buffers) presentes. Si es así en realidad, la cantidad de ácido sulfúrico requerida para reducir el filtrado a un pH de 8.3 es la cantidad necesaria para neutralizar todo el hidroxilo y para convertir los carbonatos a bicarbonatos de la siguiente manera:



La adición de una cantidad mayor de ácido para titular del punto final Pf al punto final Mf convierte los bicarbonatos a bióxido de carbono y agua. La cantidad de ácido requerida depende de cuanto bicarbonato exista a este nivel de pH. La reacción es la siguiente:



Estas condiciones son válidas si sólo están presentes los iones carbonato, bicarbonato y oxidrilo, como puede verse por su presencia en relación a la escala de pH:



Cuando se interpretan al mismo tiempo, la Pf y la Mf pueden utilizarse para determinar el origen y el grado de la alcalinidad del filtrado. Empleando la tabla que se muestra a continuación, la alcalinidad en partes por millón equivalentes (epm) ó equivalentes por millón, puede ser calculada para cada fuente de origen:

Si	$\text{OH}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$
Pf = 0	0	0	Mf x 20
Pf = Mf	Pf x 20	0	0
2 Pf = Mf	0	Pf x 40	0
2 Pf < Mf	0	Pf x 40	(Mf - 2Pf) x 20
2 Pf > Mf	(2Pf - Mf) x 20	(Mf - Pf) x 40	0

Obsérvese que cuando Pf = 0, sólo los iones bicarbonato pueden contribuir a la alcalinidad. Cuando Pf = Mf, toda la alcalinidad es debida al ión

hidroxilo. Si  $2Pf = Mf$ , toda la alcalinidad es debida a la contribución del carbonato. Cuando se obtienen otras lecturas, ellas son el resultado de dos orígenes de la alcalinidad.

Partes por millón equivalente es una medida basada en la reactividad de cada ión. Si se desea convertir de partes por millón equivalente (epm) a partes por millón en peso, se utilizan los siguientes factores:

multiplíquese el epm de $\text{OH}^-$	por	17
multiplíquese el epm de $\text{HCO}_3^-$	por	61
multiplíquese el epm de $\text{CO}_3^{2-}$	por	30

Estos factores se obtienen dividiendo el peso molecular por la valencia ó reactividad relativa.

La experiencia ha demostrado que podemos correlacionar las fuentes orígenes de la alcalinidad en el lodo con las propiedades del lodo:

$\text{OH}^-$  principalmente..Lodo estable, buena condición.  
 $\text{OH}^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ .....Lodo estable, buena condición.  
 $\text{CO}_3^{2-}$  solamente.....Inestable, puede ser controlado.  
 $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ .....Inestable, difícil de controlar.  
 $\text{HCO}_3^-$  solamente.....Malas condiciones, muy difícil de controlar.

Los lodos con problemas de carbonato y bicarbonato, a menudo exhiben altas viscosidades y elevadas resistencias de gel, y no responden a los tratamientos normales. La pérdida de filtrado puede aumentar y el lodo puede tener una apariencia vidriosa ó aereada. Las fuentes de éste tipo de problemas incluyen el tratamiento excesivo con carbonato ó bicarbonato de sodio; el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) disuelto desde el aire ó desde la formación perforada; y la degradación de OH, lignosulfonatos ó almidón.

#### PROCEDIMIENTO.-

1. Medir  $1 \text{ cm}^3$  ó más del filtrado de la prueba de filtración API en un recipiente de titulación limpio y seco.
2. Añadir al filtrado, 2 a 3 gotas de la solución indicadora de fenolftaleína, agitándolo.
3. Si la fenolftaleína cambia a un color rosado, añadir ácido sulfúrico 0.02 N, gota a gota con la pipeta, mientras se continúa agitando, hasta cuando el color rosado desaparezca, ó hasta cuando el filtrado adquiera su color original. Un medidor de pH de electrodo de vidrio puede ser utilizado si el cambio de color es difícil de apreciar. En

este caso, titular hasta que el pH disminuya a un valor de 8.3.

4. Registre la alcalinidad de fenolftaleína del filtrado (Pf), como el número de  $\text{cm}^3$  de ácido 0.02 N necesarios para alcanzar el punto final por cada  $\text{cm}^3$  de filtrado.
5. A la misma muestra, titulada para el punto final Pf, añadir 2 a 3 gotas de solución indicadora de naranja de metilo, el cual da un color anaranjado a la solución de filtrado.
6. Añadir ácido sulfúrico 0.02 N a la solución, agitando al mismo tiempo, hasta que la muestra cambie de color amarillo naranja a un color rosado; o, hasta cuando el pH disminuya hasta 4.3 si se usa un medidor de pH. Ambos deben permanecer constantes por 30 segundos.
7. Registrar la alcalinidad del filtrado al naranja de metilo (Mf) como el número total de  $\text{cm}^3$  de ácido 0.02 N por cada  $\text{cm}^3$  de filtrado necesarios para alcanzar el punto final del naranja de metilo, más el total de  $\text{cm}^3$  de ácido 0.02 N utilizados en la prueba de Pf.

7. CLORUROS.- Este ensayo es muy importante para determinar si hay contaminación con sal y para conocer las concentraciones de cloruros en lodos tratados con sal.

PROCEDIMIENTO.-

1. Medir uno o más  $\text{cm}^3$  de filtrado en un recipiente de titulación limpio y seco.
2. Añadir 2 a 3 gotas de solución de fenolftaleína (1 gr/100  $\text{cm}^3$  de alcohol al 50 por ciento).
3. Si un color rosado aparece, titular con ácido sulfúrico 0.02 N, hasta que el color rosado desaparezca. Si el filtrado está marcadamente coloreado, añadir 2  $\text{cm}^3$  adicionales de la solución ácida. Agitar.
4. Añadir 25  $\text{cm}^3$  de agua destilada y 5 a 10 gotas de cromato de potasio al recipiente de titulación.
5. Titular gota a gota con una solución de nitrato de plata (4.791 gr/lt), usando la pipeta de 10  $\text{cm}^3$ . La agitación debe ser continua, hasta que el color cambie a un rojo ladrillo y permanezca por 30 segundos.

6. Registre el número de  $\text{cm}^3$  de nitrato de plata necesarios para alcanzar el punto final.
7. Si se usan más de  $10 \text{ cm}^3$  de nitrato de plata para alcanzar el punto final, repetir el procedimiento con una muestra más pequeña.

Nota.- Si la concentración del ión cloruro en el filtrado, excede de 10,000 ppm, puede utilizarse una solución de nitrato de plata equivalente a 0.01 gramos de ión cloruro/ $\text{cm}^3$  en vez de la equivalente a 0.001 gramos de ión cloruro/ $\text{cm}^3$ . Si se usa la solución más fuerte, el factor 1,000 de la ecuación siguiente debe cambiarse por 10,000.

8. Registre la concentración del ión cloruro del filtrado en mg/lt, calculado de la siguiente manera:

$$\text{Cloruros (mg/lt)} = \frac{(\text{cm}^3 \text{ de nitrato de plata})(1000)}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra de filtrado})}$$

Para convertir unidades:

$$\text{Cloruros (ppm)} = \frac{\text{Cloruros (mg/lt)}}{\text{Sp.Gr. de la muestra}}$$

$$\text{Sal (NaCl), ppm} = (1.65)(\text{Cloruros, ppm})$$

$$\text{Granos por galón} = (0.0583)(\text{ppm})$$



8. DUREZA TOTAL.- Este ensayo se realiza con la finalidad de saber si hay contaminación y para ayudar a tratar adecuadamente un lodo, si fuera necesario. A menudo este ensayo se lleva también a cabo en el agua de constitución que se empleará en la preparación del lodo, puesto que algunos aditivos usuales no son efectivos en un ambiente que contiene calcio.

PROCEDIMIENTO.-

1. Recolectar el filtrado de la prueba de filtración API.
2. Medir 50 cm<sup>3</sup> de agua destilada en un recipiente de titulación limpio y seco.
3. Añadir aproximadamente 2 cm<sup>3</sup> de solución reguladora de dureza y suficiente indicador de dureza (ERIO T NEGRO) para desarrollar un color azul fuerte. Si se desarrolla un color rojo en vez de uno azul, indica dureza en el agua destilada. Añadir solución de versenato gota a gota hasta que el agua tome un color azul. No incluir este volumen de la solución de versenato al calcular la dureza de la muestra.
4. Añadir uno ó más cm<sup>3</sup> del filtrado al recipiente de titulación.

5. La presencia de calcio ó magnesio causará que el color azul cambie a un color vinoso.
6. Añadir con la pipeta solución de versenato, agitando continuamente, hasta que la muestra tome por primera vez un color azul.
7. Registrar el número de  $\text{cm}^3$  de versenato utilizados para titular la muestra.
8. Calcular la dureza de la muestra con las siguientes ecuaciones:

$$\text{CaCO}_3, \text{ mg/lt} = \frac{(\text{cm}^3 \text{ versenato estándar})(1000)}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})}$$

$$\text{Calcio, mg/lt} = (0.4)(\text{Carbonato de calcio, mg/lt}), \text{ ó}$$

$$\text{Calcio, mg/lt} = \frac{(400 \text{ cm}^3 \text{ versenato estándar})}{(\text{cm}^3 \text{ de muestra})}$$

$$\text{ppm} = \frac{\text{mg/lt}}{\text{Sp.Gr. solución}}$$

$$\text{Granos por galón} = (0.0583)(\text{ppm})$$

Para determinar la concentración del ión  $\text{Ca}^{2+}$ , se siguen los siguientes pasos:

1. Colocar 1 ml. de filtrado de lodo en un recipiente de titulación.
2. Diluir con 25 - 50 ml. de agua destilada.
3. Añadir 3 ml. de NaOH 1 N.
4. Agregar una pizca de indicador de calcio (azul de hidroxinaftol). Si  $\text{Ca}^{+2}$  está presente, la solución se tornará rosada.
5. Añadir 5 ml. de trietanolamina al 10 % y mezclar.
6. Titular la muestra con solución de versenato hasta un punto final color violeta.

$$\text{Ca}^{++}, \text{ mg/lt} = \frac{\text{ml. de versenato standard} \times 400}{\text{ml. de filtrado}}$$

10. CAPACIDAD DE INTERCAMBIO DE CATIONES. - Esta prueba está especialmente diseñada para determinar la capacidad de una arcilla para absorber cationes de una solución, independiente del tipo y contenido de las arcillas presentes. Sólo las partes reactivas de las arcillas se encuentran involucradas, ya que aquellos materiales como arena o baritina, no absorben el azul de metileno.

PROCEDIMIENTO.-

1. Medir un  $\text{cm}^3$  de la muestra de lodo en el frasco erlenmeyer, el cual contiene  $10 \text{ cm}^3$  de agua destilada.
2. Añadir  $15 \text{ cm}^3$  de peróxido de hidrógeno al 3 %.
3. Añadir  $0.5 \text{ cm}^3$  de ácido sulfúrico 5 N.
4. Hervir la muestra moderadamente por 10 minutos.
5. Después de hervir la muestra, llevar el volúmen a un total de  $50 \text{ cm}^3$  con agua destilada. Permitir que la muestra se enfríe.
6. Añadir la solución de azul de metileno en incrementos de  $0.5 \text{ cm}^3$ . Después de cada adición rotar el contenido por 30 segundos, <sup>o</sup> aproximadamente. Mientras los sólidos permanecen en suspensión, remover una gota del líquido con el agitador y colocarla sobre el papel filtro. El punto final se alcanza cuando un anillo azul-verdoso aparece alrededor de los sólidos teñidos.
7. Cuando se alcanza el punto final, agitar por dos minutos y nuevamente colocar una gota del líquido sobre el papel filtro. Si el anillo azul-verdoso

está nuevamente en evidencia, se ha alcanzado el punto final. Si el anillo no aparece, continuar añadiendo azul de metileno hasta cuando se alcance el punto final y éste permanezca después de agitar por dos minutos adicionales. Registrar los  $\text{cm}^3$  de azul de metileno utilizados.

8. El intercambio de cationes del lodo debe registrarse como la capacidad de azul de metileno, calculada como sigue:

$$\text{Capacidad de azul de metileno} = \frac{\text{cm}^3 \text{ de azul de metileno}}{\text{cm}^3 \text{ de lodo}}$$

Nota.- La bentonita no es la única sustancia que absorbe azul de metileno en un fluido de perforación. La adición de peróxido de hidrógeno tiene por objeto eliminar el efecto de materiales orgánicos tales como CMC, poliacrilatos, lignosulfonatos y lignitos. El uso de peróxido de hidrógeno permite estimar el contenido de bentonita del lodo sin interferencia de otros materiales absorbentes. Los cálculos se hacen de la siguiente manera:

$$\text{Bentonita, ppb} = 5 \times \text{Capacidad de azul de metileno}$$

11.SOLIDOS.- El contenido de sólidos afecta la mayor parte de las propiedades de los lodos, incluyendo la densidad, viscosidad, esfuerzo de gel, pérdida de fluido y la estabilidad a la temperatura. El contenido de sólidos tiene también una influencia considerable sobre el tratamiento del lodo y sobre el equipo necesario para una perforación eficiente.

Para determinar la cantidad de sólidos y líquidos en un fluido de perforación se requiere el uso de una retorta (Fig.4.7). Una muestra del fluido de perforación se coloca en una cámara de acero de un volumen determinado y se calienta, vaporizando los componentes líquidos. Los vapores pasan a través de una unidad de condensación y el líquido es recolectado en una probeta graduada, calibrada en porcentaje. El volumen de líquido se mide en porcentaje y todos los sólidos, ya sean suspendidos o los disueltos, se determinan por diferencia.

#### PROCEDIMIENTO.-

1. Limpiar y secar la cámara antes de cada uso. Asegurarse que el interior de la cámara permanece uniforme. Para facilitar el siguiente proceso de limpieza, aplicar una película de silicia resistente a altas temperaturas sobre el interior de la cámara.

2. Obtener una muestra recién agitada, asegurándose que todo el aire y gas haya sido liberado.

Nota.- Para remover el aire atrapado, añadir 2 a 3 gotas de antiespumígeno a 300 cm<sup>3</sup> de lodo. Agitar la muestra lentamente para liberar el aire atrapado.

3. Depositar 10 cm<sup>3</sup> del lodo liberado de aire en la cámara de la retorta.

4. Colocar la tapa sobre la cámara y limpiar el exceso de lodo que sale a través del orificio.

Nota.- El orificio no debe ser obstruido.

5. Remover la tapa cuidadosamente, raspando su cara inferior contra el borde de la cámara.

6. Colocar 3 a 4 gotas de "esponja de acero líquida" sobre la superficie del lodo y atornillar el resto de la unidad a la cámara.

7. Añadir una gota de antiespumígeno.

8. Seleccionar el elemento térmico apropiado (dependiendo del voltaje) y envolver su extremo inferior con esponja metálica fina.

9. Armar el elemento térmico sobre la unidad y acoplar con la unidad de compensación.
10. Colocar una probeta graduada bajo la espiga de la unidad de condensación y conectar la retorta (la probeta debe estar calibrada en porcentaje).
11. Dejar que la retorta caliente hasta que la condensación cese y luego permitir 10 minutos de calentamiento adicional.
12. Si la muestra contiene petróleo, una gota de agente humectante promueve la separación de las gotículas de petróleo y agua.
13. Leer el volumen de petróleo y agua recolectados.
14. Tanto los sólidos suspendidos, como los sólidos disueltos serán retenidos en la retorta. Deben hacerse conexiones para lodos con alto contenido de sal. El volumen de sal puede ser estimado del análisis de cloruros del filtrado a través de la siguiente tabla:



Contenido de cloruro (mg/lt)	Sal % volúmen	Peso específico
5,000	0.3	1.004
10,000	0.6	1.010
20,000	1.2	1.021
30,000	1.8	1.032
40,000	2.3	1.043
60,000	3.4	1.065
80,000	4.5	1.082
100,000	5.7	1.098
120,000	7.0	1.129
140,000	8.2	1.149
160,000	9.5	1.170
180,000	10.8	1.194
188,650	11.4	1.197

El porcentaje de volúmen de sal en el fluido de perforación es igual al porcentaje de volúmen de sal encontrado en la tabla anterior multiplicado por el volúmen de la fracción agua en el lodo.

12.ARENA.- Arena, por definición de la API, abarca las partículas de tamaño mayor que una malla 200 (74 micrones).

El objetivo de esta prueba es prevenir el efecto abrasivo de una alta concentración de arena en el lodo. Las partes del equipo más expuestas a la abrasión por la arena del lodo son las bombas, la tubería de perforación y las brocas. Un contenido alto de arena puede originar costras muy gruesas y permeables que pueden asentarse en el pozo cuando se interrumpe la circulación.

PROCEDIMIENTO.-

1. Obtener una muestra de lodo recientemente agitada.
2. Llenar el recipiente de vidrio hasta la marca "lodo hasta aquí" (Fig. 4.8).
3. Añadir agua clara hasta la marca "agua hasta aquí".
4. Cubrir la boca del recipiente con el dedo pulgar y sacudir vigorosamente.
5. Verter la mezcla sobre la malla del cedazo. Añadir más agua al recipiente, sacudir y nuevamente verter sobre la malla. Repetir este proceso hasta que el agua quede completamente clara.
6. Colocar el embudo boca abajo sobre el extremo superior del cedazo y cuidadosamente invertir la unidad. Colocar el embudo en la boca del recipiente de vidrio y lavar la arena rociando agua sobre la malla.
7. Permitir que la arena se precipite y registrar el porcentaje de arena por volúmen, tomando la lectura directamente del recipiente graduado. El

lugar de procedencia de la muestra también debe ser registrado.

#### 4.1.4. REOLOGIA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

##### 1. Definición e Importancia

Reología, es la ciencia que trata del estudio de la deformación y flujo de fluidos.

La reología de un fluido de perforación es importante en las siguientes determinaciones:

- a) Cálculo de la caída de presión en la tubería ó en la región anular.
- b) Cálculo de la contrapresión cuando se está bajando ó sacando tubería.
- c) Determinar la densidad equivalente de circulación del fluido de perforación.
- d) Estimar la magnitud de la erosión del pozo.
- e) Estimar la eficiencia en la limpieza del pozo.
- f) Determinar la velocidad del lodo en las boquillas y pérdidas de carga en la broca.

## 2. Conceptos Básicos

### a) Regímenes de flujo:

a.1) Flujo Laminar.- El movimiento del fluido es paralelo a las paredes del canal de flujo. Las partículas del fluido se mueven en línea recta ó curvas suaves. En el flujo laminar las fuerzas requeridas para mover el fluido, se incrementan con el aumento de la velocidad y viscosidad.

a.2) Flujo Turbulento.- El fluido está continuamente en remolinos a medida que se mueve en el canal de flujo. Existe un movimiento promedio del fluido en una dirección particular, pero las partículas individuales se mueven en círculos y curvas al azar. Estas fluctuaciones de velocidad se suceden espontáneamente y no son causadas por la rugosidad de pared ó cambios en la dirección del flujo.

Sin embargo, estos factores pueden aumentar la cantidad de turbulencia. El flujo tiende a ser turbulento cuando es rápido ó tiene baja viscosidad. A una velocidad particular, el flujo tiende a ser turbulento en canales de

flujo largos. En el flujo turbulento, la fuerza requerida para mover el fluido aumenta linealmente con la densidad y el cuadrado de la velocidad.

- a.3) Velocidad de Transición. - Es la velocidad a la cual el flujo cambia entre laminar y turbulento. La transición entre fluido laminar y turbulento se controla mediante las fuerzas viscosas e inerciales en el fluido; y ocurre debido a que dichas fuerzas varían con el cuadrado de la velocidad del flujo, mientras que las fuerzas viscosas varían solamente con la velocidad del fluido. La relación entre las fuerzas inerciales y viscosas está dada por el Número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) :

$$N_{Re} = \frac{Dv\rho}{\mu}$$

donde :

D = diámetro del canal de flujo

v = velocidad de flujo promedio

$\rho$  = densidad del fluido

$\mu$  = viscosidad del fluido

b) Viscosidad de corte y esfuerzo de corte

b.1) Velocidad de corte. - Velocidad a la cual una partícula del fluido se desliza sobre otra dividida por la distancia entre ellas. Esto es la gradiente de velocidad en el fluido.

Como ejemplo, podemos considerar dos placas lisas paralelas separadas 1 cm. de distancia, estando el espacio entre ellas ocupada por un fluido. Si la placa inferior permanece fija, mientras la otra se desliza paralela a ella a la velocidad constante de 1 cm/seg, las velocidades indicadas en la Fig. 4.9 se encontrarán en la capa de fluido. El fluido cerca a la capa inferior está casi moviéndose, mientras que el fluido que está cerca a la placa superior se mueve casi a 1 cm/seg. A mitad de camino entre las placas, la velocidad de flujo es el promedio: 0.5 cm/seg.

El gradiente de velocidad es proporcional al cambio de velocidad ( $\Delta v$ ) con la distancia de la pared ( $h$ ). En el caso de la figura 4.9, la velocidad de corte es:

$$\frac{v}{h} = \frac{1 \text{ cm/seg}}{1 \text{ cm}} = \frac{1}{\text{seg}}$$

siendo la inversa del segundo la unidad standard de la velocidad de corte.

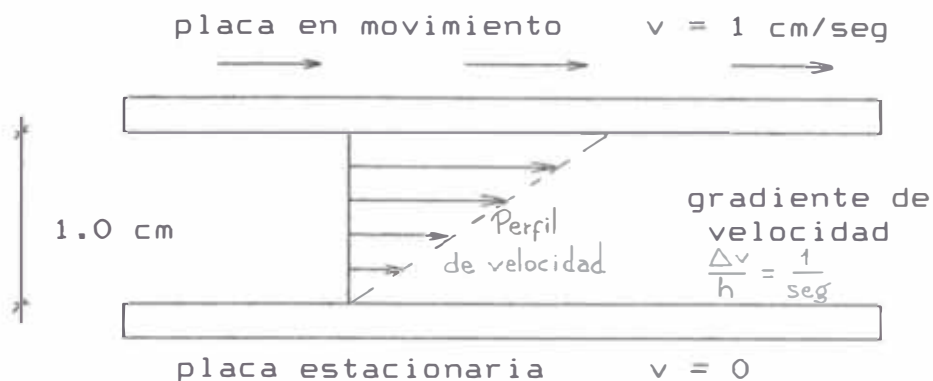


Fig.4.9 Placas paralelas mostrando la razón de corte en un depósito lleno con fluido, mientras una se desliza sobre otra estacionaria.

Como la velocidad de corte no es constante a través del fluido, en flujo laminar en una tubería; la velocidad de corte es mayor cerca a la tubería. Se puede usar un promedio de velocidad de corte, debido a que el corte en sí no es constante en cualquier lugar del flujo.

Definiendo la velocidad de corte ( $\gamma$ ), como un gradiente de velocidad, obtenemos :

$$\gamma = \frac{dv}{dr} ; \quad \text{donde: } v = \text{Velocidad} \\ r = \text{Distancia}$$

La  $\gamma$  obtenida a partir de viscosímetros de cilindros concéntricos, usados en trabajos de fluidos de perforación es análogo a  $\gamma$  en la tubería ó pared del anular ( $\gamma_w$ ). La velocidad de corte en una tubería puede ser expresada como una función (f) del promedio de velocidad (v) y el diámetro de la tubería (D).

$$\gamma_w = \frac{f(8v)}{D}$$

en la cual :

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

donde:

Q = velocidad de flujo volumétrico

A = área transversal de la sección

En un anular de diámetro exterior ( $D_2$ ) y diámetro interior ( $D_1$ ), la velocidad de corte en la pared puede expresarse como:

$$\gamma_w = f \frac{(12v)}{D_2 - D_1}$$

en la cual:

$$v = \frac{4Q}{(D_2^2 - D_1^2)}$$



Estas expresiones dependen del modelo matemático que relacione el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

b.2) Esfuerzo de corte.- Está relacionado a la fuerza requerida para mantener un flujo determinado de un fluido en particular. Es la fuerza por unidad de área y también puede ser considerado como un momento de flujo a través de un área dada. Suponer, en el ejemplo de la Fig.4.9 que una fuerza de una dina es aplicada a cada  $\text{cm}^2$  de la placa superior para mantener su movimiento. Luego el esfuerzo de corte será de  $1 \text{ dina/cm}^2$ . La misma fuerza en dirección opuesta se necesitará sobre la placa inferior para evitar su movimiento.

El mismo esfuerzo de corte de  $1 \text{ dina/cm}^2$  encontrará a cualquier nivel en el fluido y será constante solamente a medida que la geometría del sistema de flujo sea constante.

El esfuerzo de corte ( $\tau$ ), se puede expresar como:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

donde:  $F =$  Fuerza  
 $A =$  Area de superficie al  
 esfuerzo

En una tubería de diámetro  $D$ , la fuerza que presiona a una columna de líquido a través de la tubería se puede expresar como la presión ( $P$ ) sobre el final de la columna de líquido multiplicada por el área de la misma sección:

$$F = \frac{P \pi D^2}{4}$$

El área de la superficie del fluido en contacto con la tubería a través longitud ( $L$ ) está dada por:

$$A = \pi D L ;$$

tal que el esfuerzo de corte en la pared de la tubería puede expresarse como:

$$\tau_w = \frac{F}{A} = \frac{P \pi D^2}{4} \times \frac{1}{\pi D L} = \frac{D P}{4 L}$$

En un espacio anular, el esfuerzo de corte se puede desarrollar de la misma forma:

$$F = \frac{P \pi D_2^2}{4} - \frac{P \pi D_1^2}{4} = \frac{P \pi (D_2^2 - D_1^2)}{4}$$

$$y : A = \pi D_2 L + \pi D_1 L = \pi L (D_2 + D_1)$$

tal que :

$$\tau_w = \frac{F}{A} = \frac{P \pi (D_2 - D_1)}{\pi L (D_2 + D_1)} \times \frac{(D_2 + D_1)}{4}$$

$$\tau_w = \frac{P(D_2 - D_1)}{4L}$$

La velocidad de corte está relacionada a la velocidad de movimiento y el esfuerzo de corte a las fuerzas, siendo ambas transmitidas al fluido de un punto a otro.

### c) Tipos de fluidos

c.1) Fluidos newtonianos.- Son aquellos fluidos en los cuales el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte; por ejemplo, el agua. La relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte es la viscosidad del fluido.

c.2) Fluidos no newtonianos.- Son aquellos que no presentan una relación lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, cuando están en flujo laminar.

c.2.1) Fluidos acondicionados al corte. - Son la mayoría de los fluidos de perforación, esto es, que en flujo laminar se acondicionan más a altas velocidades de corte que a bajas velocidades de corte. La diferencia entre fluidos newtonianos y fluidos acondicionados por corte puede ser ilustrada en términos de viscosímetro de cilindros concéntricos aceptado por el API (Fan VG Meter). Si la lectura del dial a 600 rpm es el doble que la de 300 rpm, el fluido presentará comportamiento de fluido newtoniano. Si la lectura del dial a 600 rpm es menor que el doble de la de 300 rpm, el fluido será condicionado al corte.

Algunos fluidos acondicionados al corte empezarán a fluir tan pronto como cualquier fuerza ó presión sea aplicada, prescindiendo de cuan leve sea; tales fluidos son denominados pseudoplásticos. Otros fluidos que alteran su viscosidad con la velocidad de corte tienen estructura de gel y requieren de una fuerza ó presión definida para comenzar a fluir. La magnitud de dicha fuerza es

conocida como la fuerza de gel (gel strength).

c.2.2) Fluidos Tixotrópicos.- Algunos fluidos

de perforación pueden desarrollar estructura de gel después de un período sin velocidad de corte ó casi sin ella. Si se inicia el bombeo la agitación, el gel se rompe y el fluido se torna menos viscoso, comportándose como un pseudoplástico mientras está en movimiento; si se gelifica nuevamente al estar detenido, se dice que es un fluido tixotrópico.

c.2.3) Fluidos de Perforación.- Estos fluidos

son complejos. Algunos polímeros y detergentes reducen la caída de presión en la tubería, extendiendo el régimen de flujo laminar por reducción de la fricción con las paredes de la tubería.

Las propiedades de los fluidos de perforación son afectados por el factor tiempo, temperatura y presión. Su reología es controlada por la química de las fases continua y discontinua, así como sus interacciones. La viscosidad

plástica, punto de fluencia y valores de gel son usados como guía para acondicionar el lodo, hasta alcanzar las propiedades reológicas deseadas.

Es de suma importancia reconocer la composición del lodo y las condiciones bajo las cuales determinan su función.

### 3. Modelos de Flujo

La relación esfuerzo de corte velocidad de corte para un fluido newtoniano se describe con una ecuación matemática simple. Para determinar exactamente reograma para un fluido newtoniano es necesario ~~no~~ solamente conocer el esfuerzo de corte a una sola velocidad de corte. Se grafica entonces ese punto en papel de coordenadas rectangulares y se traza una recta que pasa por ese punto y el origen.

Para determinar exactamente el reograma de un fluido no newtoniano, es necesario utilizar un viscosímetro de velocidad infinitamente variable, que solo se encuentra en los laboratorios. No hay una ecuación matemática que describa precisamente la reología de todos los lodos, pues son muy variados y complejos. En cambio, se han propuesto varias ecuaciones que se aproximan en cierto grado a la verdadera relación

esfuerzo de corte      velocidad de corte. Estas ecuaciones reciben el nombre de MODELOS REOLOGICOS. Un buen modelo reológico debe tener las siguientes propiedades:

1. Debe aproximarse estrechamente a la relación verdadera esfuerzo de corte - velocidad de corte.
2. Debe basarse en mediciones que puedan realizarse en el campo, en forma rutinaria.
3. Debe ser suficientemente simple, de modo que los cálculos y las inferencias que se basan en el modelo puedan aplicarse en el campo.

Estos modelos proveen una manera para convertir la relación esfuerzo de corte      velocidad de corte a datos usuales. En la parte b) de la sección 4.1.4.2, se muestra que para un flujo laminar el esfuerzo de corte de pared es una función de la caída de presión y geometría del conducto; y no depende de la naturaleza del fluido. Inversamente se demuestra que la velocidad de corte en la pared, depende de las propiedades del fluido, así como de la geometría del conducto, de tal manera que los diferentes modelos generan diferentes expresiones para velocidad de corte en la pared.

a) Modelo Newtoniano.- Para los fluidos newtonianos, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Matemáticamente, los fluidos newtonianos satisfacen la ecuación:

$$\text{Esfuerzo de corte } (\tau) = m \times \text{Velocidad de corte } (\dot{\gamma})$$

donde  $m$  es constante a todas las velocidades de corte y representa la viscosidad del fluido newtoniano en cuestión.

Si se grafica la viscosidad en papel de coordenadas rectangulares como una función de la velocidad de corte (reograma), se obtendrá una línea horizontal (Fig. 4.10).

En unidades de campo, se acostumbra a medir el esfuerzo de corte en lbs/100 pies cuadrados, mediante el viscosímetro Fann. La relación matemática es:

$$\tau = 1.067 \times (\text{lectura})$$

donde :  $\tau$  = esfuerzo de corte,  
lbs/100 pies<sup>2</sup>

Lectura = marca leída en el dial del viscosímetro



El valor de la viscosidad efectiva está dado por la relación:

$$m = \frac{511 \times (\text{lectura})}{\dot{\gamma}}, \text{ cps}$$

donde  $\dot{\gamma}$  = velocidad de corte,  $\text{seg}^{-1}$

se tiene que :

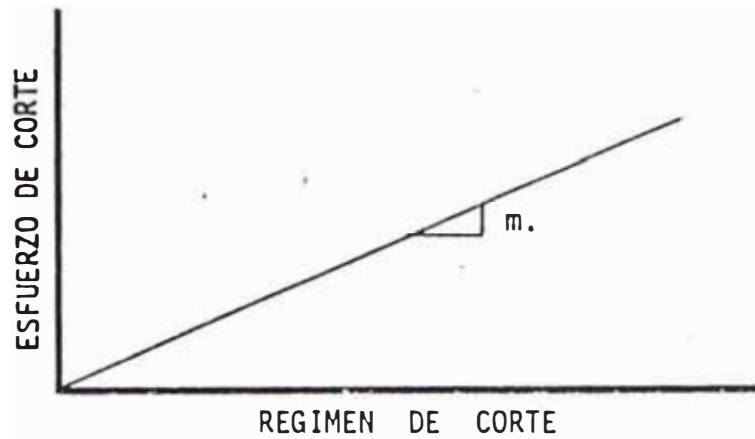
$$\dot{\gamma} (\text{seg}^{-1}) = 1.703 \times \text{rpm}, \text{ entonces}$$

$$m = \frac{300 \times (\text{lectura})}{\text{rpm}}$$

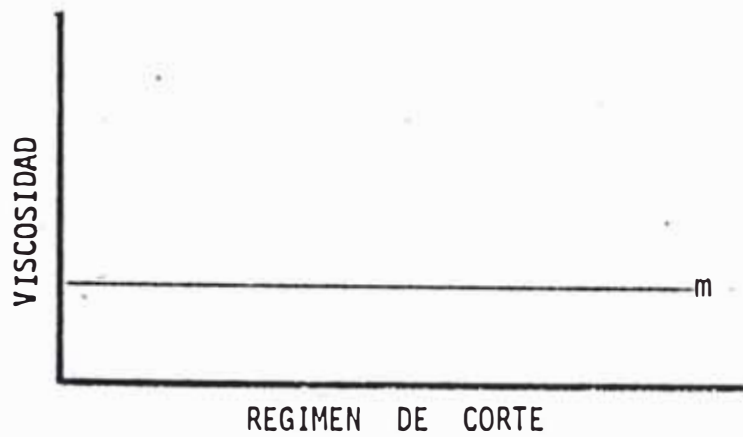
b) Modelo no Newtoniano (Fig. 4.11).-

1) Modelo plástico de Bingham.- Es el modelo que más se utiliza en el campo (Fig. 4.12). Es el modelo más simple para fluidos no newtonianos, y, a pesar de ello, provee habitualmente una base excelente para el tratamiento del lodo.

El modelo se apoya en datos suministrados por un viscosímetro Fann VG meter de dos velocidades. La lectura en el dial del Fann a 600 y 300 rpm se grafican en papel de coordenadas rectangulares.

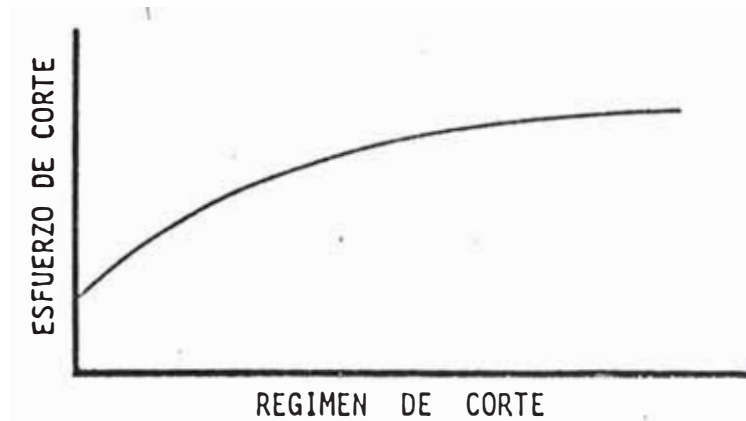


Esfuerzo de corte vs. régimen de corte para fluidos newtonianos.

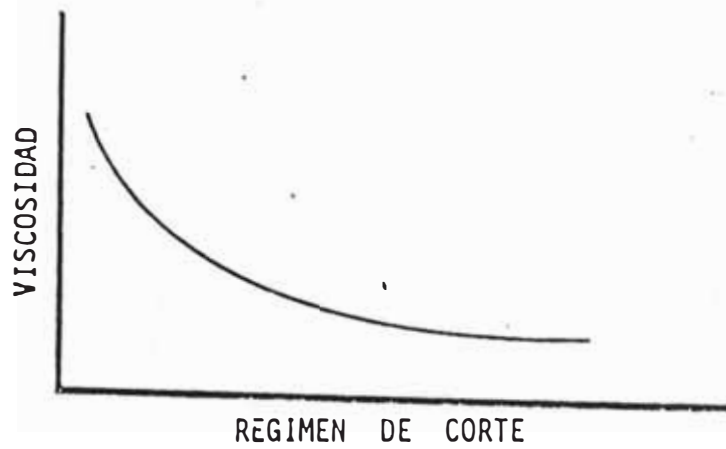


Viscosidad vs. régimen de corte para fluidos newtonianos.

Fig. 4.10



Esfuerzo de corte vs. régimen de corte para un lodo de perforación. (Fluido No Newtoniano)



Viscosidad vs. régimen de corte para un lodo de perforación. (Fluido No Newtoniano)

Fig. 4.11

Los dos parámetros en el modelo plástico de Bingham son la viscosidad plástica (VP) y el punto de cedencia (YP). Esos valores se determinan fácilmente de las lecturas del dial en el Fann,  $F_{600}$  y  $F_{300}$  a 600 y 300 rpm, respectivamente.

$$VP = F_{600} - F_{300}$$

$$YP = F_{300} - VP$$

El viscosímetro VG está diseñado de tal manera que esas ecuaciones dan el valor de VP en centipoises y el de YP en libras por 100 pies cuadrados.

La ecuación de la recta puede expresarse en términos de los dos parámetros señalados:

$$\tau = YP + (VP/300)\omega$$

Esta es la ecuación para el modelo plástico de Bingham. Si se piensa momentáneamente en términos que 300 rpm constituyen una unidad en el eje horizontal, resulta que VP viene a ser la pendiente y YP el valor de la ordenada en el origen (intersección con el eje vertical).

A pesar del hecho de que la viscosidad plástica y el punto de cedencia han demostrado ser parámetros marcadamente eficaces sobre los cuales puede basarse el tratamiento de lodos, este modelo presenta algunos defectos. Esto se explica, ya que las velocidades de corte en el espacio anular están frecuentemente en un rango que correspondería a velocidades de Fann por debajo de 60 rpm; ese es un rango en el que el modelo plástico de Bingham no se aproxima a los valores de la verdadera reología del lodo.

2. Modelo de la Ley Exponencial.- Si los datos de esfuerzo de corte y velocidad de corte se grafican en papel de coordenadas rectangulares (Fig. 4.13), se puede comprobar que no hay una curva simple que conecte todos esos puntos.

Por cierto, la recta que pasa por las lecturas a 600 y 300 rpm (modelo plástico de Bingham), no se acerca a los puntos graficados en las velocidades de corte inferiores. Sin embargo, si se emplea papel log-log para graficar los datos, se comprueba que la línea recta que pasa por las lecturas a 600 y 300 rpm, pasa también muy cerca de los restantes puntos.

Una línea recta en papel log-log se denomina "curva exponencial" y corresponde a una ecuación algebraica de la forma:

$$F = K R^n$$

Por lo tanto, este modelo reológico se conoce como la ley exponencial. Sus parámetros son  $n$  y  $k$ . El parámetro  $n$  es el "índice de comportamiento" del flujo laminar. Para un fluido newtoniano,  $n = 1$ ; para los lodos es siempre inferior a 1. Cuanto más bajo es el valor de  $n$ , menos newtoniano es el lodo.

El parámetro  $k$ , es el "factor de consistencia" del flujo laminar. Se le considera como similar a la viscosidad plástica, dado que un aumento de  $k$  indica, generalmente, un aumento en la concentración de sólidos ó una disminución en el tamaño de las partículas. El mejor método para hacer bajar  $k$  es el estricto control de sólidos.

Los valores de  $k$  y  $n$  para un lodo, se determinan por medio de las lecturas de dial del Fann a 600 y 300 rpm. Para la formulación de la ley exponencial,  $k$  está dado en  $\text{lbs}/100 \text{ pies}^2 (\text{rpm})^n$ . El número  $n$  carece de dimensiones.

Todo reograma para la ley exponencial aparece como una línea recta en papel log-log. La pendiente de esa recta es  $n$ , y su intersección con el eje vertical para  $\tau = 1$  es  $k$ . Si el reograma fuese en cambio graficado en papel de coordenadas rectangulares, no sería una línea recta.

Las relaciones matemáticas empleadas para la determinación de los parámetros  $k$  y  $n$  son:

$$k = \frac{5.11 \times F_{300}}{(511)^n}, \text{ poises}$$

$$k = \frac{1.067 \times F_{300}}{(511)^n}, \text{ lb-seg/100 pies}^2$$

$$n = \frac{3.32 \times \log F_{600}}{F_{300}}$$

3. Modelo de la Ley Exponencial Modificada.- La ley exponencial modificada es similar a la ley exponencial, excepto que tiene en cuenta un ESFUERZO DE CEDENCIA POSITIVA,  $G_0$ , que es un cierto grado de resistencia interna que debe ser vencida para que el lodo comience a fluir. Este efecto no es considerado por la ley exponencial, representando un defecto de dicha ley.

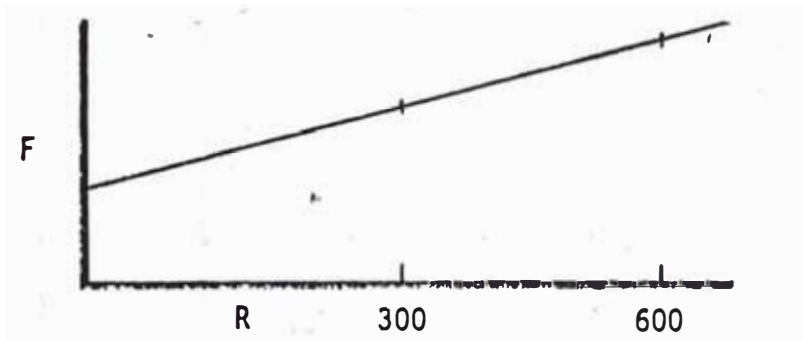


Fig. 4.12 Modelo plástico Bingham

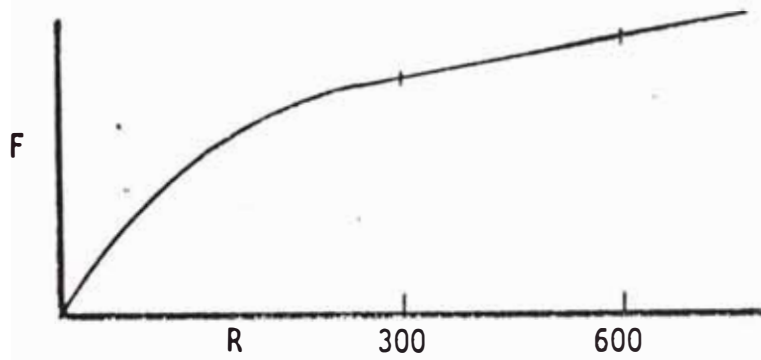


Fig. 4.13 Ley exponencial en coordenadas rectangulares.

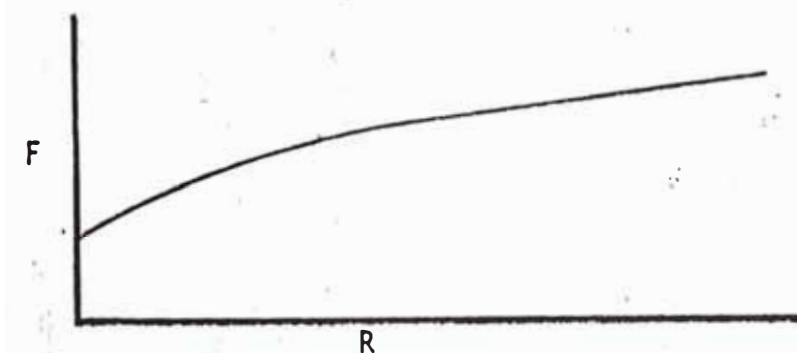


Fig. 4.14 Ley exponencial modificada en coordenadas rectangulares.



La Ley Exponencial Modificada (Fig. 4.14) está dada por la siguiente relación:

$$F = G_0 + k R^n$$

Tal como ocurre en la ley exponencial,  $n$  es una medida de la capacidad del fluido para reducir la viscosidad por corte y  $k$  es una medida de los sólidos. Sin embargo, los valores de  $n$  y  $k$  serán usualmente diferentes para las dos leyes, exponencial y exponencial modificada.

La ley exponencial modificada es un modelo que se aproxima más estrechamente al comportamiento reológico verdadero de la mayoría de los lodos; pero que no se aplica en Petróleos del Perú O.N.O.

#### 4.1.5. FLUIDOS DE PERFORACION - BASE POLIMERO

Desde hace varias décadas se dispone comercialmente de polímeros solubles en agua; sin embargo, durante años, tanto su costo relativamente alto como la resistencia del personal de campo a recurrir a ellos, limitaron su uso. La falta de conocimiento y apreciación de los polímeros sus propiedades se encargaron de restringir la selección del mejor polímero para cada aplicación específica. E

actualidad los polímeros son reconocidos como componentes importantes de los fluidos de perforación.

Los polímeros poseen pesos moleculares elevados y cuando son adicionados al agua en pequeñas concentraciones, incrementan la viscosidad de la misma resultando un fluido con capacidad para suspender partículas, acarrear detritos y controlar la pérdida de agua a través de membranas permeables.

La mayor ventaja que ofrece el uso de polímeros, es que estas substancias imparten viscosidades máximas para un contenido de sólidos mínimos. Es ésta la cualidad que los ha convertido en los aditivos por excelencia para aquellos casos en que se desee preservar las formaciones productivas de daños producidos por sólidos contenidos en el fluido de perforación, el cual en la mayoría de los casos resulta imposible de reparar en su totalidad.

El empleo de polímeros, como aditivos para fluidos de perforación, data de aproximadamente 30 años, estando circunscripto su empleo como reductores de filtrado exclusivamente. Recién en la década pasada su uso se hizo extensivo, pudiendo hoy disponer de una gran cantidad de éstos productos de acuerdo con las siguientes propiedades fundamentales:

1. Viscosificantes
2. Floculantes
3. Agentes para control de filtrado
4. Agentes estabilizadores de arcillas
5. Defloculantes

Haciendo referencia a estas propiedades, podemos citar los siguientes productos que son de uso más corrientes: Goma Guar, Goma Xanathan, Almidón, Poliacrilatos, Celulosas, Poliacrilamidas, Celulosas Polianiónicas, derivados del Anhídrido Maleico, etc.

## 4.2 TECNOLOGIA GENERAL

### 4.2.1 POLIMEROS

La palabra proviene del griego polys, que significa muchos; y meros, que significa partes segmentos. De aquí concluimos que un polímero viene a ser una gran molécula que consta de simples y pequeñas unidades químicas repetidas. Esta pequeña unidad es llamada monómero y generalmente tiene un peso molecular pequeño. Los polímeros, en términos estrictos, deben tener un peso molecular mayor de 10,000 y por lo menos 1,000 unidades repetidas.

El peso molecular es proporcional al grado de polimerización,  $(DP)_n$ , que corresponde al número de

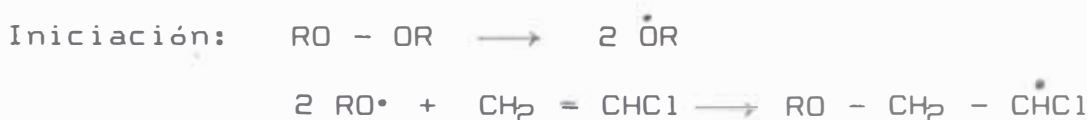




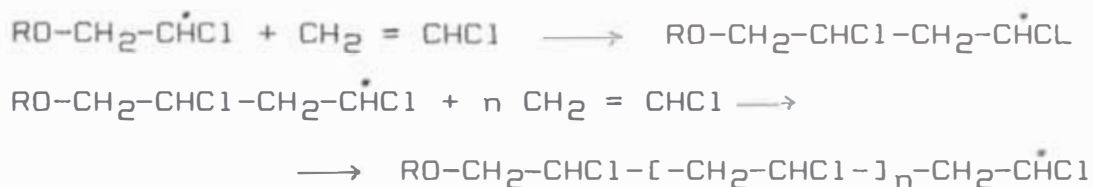
La terminación ocurre cuando dos cadenas chocan y se unen, ó, mediante la transferencia de un átomo de hidrógeno como un radical libre para reaccionar con la parte reactiva de la cadena en crecimiento.

Las reacciones de polimerización por adición producen polímeros de pesos moleculares más altos que los producidos por condensación, por lo que presentan propiedades físicas y mecánicas diferentes. La reacción se produce a una tasa cinética muy alta y por lo general es exotérmica. La polimerización se controla con la concentración del iniciador, la temperatura durante la reacción y el tipo y concentración del monómero.

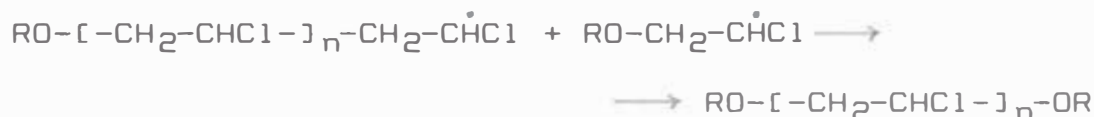
A continuación tenemos un ejemplo de la polimerización por adición del cloruro de vinilo:



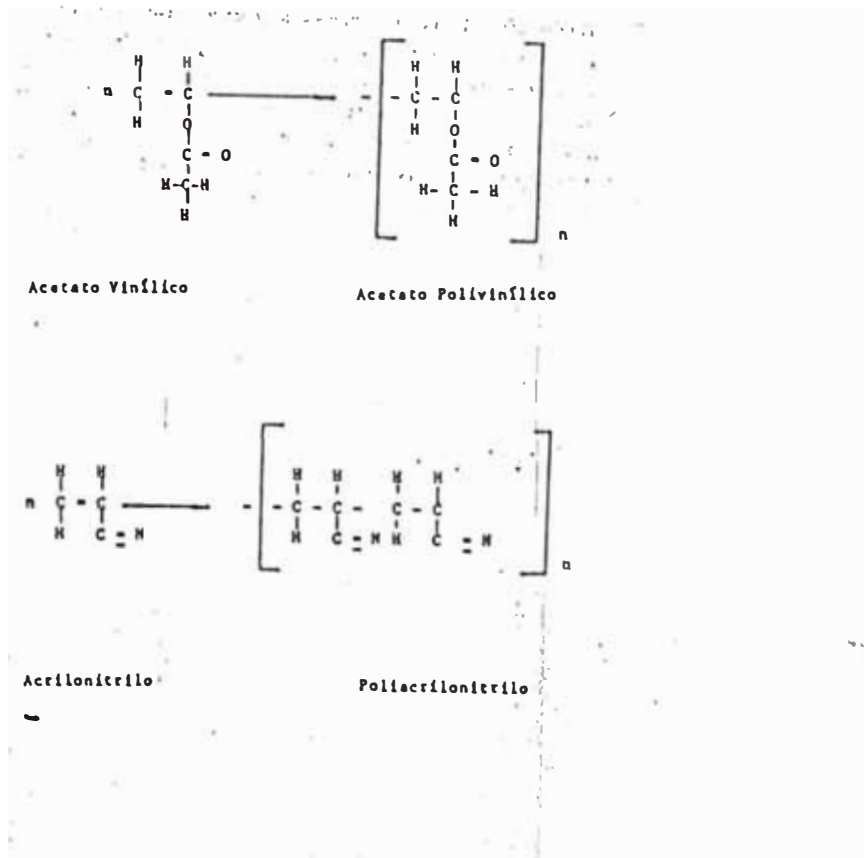
Propagación:



Terminación:



Los mismos esquemas se cumplen para el acetato de polivinilo y el poliacrilonitrilo:



La polimerización de dos monómeros diferentes para conformar un copolímero involucra una estructura más complicada. Esta estructura contiene al monómero distribuido a lo largo de la cadena, y pueden existir cuatro configuraciones básicas:

Aleatoria: A - B - B - B - B - A - B - A - B - B - A

Alternada: A - B - A - B - A - B - A - B - A - B - A

Bloque: A - A - A - B - B - B - A - A - A - B - B

Ramificada: A - A - A - A - A - A - A - A - A - A - A

|  
B  
|  
B  
|  
B  
|  
B

|  
B  
|  
B  
|  
B  
|  
B

Polimerización por condensación . En contraste con la polimerización por adición, donde la estructura de los monómeros básicos se mantienen en el polímero, la polimerización por condensación da como resultado un polímero con unidades que contienen menos átomos que los monómeros utilizados originalmente. Durante la reacción de polimerización por lo general se elimina agua, dióxido de carbono y amonio.

El proceso no requiere un iniciador y tampoco necesita un doble enlace de carbono-carbono. Asimismo, es más eficiente y fácil de controlar que la polimerización por adición. Típicamente éste tipo de polímeros se forman por la reacción de un ácido orgánico y un alcohol ó un ácido anhídrico y un alcohol.

A muchos polímeros por condensación se los considera películas fibras Por ejemplo nylon, melamina, dacrón, poliéster y siliconas. Algunos polímeros por condensación de ácidos grasos se usan como dispersantes en lodos de base aceite.

#### 4.2.2 CLASIFICACION DE LOS POLIMEROS

Los polímeros pueden clasificarse de acuerdo a origen, estructura y utilidad.



4.2.2.1 POR SU ORIGEN .- Desde el punto de vista de su origen los polímeros pueden ser:

a) Naturales .- Son aquellos que se encuentran en la naturaleza, y, por lo común son muy complejos, presentándose en unidades repetidas no siempre conocidas.

Los polímeros naturales (carbohidratos polisacáridos) son moléculas preformadas que contienen grupos hidrofílicos pero no son del todo solubles en agua. La solubilidad en agua de los polisacáridos está determinada por características estructurales tales como el ramificado, los grupos ionizables, la posición de los enlaces y la no uniformidad en la estructura repetitiva.

Las modificaciones químicas de los polímeros naturales inciden en el mejoramiento de una ó más de las características estructurales mencionadas anteriormente.

Entre los polímeros naturales más comunes tenemos al almidón, goma guar, goma de algarroba y biopolímeros.

Almidón .- El almidón es el polímero natural más comunmente usado. Fué introducido como agente de

control de pérdida de filtrado a fines de los años treinta.

El almidón es peptizado pregelatinizado para mejorar la solubilidad ó dispersión en los sistemas acuosos. La pregelatinización consiste en calentar el almidón en presencia de catalizadores ácidos básicos para romper la cubierta exterior de la celda de almidón.

La cubierta exterior constituye el factor limitante en la hidratación del almidón en lodos de perforación. Las fuentes más comunes del almidón utilizado en perforación son el maíz, la papa y la mandioca.

El almidón está conformado por dos componentes principales: la amilopectina y la amilosa. La amilosa (Fig.4.15) es un polímero de cadena recta de monómero  $\alpha$ -1-4 glucósido. Tiene un peso molecular promedio de 10,000 a 200,000. La amilosa da un color azul con yodo y solo es soluble, aunque muy poco, en agua caliente. Se precipita al enfriarse y cuando permanece estática (retrogradación). La retrogradación es el resultado de la tendencia de la cadena de amilosa a formar estructuras helicoidales; promediando seis monómeros por vuelta. Las moléculas helicoidales se alinean solas por el enlace hidrógeno

y se agregan en dimensiones coloidales de un tamaño lo suficientemente grande como para precipitarse.

La amilopectina (Fig. 4.16) es una molécula altamente ramificada, con un peso molecular de 50,000 a 6'000,000. Se disuelve por completo en agua, no se retrograda y con el yodo produce un color rojo-violeta.

El almidón de diferentes fuentes posee proporciones casi idénticas de amilosa y amilopectina, con 22-26% del primero y 74-78% del segundo.

El almidón utilizado en fluidos de perforación es insustituído, no es iónico, tiene una columna lineal y es soluble en altas concentraciones de sal.

La popularidad del almidón se debe sobre todo a su bajo precio, comparado con el de otros reductores de pérdida de filtrado poliméricos. No obstante, tiene dos limitaciones importantes:

1. Se degrada fácilmente por la acción de bacterias, y
2. La degradación térmica ocurre a temperaturas inferiores a 225°F.

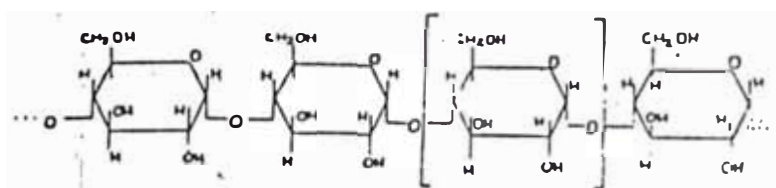


Fig. 4.15. AMILOSA

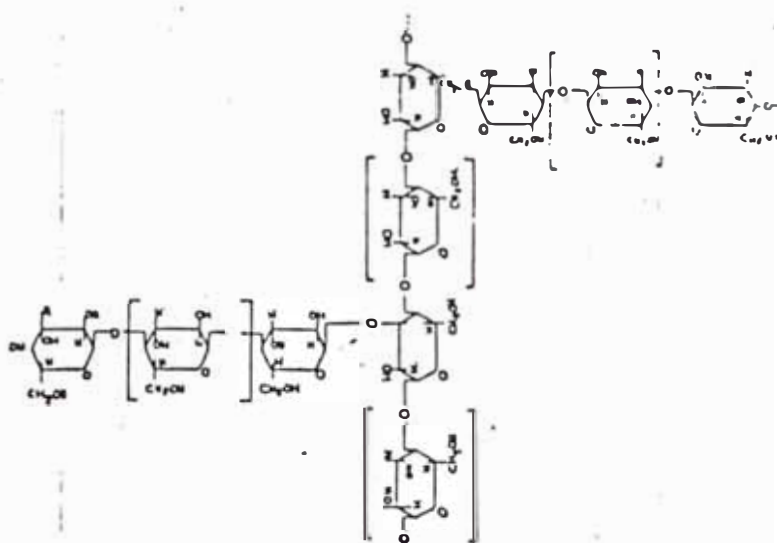


Fig. 4.16. AMILOPECTINA

El almidón, aparte de ser un agente de control de pérdida de filtrado, también contribuye a la inhibición de las lutitas. Actúa sinérgicamente con un inhibidor de hidratación como las sales de potasio para estabilizar las arcillas lutíticas. El mecanismo se conoce como sensibilización. En presencia de iones de potasio, la arcilla se hincha menos y el almidón efectivamente adsorbe y floccula el material arcilloso previniendo la dispersión y el desprendimiento.

Continuamente se procura hacer modificaciones químicas a los almidones para mejorar la estabilidad térmica y bacteriana. Se cree que un almidón modificado de papa pretratado con bactericida mejorará la estabilidad térmica y la resistencia a la fermentación. El producto de Texaco, Morrex, es un almidón de maíz hidrolizado enzimáticamente que en lo esencial resulta maltodextrina. Las dextrinas son más solubles en agua y producen menos viscosidad que el almidón.

Goma Guar .- Es un polisacárido no iónico que se produce naturalmente, de un peso molecular cercano a 220,000. La estructura de la goma guar muestra ramificaciones (Fig. 4.17). El polímero está compuesto por manosa y galactosa.

Las unidades de manosa están conectadas entre ellas mediante enlaces beta-glucósidos y las ramificaciones de galactosa se realizan a través de enlaces alfa (  $\alpha$  ). El polisacárido es no iónico, se hidrata en diferentes tipos de mezclas de agua y es altamente compatible con cloruros metálicos monovalentes. Con los cloruros metálicos multivalentes, la tolerancia de sal se ve afectada por la concentración de sal y pH.

La goma guar se degrada térmicamente por encima de los 175°F. La degradación se manifiesta por descomposición (ruptura) del enlace acetal entre los monómeros de manosa. Como el corte es aleatorio, se producen cadenas de longitud variable. La goma guar es más estable con el pH alcalino. En presencia del 5% de HCl se produce una rápida descomposición en el enlace acetal y de eso resulta la despolimerización.

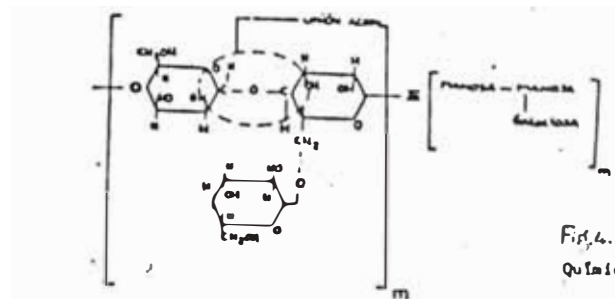


Fig. 4.17. Estructura Química de Goma Guar

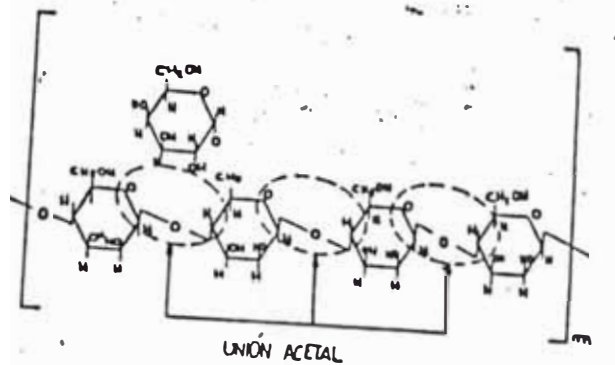


Fig. 4.18. Estructura de Goma Algarroba

Como el almidón, la goma guar es susceptible de ataque bacteriano y requiere el uso de un bactericida para obtener la estabilidad. En la disolución dispersión del polímero se forman "ojos de pescado". El polímero se hidrata antes de que las partículas se dispersen bien.

Un tratamiento con un dialdehído con el glioxal demora la hidratación previniendo la formación de "ojos de pescado". El entrecruzamiento (cross-linking) con iones de metales de transición como el antimonio, titanio, circonio, etc., también contribuye a lograr hidratación y dispersión uniformes.

La goma guar, al despolimerizarse, deja alrededor de 10 al 12% de residuos insolubles que pueden causar daño de formación. Modificaciones químicas con óxido de etileno, óxido de propileno y ácido cloroacético mejoran la estabilidad térmica, la resistencia al ataque bacteriano y uniformidad en la hidratación y la dispersión. La goma guar es de uso limitado en los fluidos de perforación como viscosificador y reductor de pérdida de filtrado.

Goma de Algarroba . Es un polímero natural. Se usa en los fluidos de perforación como suspensor de sólidos densificantes y como agente de control de

filtrado. Su limitada disponibilidad restringe su uso. La estructura es similar a la de la goma guar (Fig.4.18), excepto que la relación manosa a galactosa es de 4, en contraste con la de la goma guar, que es de 2. Las soluciones de goma de algarroba son estables con el pH y las sales neutras pero pueden precipitarse por la acción de sales cuaternarias de amonio. Las soluciones pueden entrecruzarse con metales de transición como la goma guar.

Biopolímero . La goma Xantan se produce por la acción de un microorganismo (*xanthomas campestris*) sobre carbohidratos. El XC tiene una estructura extremadamente complicada (Fig. 4.19) con un peso molecular de alrededor de 2 millones. También se ha informado de polímeros con un peso molecular de 50 millones.

La unidad repetida de polisacáridos contiene ~~de~~ glucosa, d-manosa, y ácido d-glucónico. En las cadenas laterales se encuentran grupos acetato ácido pirúvico. Hay estudios que indican que el contenido piruvato afecta las propiedades reológicas B

La producción comercial incluye fermentación, precipitación de la goma en alcohol, secado y molido en forma de polvo. Recientemente Pfizer introdujo una



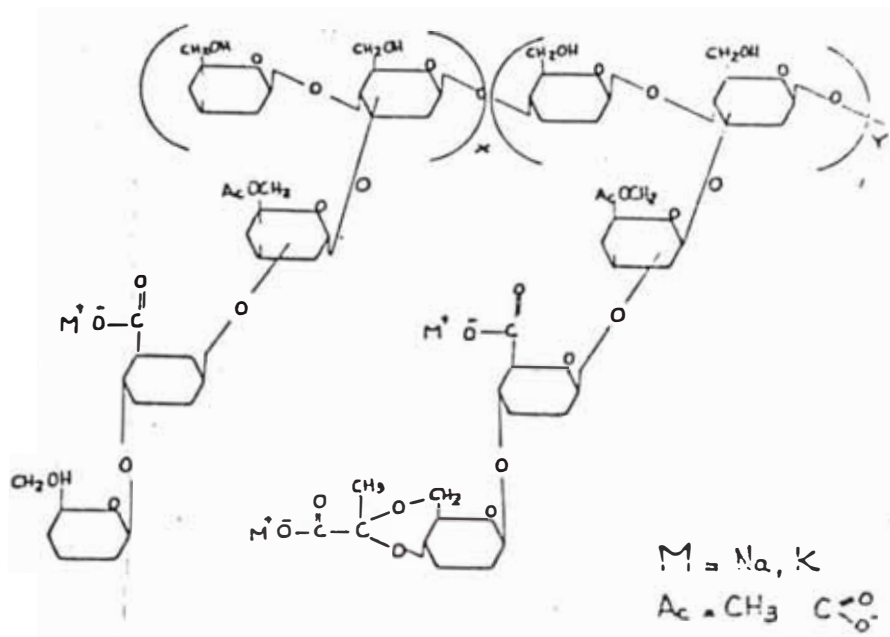


Fig. 4.19. Estructura Primaria de Xantan

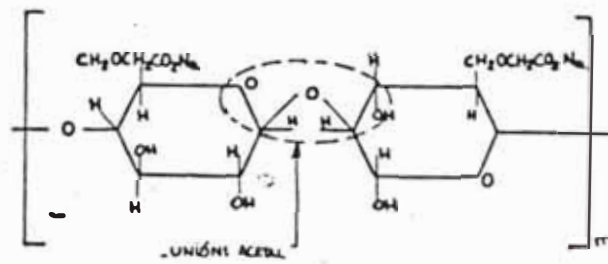


Fig. 4.20. Estructura de Carboximetilcelulosa (CMC)

versión líquida del XC para ser utilizado en el mejoramiento de la recuperación de petróleo (EOR).

Las principales desventajas del XC cuando se lo usa como viscosificador y agente de suspensión son el costo, la degradación térmica a 225°F y el requerimiento de un bactericida para la estabilidad. Por otra parte, es estable ante el pH y tiene alta tolerancia a las sales a pesar de su característica ligeramente aniónica.

- b) Modificados.— Son aquellos derivados de los polímeros naturales. Los más usados en perforación son el carboximetilcelulosa (CMC), la hidroxietilcelulosa (HEC), la carboximetilhidroxietilcelulosa (CMHEC) y la hidroxipropilgum (HPG).

Carboximetilcelulosa (CMC) .— La celulosa es soluble en agua mediante tratamiento con soda cáustica y posterior reacción de la celulosa sodada con ácido monocloroacético ( $\text{ClCH}_2\text{COONa}$ ) convirtiéndose la celulosa noiónica en aniónica (Fig. 4.20).

Las propiedades del CMC sódico pueden controlarse variando la uniformidad de la sustitución, el grado de sustitución (GS) y el grado de polimerización (GP). El grado de sustitución es la cantidad de

grupos hidróxilos reemplazados por los grupos de derivación.

En el CMC, por ejemplo, el grupo carboximetil reemplaza los grupos hidróxilos. El máximo GS es 3. La solubilidad en agua se da cuando GS es 0.4. Comercialmente el CMC tiene un GS de 0.4 a 1.4. El que más se usa corrientemente tiene un GS de 0.7.

Una impureza común en el CMC es el cloruro de sodio, subproducto del proceso de producción. El CMC grado técnico es alrededor del 78% puro. Hay también purezas superiores al 78%.

El grado de polimerización es el número de unidades monómeros y puede variar de 500 a 5,000. El grado de polimerización (y en mucho menor medida el grado de sustitución) determina la acción viscosificadora del CMC. La uniformidad en la sustitución afecta el desempeño del CMC. El CMC de alta viscosidad tiene mismo GS que el de viscosidad regular ó media pero tiene un grado mayor de polimerización y por lo tanto el mayor peso molecular.

El CMC es compatible con las sales de metales monovalentes como el cloruro de sodio y el cloruro de potasio. La tolerancia de sales de metales divalentes

depende del grado de sustitución, el pH y el modo de agregar la sal.

A mayor GS es mayor la tolerancia a la sal y la dureza. El Drispac, Maxpac, etc., tienen la misma estructura que el CMC pero contienen un grado de sustitución generalmente en el rango de 0.9 a 1.0 y puede ser tan alto como 1.2 a 1.5. El incremento en el GS aumenta el costo de producción. Por esto el Drispac, Maxpac, etc. resultan más caros que el CMC. El Drispac, Maxpax, pueden tolerar hasta 1,200 ppm de dureza total; sin embargo, se recomienda reducir ésta alrededor de 500 ppm siempre que sea posible.

El CMC de alto grado de viscosidad se usa en lodos de bajo contenido de sólidos a fin de proporcionar viscosidad, suspensión y control de pérdida de filtrado. El CMC de baja viscosidad se usa en lodos de alto contenido de sólidos en los que se necesita un máximo de control de pérdida de filtrado y un mínimo de aumento de la viscosidad.

La efectividad del CMC como reductor de filtrado/viscosificador disminuye con el incremento de la concentración de sal

La uniformidad en la sustitución afecta el desempeño del CMC. El CMC de alto grado de viscosidad tiende a

tener una sustitución más no uniforme (cadenas largas de monómeros con grupos hidroxilos no sustituidos), produciendo lo que se conoce como "cuerpos hinchados". Semejante no uniformidad causa problemas en la dispersión. Con alto corte, los "cuerpos hinchados" se dispersan. En condiciones estáticas ocurre la agregación. La cadena de celulosa no sustituida sirve como núcleo para la agregación.

Hidroxietilcelulosa (HEC).- (Fig. 4.21) La hidroxietilcelulosa (HEC) se prepara haciendo reaccionar el óxido de etileno con celulosa sódica (celulosa hinchada en solución caústica) para darle solubilidad en agua. A pesar de la naturaleza no iónica del HEC, resulta soluble en agua debido a que el grupo hidroxietil promueve enlace hidrógeno, que a su vez promueve la solubilidad en agua. Se logra óptima solubilidad en agua cuando el GS está entre 0.9 y 1.0. El valor típico de la SM varía entre 1.5 y 2.0. SM es la sustitución molar y se define como el número total de moles del grupo sustituyente que están unidos con los tres grupos hidróxilos de la unidad de anhidroglucosa.

Cuando se dispersa en agua la HEC tiende a aglutinarse ó aglomerarse. Para reducir la tendencia a la aglomeración los procesos de fabricación

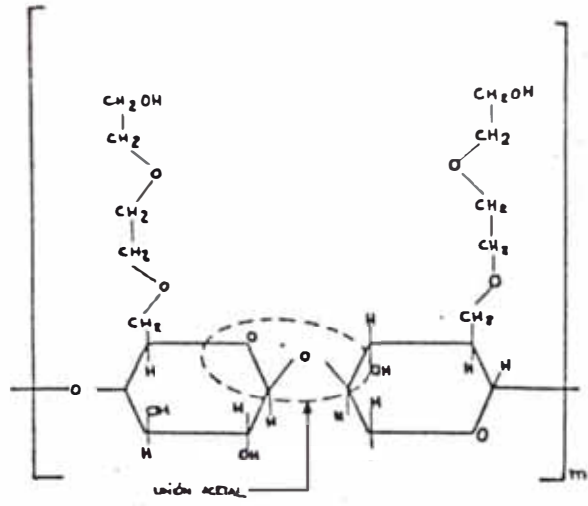
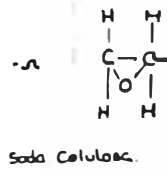


Fig.4.21. Producción de Hidroxiethylcelulosa (HEC)

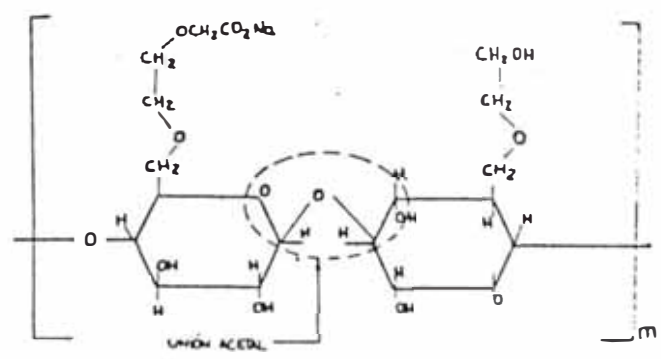


Fig.4.22 Estructura de Carboximetilhidroxiethylcelulosa (CMHEC)

incluyen el revestimiento del polímero con un dialdehído como el glioxal.

El glioxal se entrecruza en la superficie de la HEC retardando la hidratación; de este modo se disminuye la tendencia a la aglomeración. La alta temperatura y el alto pH promueven la hidratación y pueden anular el efecto del revestimiento con dialdehído.

Las soluciones de HEC tienen un comportamiento pseudoplástico (la viscosidad aparente es inversamente proporcional al corte). Mientras más grande sea el peso molecular del polímero, mayor será la propiedad pseudoplástica. La sustitución no iónica en la HEC la hace muy tolerante a ambientes altamente salinos, incluyendo las sales divalentes (calcio, magnesio, zinc, etc.). La HEC se aplica principalmente como viscosificador de salmueras. La HEC tiene propiedades muy pobres de suspensión y no desarrolla un esfuerzo de gel aceptable. Es además degradable a la temperatura y al corte y no se recomienda usarla a temperaturas superiores a 250°F a no ser en combinación con pequeñas cantidades de óxido de magnesio. El MgO extiende la estabilidad a la temperatura hasta +/- 275°F.

Carboximetilhidroxietilcelulosa (CMHEC) .- Se prepara por hinchamiento de la celulosa en soda caústica y subsiguiente tratamiento con óxido de etileno y ácido cloroacético. La estructura del CMHEC aparece en la Fig. 4.22. El CMHEC tiene tantos sustituyentes noiónicos como aniónicos. La característica iónica del CMC se mantiene mientras el grupo noiónico hidroxietil da al polímero mayor tolerancia a la sal. El CMHEC se consigue comercialmente con un GS de 0.3 a 0.4 de grupos carboximetil y SM de 0.3 a 2.0 de grupos hidroxietilos.

El CMHEC se usa también como viscosificador reductor de filtrado. Su uso es limitado debido a su mayor costo comparado con el CMC y el HEC.

- c) Sintéticos .- En contraste con los polímeros naturales, que son macromoléculas de alto peso molecular y son despolimerizadas, purificadas ó derivatizadas antes de ser utilizadas, los polímeros sintéticos se diseñan para aplicaciones específicas.

Tanto el tamaño molecular como la funcionalidad y las propiedades físicas y químicas específicas son consideraciones que se tienen en cuenta cuando se diseña un polímero sintético.





Poliacrilato no tolera  $\text{Ca}^{2+}$

Poliacrilamida tolera  $\text{Ca}^{2+}$  ----- no es soluble  
en agua

La secuencia de los monómeros en una cadena polimérica puede controlarse durante la fabricación. En la reacción indicada (Fig. 4.23), el ácido acrílico tiene tendencia a combinarse con sí mismo; por ejemplo: Tasa de homopolimerización mayor (alrededor de tres veces) que la copolimerización. Si la polimerización empieza con iguales cantidades de monómeros, el polímero resultante tendrá tres veces más grupos acrilatos en relación con el número de grupos acrilamidas. La concentración de monómero se ajusta para obtener la relación deseada en el polímero. Esta polimerización es difícil de controlar y da como resultado una mezcla de polímeros de secuencias de variación continua de monómeros y pesos moleculares desde 50,000 hasta 50'000,000.

Dos procedimientos de fabricación para producir copolímero acrilato/acrilamida que resultan fáciles de controlar y dan como resultado un polímero más homogéneo son:



La hidrólisis alcalina del poliacrilonitrilo produce un copolímero de 60 a 70 moles % de grupos de carboxilato de sodio y 30 a 40 moles % de grupos amida. La hidrolización posterior es difícil debido a factores iónicos y esteéricos. Si se desea un porcentaje molar mayor de amida, el polímero se prepara por hidrólisis alcalina de la poliacrilamida. Si se desea un porcentaje molar del grupo carboxilato mayor del 70 % se usa una copolimerización por adición de ácido acrílico y acrilamida.

La aplicación del polímero depende no sólo del peso molecular sino también del contenido de carboxilato y amida. En general, las poliacrilamidas de alto peso molecular ocasionan control de pérdida de filtrado, viscosidad y esfuerzo de gel. Como el grupo amida es no iónico, el grupo carboxilato, que es aniónico, determina la carga iónica de la macromolécula.

La poliacrilamida parcialmente hidrolizada con alto peso molecular, generalmente varios millones, con 15% a 35 moles % de acrilato, se utiliza como floculante de arcillas y extendedores de arcillas y coloides protectores. Ejemplos: Gelex (Benex), Cydril 5300, 4000, Separan-273, Drillaid 406, MF-1, XPO-Vis, etc.

Los polímeros con pesos moleculares entre 250,000 y 300,000 con alrededor del 67 % de neutralización por

acrilato de sodio se usan principalmente como agentes de control de filtrado. Ejemplos: Cypan, SP-101, Drillaid 425, etc.

Los poliacrilatos son homopolímeros del ácido acrílico, neutralizados con soda caústica hasta que se convierten en sal sódica. Estos poliacrilatos débiles tiene diferentes usos. Los polímeros de bajo peso molecular funcionan como dispersantes e inhibidores de incrustaciones. Los rangos entre 1,500 - 100,000 y 5,000 a 25,000 son los más comunes. Los poliacrilatos de alto peso molecular se usan como reductores de filtrado, viscosificadores y floculantes.

Los poliacrilatos tiene una tolerancia muy baja al calcio y a otros cationes divalentes (Mg, etc.). Mientras más corta sea la cadena, mayor es la tolerancia a los cationes divalentes. Ejemplos: Tackle, Scalechek, etc.

VAMA . El copolímero de acetato vinílico - acetato maleico anhídrido ha sido usado como extendedor de bentonita y floculante selectivo de sólidos. Se trata de un polímero lineal con 1 a 1.5 veces más unidades de acetato vinílico que unidades de anhídrido maleico. El viejo Gelex es la sal de calcio del copolímero.

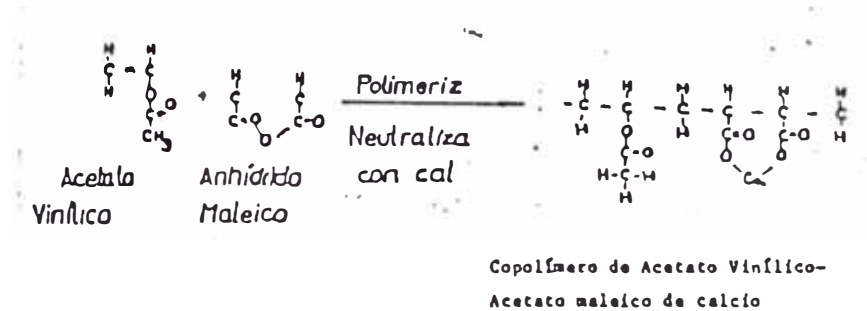


Fig. 4.24 Copolímero de Acetato vinílico-Acetato maleico (VAMA)

SSMA . El Miltem es un copolímero de bajo peso molecular (1,000 - 5,000) de ácido estireno sulfónico y anhídrido maleico usado para controlar la reología a alta temperatura. Esta estructura se observa en la Fig. 4.25.

Este polímero es altamente aniónico puesto que hay dos carboxilos ionizables del anhídrido maleico y un grupo del sulfonado poliestireno. Es soluble en agua y altamente resistente a la temperatura. La acción defloculante se produce a través del enlace hidrógeno con las superficie de la arcilla. Este polímero es un fluidificante (afinador) más efectivo a alta temperatura comparado con su acción a temperatura ambiente.

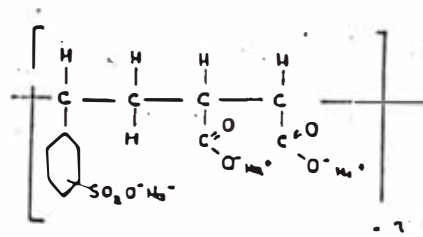


Fig. 4.25 Copolímero Estireno Sulfónico y Anhídrido Maleico

Polímero Vinilamida/Vinilsulfonato .- Los copolímeros que contienen sulfonatos y grupos amidas han sido sintetizados con tolerancias a la temperatura superiores a 400°F y pueden resistir iones de calcio y otros divalentes hasta 75,000 ppm y sales monovalentes hasta la saturación. Este polímero fue utilizado exitosamente en Europa y Estados Unidos en la perforación de pozos profundos y calientes.

Este polímero es el Duralon y se ha revelado como un excelente reductor de filtrado no solo en lodos de potasio y agua de mar sino también en salmueras de alto peso como las de bromuro de zinc. En laboratorio la estabilidad a la temperatura se demostró hasta 450°F, donde las pruebas se suspendieron por limitaciones de instrumental.

El Duralon también suministra estabilización reológica aún a altas temperaturas. Por su estabilidad térmica y su excelente tolerancia a la sal, el nivel de mantenimiento es bajo.

El Duralon reduce la gelificación en condiciones estáticas y la circulación puede iniciarse de nuevo sin excesiva presión de la bomba. Sus propiedades para formar película disminuyen el incremento de sólidos y contribuyen a la estabilidad del hueco. El peso molecular está en el rango de 800,000 a 2'000,000 determinado por la técnica de dispersión ligera.

Finalmente comparamos los polímeros que han sido descritos como coloides protectores, reductores de filtrado y estabilizadores de reología de acuerdo con el rango de temperatura dentro del cual pueden usarse.

Polímero	Límite de aplicación(°F)
Almidón y sus derivados	225-250°F
Esteres de celulosa:CMC, HEC, CMHEC	275-300°F



<u>Polímero</u>	<u>Límite de aplicación(°F)</u>
Biopolímeros	275-300°F
Polímeros vinílicos con sulfonatos/grupos funcionales amidas	> 400°F
Polímeros acrilato/acrilamidas	> 400°F

De todos los polímeros antes mencionados, las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas son las más estables a la temperatura y pueden usarse hasta 400°F manteniendo muy bajo el contenido de calcio.

La pérdida de eficiencia se debe a la saponificación de los grupos acrilamidas a alta temperatura y alto pH. El grupo carboxilato incrementa la sensibilidad al calcio.

En cambio los copolímeros que contienen sulfonatos y grupos amidas pueden resistir iones de calcio u otros divalentes hasta 75,000 ppm y sales monovalentes hasta la saturación.

4.2.2.2 POR SU ESTRUCTURA . De acuerdo a su estructura, los polímeros pueden clasificarse en:

a) Elastómeros .- Un elastómero posee el alto grado de elasticidad que es característico del caucho: puede ser deformado considerablemente -estirado hasta ocho veces su longitud original, por ejemplo- para, sin embargo, volver a su forma original. Sus moléculas son largas y delgadas, alineándose cuando se estira el material. Cuando se elimina la fuerza de estiramiento, las moléculas de un elastómero no permanecen extendidas y alineadas sino que vuelven a sus condiciones desordenadas originales favorecidas por la entropía. No permanecen alineadas porque las fuerzas moleculares necesarias para sujetarlas en ese ordenamiento son débiles. En general, los elastómeros no tienen grupos muy polares lugares aptos para puentes de hidrógeno: las cadenas extendidas no calzan bien entre sí, por lo que no pueden operar eficientemente las fuerzas de Van der Waals. En un elastómero, la entropía derrota a la entalpía.

Un requisito adicional: las largas cadenas de un elastómero deben conectarse entre sí por enlaces transversales ocasionales: deben ser suficientes, para evitar el deslizamiento de moléculas, pero no tanto como para privar a las cadenas de la

flexibilidad necesaria para que puedan extenderse con facilidad y volver nuevamente al desorden.

El caucho natural ilustra estos requisitos estructurales de un elastómero: cadenas largas y flexibles; fuerzas intermoleculares débiles y uniones transversales ocasionales. El caucho es un cis-1,4-poliisopreno. No teniendo sustituyentes fuertemente polares, queda limitada la atracción intermolecular a las fuerzas de Van der Waals, las que son débiles debido a la configuración cis en todos los dobles enlaces. La Fig. 4.26, compara las cadenas extendidas del caucho con las de su isómero trans. Podemos apreciar que la configuración trans permite cadenas extendidas muy regularmente zigzagueantes que pueden juntarse muy bien, cosa que no es posible para la configuración cis. El estereoisómero totalmente trans se encuentra naturalmente en forma de gutapercha; es altamente cristalino y no tiene elasticidad.

Los enlaces transversales del caucho se logran por medio de la vulcanización -calentamiento con azufre- la que forma puentes de azufre entre moléculas, reacción que implica a las posiciones alílicas muy reactivas, por lo que depende del doble enlace en el polímero.

El más importante de los elastómeros sintéticos es el SBR, un copolímero de butadieno (75%) y estireno (25%) que se produce por medio de radicales libres; compite con el caucho natural en el uso mayor de los elastómeros, o sea, en la manufactura de neumáticos para automóviles. Se puede obtener polibutadieno y poliisopreno totalmente cis por medio de la polimerización según Ziegler-Natta.

Un elastómero completa ó mayormente polidiénico, es por supuesto, altamente no saturado. Sin embargo, lo único que se exige de un elastómero es una insaturación suficiente para permitir la formación de enlaces transversales: por ejemplo, en la manufactura del caucho butílico solamente se copolimeriza un 5% de isopreno con isobutileno.

- b) Fibras .- Las fibras son trocitos de material largos, delgados como hilos, que se caracterizan por una gran resistencia tensil (a la tracción) a lo largo de la fibra. Las fibras naturales -algodón, lana, seda- son típicas. Se tuercen las fibras para formar hilos que se entraman en telas ó bien se encastran en material plástico para conferirle resistencia. La resistencia a la tensión puede ser enorme: algunas fibras sintéticas rivalizan -comparando ponderalmente- con el acero.

Las características generales de las fibras se reflejan también a nivel molecular; también las moléculas son largas, delgadas y filiformes. Además, y lo que es más importante, se hallan estiradas, una al lado de la otra, alineadas en la dirección de la fibra. La resistencia de la fibra reside, en último término, en la fuerza de los enlaces químicos de las cadenas polímeras. El alineamiento se logra por un estiramiento del material polimerizado: una vez alineadas, las moléculas permanecen así; la tendencia a volver a doblarse y enrollarse es superada por fuertes atracciones intermoleculares. La entalpía vence a la entropía en una fibra. Este alto grado de orientación molecular se ve generalmente acompañado por una cristalinidad apreciable, aunque no siempre.

Los requisitos fundamentales para una fibra son, en consecuencia, una forma molecular -lineal- que permita un alineamiento paralelo y la presencia de atracciones intermoleculares fuertes que mantengan esta alineación. Las fuerzas intermoleculares evitan, además, que las moléculas se "deslicen" entre sí.

Las fibras sintéticas más importantes son las poliamidas (los nylones), poliésteres (Dacron, Terylene, Vycron), poliacrilonitrilo (fibras acrílicas, Orlon, Acrilan), poliuretanos (Spandex, Vycra), y polipropileno isotáctico. En el nylon y en

los poliuretanos, las cadenas moleculares permanecen unidas entre sí por medio de puentes de hidrógeno (Fig. 4.27). En los poliésteres y en el poliacrilonitrilo hay atracciones dipolo-dipolo poderosas, debidas a los grupos carbonilo y ciano, fuertemente polares. Las cadenas estereoregulares del polipropileno isotáctico calzan tan bien unas con otras que las fuerzas de Van der Waals resultan suficientes para mantener la alineación.

c) Plásticos . Aunque todos los años se producen cantidades enormes de fibras y elastómeros sintéticos, las mayores cantidades de polímeros artificiales se consumen en forma de plásticos, es decir, como materiales que se aplican en forma de planchas, tubos, películas y, lo más importante de todo, como objetos moldeados: juguetes y botellas; perillas, mangos e interruptores; platos, lapiceros, cepillos de dientes; válvulas, engranajes, cojinetes; cajas para radios y televisores; botes, carrocerías de automóviles e, incluso, casas.

La estructura molecular de los plásticos es de dos tipos generales: moléculas largas, ya sea lineales ramificadas; y moléculas de red espacial.

Los polímeros lineales y ramificados pueden ser más o menos cristalinos e incluyen algunos de los

materiales que también se usan como fibras: nylon, por ejemplo. Comprendem los diversos polialquenos tales como: polietileno, policloruro de vinilo, poliestireno, etc. Estos polímeros se ablandan por calentamiento, razón por la que se les denomina termoplásticos: es en este estado blando que se les puede moldear ó extruir.

Los polímeros de red espacial o resinas, tienen muchos enlaces transversales, por lo que forman estructuras tridimensionales, aunque irregulares y rígidas, como es el caso de las resinas de fenol-formaldehído o urea-formaldehído. Una muestra de tal material es esencialmente una sola molécula gigantesca: el calentamiento no la ablanda, puesto que el ablandamiento requiere la ruptura de enlaces covalentes; el calentamiento incluso puede generar enlaces transversales adicionales, con lo que el material se endurece aún más, razón por la que estos polímeros se llaman termoduros.

- d) Polielectrolitos .- Se definen como un grupo especial de polímeros orgánicos cuyas cargas se disocian en polyiones. En la medida que esta reacción ocurre el polímero se torna soluble y hasta hidrofílico.

La efectividad del polyión es función del número de cargas disponibles y del medio en que es disuelto.

Los polielectrolitos según la naturaleza eléctrica de sus iones pueden ser aniónicos (negativos), catiónicos (positivos) no iónicos. Actualmente todos los polielectrolitos de uso en fluidos de perforación son aniónicos, ya que los catiónicos se comportan como fuertes floculantes de arcillas.

Los aniónicos son ampliamente usados como extendedores de bentonitas ó floculantes de sólidos perforados. Estos se caracterizan por los grupos ácidos (COOH) y grupos aniónicos (COO<sup>-</sup>Na<sup>+</sup>) donde un álcali ha neutralizado parte de los grupos ácidos haciendo al polímero parcialmente soluble en agua.



La estabilidad de los mismos en un medio acuoso está determinado por:

- a) Concentración y distribución de los grupos ionizables. Cuando cationes divalentes como el calcio y el magnesio, son agregados a un sistema conteniendo polímero ácido carboxílico el efecto es una rápida precipitación del polímero por reducción de la solubilidad del mismo. Por esta razón, la dureza total debe ser controlada muy de



cerca en sistemas que contengan polielectrolitos altamente aniónicos.

Un polímero altamente aniónico puede ser definido como aquel que contiene un mínimo del 10 % de sus grupos carboxilatos ionizados. Para su correcto desempeño será necesario entonces emplear carbonato de sodio a efectos de mantener la dureza reducida a valores aceptables.

- b) Concentración del polímero.— En concentraciones de dilución, el polímero absorbe una gruesa película de agua (del espesor de 3 ó 4 moléculas). Hay una repulsión electrostática entre estas películas de agua cuya superficie es grande cuando se ha alcanzado la total "hidratación" del polímero y la cual contribuye al efecto viscosificante del mismo. En la medida que más polímero es adicionado a la solución, esta película de agua disminuirá alrededor de las moléculas y la viscosidad se estabilizará.

Si mayor cantidad de polímero es agregado, la disponibilidad de agua se torna insuficiente para la solubilización y el polímero no entrará en solución.

- c) Concentración de sales en la solución .- Si una sal es agregada a una solución conteniendo polielectrolitos, en una configuración completamente extendida, donde los grupos  $\text{COO}^-\text{Na}^+$  están totalmente ionizados, el resultado es una disminución de la viscosidad. Esto es debido a que los iones  $\text{Na}^+$  son comprimidos dentro de los grupos carboxilos y reducen la película de agua. El polímero toma una configuración arrollada retornando a la forma que poseía antes de la suspensión. Esto explica porque los polielectrolitos altamente aniónicos no contribuyen a la viscosidad cuando son agregados a sistemas salinos y porqué pierden grandemente su eficiencia cuando la sal es agregada a estos sistemas.

Una comparación puede ser realizada, con una partícula de bentonita sódica que ha sido prehidratada y luego se agrega a un sistema salado, cuando bentonita seca es directamente agregada a soluciones con altas concentraciones de sal.

- d) pH de la solución . Después del proceso de polimerización, el polímero es parcialmente neutralizado por la adición de caústicos para formar grupos carboxilatos ( $\text{COO}^-\text{Na}^+$ ). Cuando el

polímero está en solución se torna soluble debido a la ionización de estos grupos. De esta forma, si el pH de la solución es ajustado a niveles alcalinos, se obtendrá más solubilidad ya que son formados en la cadena mayor cantidad de sitios ionizables.

Si la solución alcalina es neutralizada con ácido, la ionización es moderada con la consecuente reducción de la viscosidad. Debido a esto, para una solubilidad adecuada, el pH debe ser mantenido entre 8.5 y 9.5. Es de primordial importancia para la solubilización, mantener el pH del solvente en niveles básicos.

**4.2.2.3 POR SU UTILIDAD** . Los polímeros de acuerdo a su utilidad pueden clasificarse en:

- a) Viscosificadores .- Los polímeros aniónicos pueden ser empleados para impartir viscosidad a las suspensiones bentoníticas donde la concentración de sólidos totales es menor al 4 % (36 lbs/bbl) y la concentración de bentonita es menor al 2.5 % (21 lbs/bbl). El polímero se vincula a las caras ó planos de las uniones de las partículas de arcilla que se han roto y luego que el final de una molécula "larga" es adsorbida por una partícula, el resto de la molécula está aún en suspensión libre para poder ser

adsorbida por otras partículas. En otras palabras, produce el efecto de entrecruzamiento entre la bentonita y otras partículas en suspensión. Esto incrementa la viscosidad por interacción en los sólidos y emplea la disponibilidad de las cargas aniónicas para conectar las partículas de bentonita, con lo que el efecto es obtenido evitando la adición de sólidos (Fig. 4.28).

Para lograr este efecto de "extensión" de la viscosidad de la bentonita, deben prevalecer dos condiciones:

1. El sistema debe estar relativamente libre de calcio (menos de 200 ppm), para lograr la completa hidratación de la bentonita.
2. La cantidad de polímero disponible deberá estar en el rango de 0.05 a 0.1 lb/bbl (0.142 a 0.285 Kg/m<sup>3</sup>).

En consecuencia, dado que el calcio retarda la hidratación de la bentonita, se deberán realizar tratamientos previos con carbonato de sodio antes de agregar el polímero.

A bajas concentraciones de polímero, se verifica un incremento en la viscosidad, en la medida que éste se

vincula dentro de los "sitios" positivos de las capas octahédricas de las partículas de bentonita. No obstante, si la cantidad de polímero es incrementada, éste tiende a separar las partículas de bentonita de su sitio de unión, reduciendo el efecto de entrecruzamiento, y por ende la viscosidad.

El rango de concentración de polímero es muy estrecho, y en los sistemas de bajos sólidos es muy fácil de producir un sobretratamiento. Después de un sobretratamiento, la viscosidad no podrá ser incrementada hasta tanto no se agregue suficiente polímero como para producir espesamiento. En conclusión: un sobretratamiento adelgazará el sistema (defloculación), y un tratamiento pobre no será suficiente para producir la floculación.

En otros términos, si se verifica adelgazamiento por sobretratamiento con polímero, la viscosidad no se incrementará hasta tanto:

1. No se agregue suficiente cantidad de bentonita para ajustar la relación de concentraciones, ó
2. Se permita a los sólidos perforados ajustar concentración por sus propios medios (incorporación natural).

b) Floculantes .- Los polímeros aniónicos tienen capacidad para formar una estructura tridimensional con los sólidos de perforación (partículas de arcilla de bajo rendimiento). En vez de volverse el polímero alrededor de las partículas de arcilla promoviendo así el entrecruzamiento, en la floculación la unión se pierde y pasa lo mismo con más de una ligazón mecánica. Las partículas están sujetas, juntas, sin entrecruzamiento. Las fuerzas gravitacionales pueden causar la precipitación a medida que la masa del aglomerado aumenta. Los sólidos de perforación no se hidratan tanto como la bentonita. Por lo tanto, no están capacitados para suministrar suspensión y se produce la precipitación.

La efectividad para flocular los sólidos de un fluido de perforación está influenciada por los siguientes factores:

1. Hidratabilidad de los sólidos (alto, bajo ó ningún rendimiento).
2. Ambiente iónico, ambiente salino, cationes presentes, pH.
3. Tipo de polímero floculante.
4. Capacidad de suspensión y reología del fluido.
5. Concentración de los sólidos.
6. Temperatura.
7. Tipo y eficiencia de los equipos más sólidos.

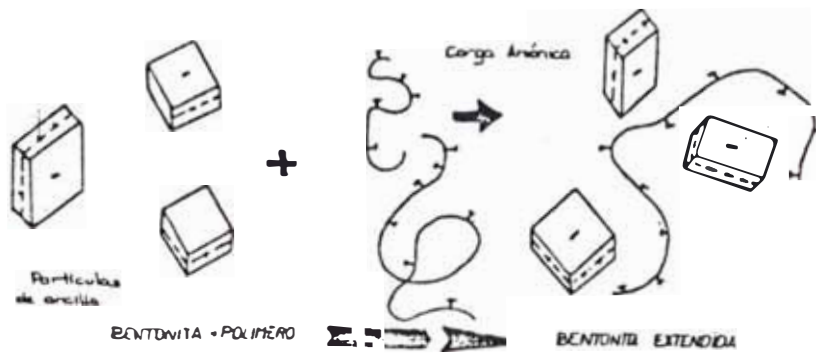


Fig. 4.28 Mecanismo Polimérico de Extensión de Viscosidad

FLOCULACIÓN SELECTIVA

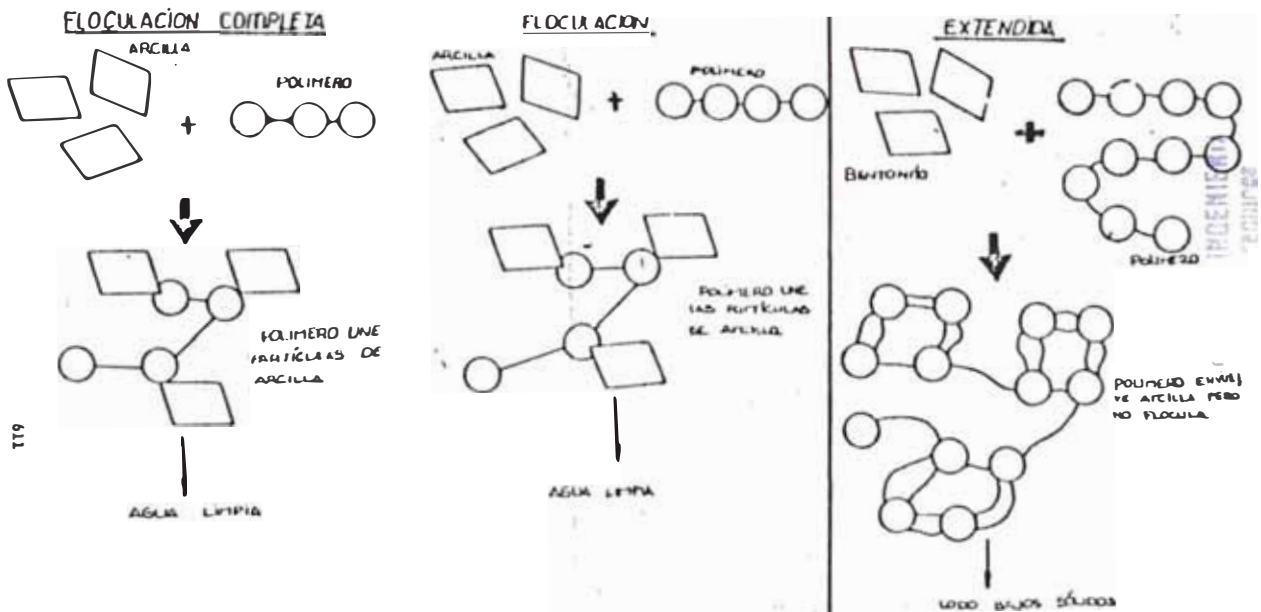


Fig. 4.29 Floculación Vs. Extensión de Viscosidad

8. Dilución.

9. Método y lugar para colocar el floculante.

La floculación puede ser total selectiva. La floculación total se eliminan todos los sólidos. En la floculación selectiva, el polímero puede usarse para dar viscosidad a la bentonita disponible mientras actúa como floculante precipitando los sólidos de perforación. La Fig.4.29 compara la floculación con la extensión de la viscosidad.

Los floculantes selectivos son muy útiles para mantener buenas condiciones de limpieza del hueco y control de sólidos cuando no se puede usar perforación con agua clara.

El polímero incrementa el rendimiento de la bentonita tratando de mantener juntas las partículas con el polímero, al mismo tiempo que procura flocular los sólidos más grandes. La contaminación con sal ó la dureza pueden prevenir la doble función del polímero. Así se produce la floculación total. Una concentración de sal por encima de los 10,000 ppm y una dureza mayor de 400 ppm previenen la hidratación de la bentonita y causan la precipitación posterior. Por lo común, el exceso de calcio se trata con soda ash ó bicarbonato de sodio. Ejemplos de polímeros con doble función son: Gelex, Rapidril y Lo-Sol.



Hay algunos polímeros diseñados para flocular los sólidos sin beneficiar a la bentonita. Un ejemplo es el Imco-Floc, MF-1, que es una mezcla de poliacrilamidas solubles noiónicas y aniónicas parcialmente hidrolizadas.

Para flocular selectivamente la relación de los sólidos de perforación/bentonita debe ser de 2:1 menor. Los sólidos de baja gravedad deben mantenerse en el rango de 2 a 4 % en volúmen. Generalmente no se necesitan defloculantes a menos que el esfuerzo de corte sea muy alto ó progresivo.

- c) Agentes de control de filtrado .- El CMC es el agente de control de filtrado más usado. El Cypan y el WL-100 son poliacrilatos hidrolizados alrededor de 2/3 al acrilato de sodio.

Los reductores de filtrado poliméricos más eficaces son aquellos polímeros de cadena recta altamente aniónicos. Parecería que estos materiales controlan la pérdida de filtrado por taponamiento mecánico de las zonas permeables y/ó incrementando la viscosidad de la fase fluída del medio. Se cree que el taponamiento mecánico sucede mediante "balling" y el envolvimiento del polímero alrededor de las partículas de arcilla.

La pérdida de filtrado a través de la viscosidad es una función de la carga aniónica y del tamaño y la forma del polímero. Los polímeros aniónicos son sensibles a la sal o ambientes cálcicos. El Cypan es un excelente agente de control de filtrado pero debe usarse en sistemas libres de calcio y magnesio. Comparado con los reductores convencionales de filtrado resulta el más resistente a la temperatura.

Los almidones noiónicos, guar y celulosas usadas en salmueras y fluidos controlan el filtrado por hidratación e hinchamiento.

- d) Agentes estabilizadores de arcillas . En la estabilización de las lutitas, el polímero forma coloides protectores sobre la arcilla y se adhiere a las cargas positivas de los bordes de la ligazón rotos de las partículas de arcilla. La lutita se preserva de desprendimiento y dispersión.

Aún cuando el agua puede entrar en la lutita, la cantidad es menor. El polímero aísla la fase agua reduciendo en forma efectiva la invasión de agua en la lutita. Se ha utilizado con éxito la combinación de estos polímeros con sistemas salados, particularmente el sistema de potasio. En esta combinación, el catión es el agente estabilizante (deshidrata la lutita) y la acción de aislamiento y

envolvimiento del polímero ayuda a controlar el hinchamiento y dispersión de la lutita.

Los polímeros de mayor aceptación para la estabilización de lutitas son las poliacrilamidas parcialmente hidrolizadas como el Gelex, Cydril 4,000, Separan 272 y el Cydril 4310. El Mor-Rex, un polímero natural, también se usa para estabilizar lutitas.

Estos polímeros se han usado con lutitas semiduras a duras que contienen illita y montmorillonita. Los sistemas de polímeros con sal deben usarse con bentonita prehidratada. Estos son sistemas no-dispersos y se debe tener cuidado al requerir un defloculante. No se recomienda el uso de carbonatos ya que éstos compiten por los puntos sitios de adsorción en la arcilla reduciendo la efectividad del polímero.

Entrecruzamiento: Debido al costo de los polímeros, algunas veces resulta ventajoso entrecruzarlo con un catión que reduce los requerimientos del polímero.

El entrecruzamiento se realiza principalmente para incrementar la viscosidad del polímero. El entrecruzamiento ó proceso de puenteo se produce por la reacción del polímero aniónico con un catión para

producir un Gel de red tridimensional. El cromo trivalente, usualmente tanto del cloruro de cromo como del cromo aluminio. El procedimiento para el entrecruzamiento es delicado. Un sobretratamiento puede originar reducción de la viscosidad y aún floculación.

e) Defloculantes . La acción defloculante de los polímeros aniónicos puede explicarse por medio de dos mecanismos:

1. Adsorción sobre los bordes de la arcilla y neutralización de las cargas positivas.
2. Fuerzas de repulsión debido al exceso de cargas negativas.

En contraste con los viscosificadores que tienen altos pesos moleculares muchos defloculantes poliméricos tienen cadenas mucho más cortas.

El copolímero estireno sulfonado anhídrido maleico, por ejemplo, tiene un peso molecular entre 1,000 y 5,000. Su alta densidad de cargas (dos iones carboxilos y un ión sulfonato), permiten una adsorción fuerte a las partículas de arcilla.

Las fuerzas de repulsión, a bajas temperaturas, son demasiado fuertes, previniendo la adsorción los

bordes de la arcilla, haciéndolo ineficaz como defloculante. A temperaturas más altas, la adsorción multicapas se incrementa promoviendo la defloculación.

La práctica de campo es utilizar SSMA con lignosulfonato para estabilizar la reología sobre un amplio rango (intervalo) de temperatura.

Los polímeros poliacrilatos usados como defloculantes tiene pesos moleculares menores a 10,000 con una estabilidad a la temperatura pero baja tolerancia a los cationes divalentes. Típicamente, los polímeros con peso molecular entre 1,000 - 5,000 tiene una tolerancia al calcio de 100 - 300 ppm.

El Duralon es una molécula mucho más grande y suministra control reológico mediante la estabilización estérica. La baja carga, en relación a la masa, permite el funcionamiento sobre un amplio rango de temperatura.

La defloculación se diferencia de la dispersión tal como lo explica la Fig. 4.30. Los dispersantes tales como lignosulfonatos ó polifosfatos pueden reducir el tamaño de las partículas hasta tamaños submicrónicos

dando como resultado un problema de sólidos finos y una disminución de la velocidad de penetración. La Fig.4.30 ilustra cómo los polímeros defloculantes reducen la viscosidad del fluido de perforación. Cuando la bentonita se prehidrata en agua fresca, las partículas existen en una suspensión coloidal estable. A medida que la bentonita prehidratada se mezcla en un lodo con contenido de electrolitos (cloruro de sodio, hidróxido de sodio, etc.), las partículas se aglomeran. Si la concentración de electrolitos es lo suficientemente alta, puede presentarse floculación.

El agregado de un polímero defloculante produce rompimiento de los flóculos en agregados.

La adición de un dispersante produce en principio floculación y luego dispersión. La dispersión puede incrementar en forma real los sólidos finos en el sistema de lodos.

## V. APLICACIONES

En Petróleos del Perú S.A. Operaciones en el Nor-Oeste, se venía utilizando el tipo de lodo convencional disperso (lignosulfonato) para la perforación de pozos por petróleo y/o gas, el cual no presentaba ningún problema ó dificultad en cuanto a su preparación y mantenimiento; ni durante la perforación del pozo.

A partir del año 1986, se inició una campaña de perforación en el yacimiento de Leones, zona que fuera atravesada por un gran caudal de agua durante el año 1983, a consecuencia de las fuertes precipitaciones pluviales ocurridas en dicho año, y que se mantuvo discurriendo hasta finales del año 1985.

Esta zona presentaba grandes problemas durante la perforación de los primeros 200 pies, debido a la presencia de material deposicional del tipo conglomerado no consolidado, debido a lo arriba indicado. Esto contribuía en gran medida a que los recortes no puedan ser levantados por el fluido convencional disperso y por consiguiente se producían problemas de derrumbes y aprisionamiento de la tubería; decidiendose bajar primero una conductora de 13 3/8 pulg. de diámetro hasta la profundidad de 250 pies, para luego bajar forros de 9 5/8" hasta los 400 pies y terminar la perforación bajando forros de 5 1/2".

El lodo convencional disperso, presenta gran tolerancia a los sólidos perforados, lo cual dificulta su remoción en la superficie. Esto hace que se incremente considerablemente la concentración de dichos sólidos en el lodo pudiendo causar daños a la formación productiva.

A mediados del año 1988, y con la finalidad de disminuir los costos de operación mediante la eliminación de la bajada de la conductora de 13 3/8", se propuso perforar los pozos de esta zona con un fluido del tipo semi-disperso, que tenía como componente principal un polímero de alto peso molecular, a fin de levantar y suspender con mayor eficiencia los recortes mediante la expansión de la bentonita. Este tipo de fluido tuvo éxito en aquellos lugares del yacimiento donde no existía la presencia de napas freáticas, ya que en los lugares donde teníamos la presencia de éstas, el fluido se contaminaba perdiendo sus propiedades reológicas por lo que de todas maneras se tenía que bajar la conductora de 13 3/8".

Finalmente se decidió emplear el fluido de perforación semi-disperso durante toda la perforación debido a que las densidades empleadas eran relativamente bajas. Además se tenía como objetivo el estudio de la factibilidad económica de su uso en esta zona y disminuir los costos de operación.

Este tipo de fluido tiene la particularidad de trabajar eficientemente cuando se perfora con bajas densidades en zonas



de gradientes de presión mínimas, que no obliguen al uso excesivo de materiales densificantes. Asimismo, la concentración de sólidos perforados presentes debe ser mínima. Todo esto trae como consecuencia una mayor velocidad de penetración a raíz de un mayor aprovechamiento de la hidráulica y evitando la re-perforación de los recortes. También proveen un efectivo control de filtrado.

El mantenimiento de este tipo de lodo está basado principalmente en la remoción de los sólidos perforados por medios químicos y mecánicos y no en el tratamiento del efecto que dichos sólidos pueden tener en el lodo.

5.1 DESCRIPCION DE LA ZONA PRODUCTIVA .- Durante la perforación de los pozos en esta zona, se atraviesan las formaciones Tablazo, Talara, Pariñas Inferior, Palegreda, Cerro Tanque y Mogollón; siendo esta última la formación objetivo (Fig. N°2).

La formación Mogollón está compuesta por areniscas cuarzosas de granulometría gruesa (0.9 mm) a fina (0.15 mm), compacta, de coloración gris verdosa de escasa matriz arcilloso y generalmente de baja permeabilidad (0.1 a 0.3 md).

La profundidad final de la perforación se encuentra entre los 4,455 y 6,385 pies, según la ubicación del pozo dentro del yacimiento.

Se realizó un estudio microscópico de muestras de formación obtenidas en el pozo 7346 mediante la herramienta Hard Rock Side Wall Coring Tool entre los 4,523 y 4,692 pies, obteniéndose los siguientes resultados analíticos:

Cuarzo	:	20	63	%
Feldespatos	:	2	4	%
Fragmentos líticos	:	63	26	%
Minerales pesados	:	12	5	%
Calcita	:	3	2	%

5.2 SISTEMA ELEGIDO . Luego de varias pruebas realizadas en el campo, y de acuerdo a la experiencia y disponibilidad de materiales y equipos para preparar el fluido de perforación, se eligió el sistema de lodo semi-disperso utilizando como polímero una celulosa polianiónica de alto peso molecular (Drispac, Monpac, Magcopolypac).

Este tipo de polímero se eligió principalmente por su disponibilidad en la zona (Talara), ya que era distribuida por las diferentes empresas que prestan servicios de ingeniería de lodos en dicha ciudad. Asimismo, por ser la más económica dentro de su categoría.

El agua de preparación debe tener una dureza de 60 - 80 ppm de  $\text{Ca}^{2+}$  y presencia de cloruros del orden de los 500 a 800 ppm de  $\text{Cl}^{-}$ .

El fluido de perforación presentaba las siguientes características al momento de iniciar la perforación de la zona productiva:

Densidad	:	10.0	lb/gal
Viscosidad API	:	50	seg
Viscosidad Plástica	:	20	cps
Punto de fluencia	:	20	lb/100 pies <sup>2</sup>
Gel 10"	:	3-4	lb/100 pies <sup>2</sup>
Gel 10'	:	10-14	lb/100 pies <sup>2</sup>
pH	:	9.5	
Filtrado	:	4	cc/30 min
Sólidos corregidos	:	5-8	%
Diesel	:	6	%

El sistema elegido tenía como principal ventaja en relación al sistema convencional disperso (lignosulfonato), la eliminación del uso de la conductora de 13 3/8" en aquellas zonas donde no existía la presencia de napas freáticas. Asimismo, presentaba mejores propiedades de suspensión y arrastre de recortes evitando problemas de derrumbes y agarres de tubería durante los primeros 200 pies. También se lograba disminuir el daño a la formación productiva al tener un lodo con una menor concentración de sólidos perforados.

En los Bit Records de la Tabla N° 1, se pueden apreciar los registros de brocas utilizados durante la perforación de los

pozos; tanto con el sistema de lodo convencional disperso (lignosulfonato), como con el sistema semi-disperso.

En la Tabla N° 2 podemos apreciar los pozos que fueron perforados con lodo convencional disperso, y donde se distinguen los diferentes parámetros utilizados durante la perforación de los mismos. Estos pozos se perforaron durante los años 1986, 1987, y principios de 1988.

Los parámetros más importantes que rigen este tipo de lodo; como son, la relación de punto cedente a viscosidad plástica, equivalente a 0.82; el valor del índice de comportamiento de flujo laminar "n" de 0.64; la relación de concentraciones de [sólidos perforados/bentonita] de 1.9 y [polímero/dispersante] de 0.26. Con estos parámetros; y, de acuerdo a los resultados experimentales de campo se obtienen tasas de penetración de 363 pies/hora y un costo total del pozo por pie perforado de U.S.\$ 32.26 (Tabla N° 4).

En la Tabla N° 3 se pueden observar los pozos perforados con lodo semi-disperso, así como los parámetros utilizados.

Los parámetros que rigen este sistema de lodo son: relación punto cedente/viscosidad plástica de 0.97; índice de comportamiento de flujo laminar "n" de 0.60; relación [sólidos perforados/bentonita] de 1.6 y relación [polímero/dispersante] de 0.38; con los cuales se llega a

obtener experimentalmente tasas de penetración promedias de 428 pies/hora y un costo total del pozo por pie perforado de U.S.\$ 26.48 (Tabla N° 5).

5.3 PARAMETROS UTILIZADOS . Los valores de los parámetros utilizados pueden apreciarse en los Gráficos N° 5.1 y 5.2 donde podemos apreciar la viscosidad plástica, punto de fluencia, filtrado y porcentaje de sólidos corregidos en función de la concentración del polímero.

Adicionalmente debemos tener en cuenta los siguientes parámetros:

1. Relación de sólidos perforados a bentonita (D/B), en promedio, de 1.60 : Esta relación debe ser menor de 2/1 con el fin de mantener condiciones satisfactorias del hueco. Una alta relación de sólidos perforados a bentonita indica una elevada cantidad de "sólidos no deseables" que no contribuyen en nada al sistema.

En la tabla N° 4 , en el tipo de lodo disperso vemos que esta relación es en promedio 1.90, mayor que en el tipo de lodo semi-disperso, que es de 1.60 (Tabla N° 5 ).

El mantenimiento del sistema de lodo semi-disperso no sólo requiere que la cantidad de sólidos totales sea tan baja como sea posible, sino que la relación D/B sea

controlada, satisfactoriamente y mantenida tan baja como sea posible. Para esto se requiere de un sistema de circulación eficiente con equipos adecuados para la separación de los sólidos perforados (zarandas, desarenador, desilter, mud cleaners y agitadores).

2. Valor del exponente "n", en promedio, de 0.60 : Este valor es menor que el utilizado en sistemas de lodos dispersos (0.64), por lo que la acción de corte adelgazamiento (shear-thinning) aumenta en este tipo de suspensiones pseudoplásticas, de tal forma que la viscosidad se reduce acercándose a la del agua a medida que pasa a través de los chorros de la broca, disminuyendo así las pérdidas por fricción y obteniendo un mejor aprovechamiento de la hidráulica.
  
3. Relación Punto cedente/Viscosidad plástica, en promedio, de 0.97 : Este valor es un poco mayor que en el sistema de lodos dispersos (0.82), con el fin de compensar la disminución de la velocidad de levantamiento en las secciones agrandadas.

Cabe anotar que en un fluido newtoniano ó cercano a éste, para estos casos, debe agregarse más viscosificante ó de lo contrario, incrementar la presión de bombeo aumentando así la caída de presión en el anular.

5.4 VENTAJAS OPERATIVAS . Las ventajas que se obtienen al utilizar el tipo de lodo semi-disperso son:

1. Aumento en la tasa de penetración . La tasa de penetración se vió incrementada en un 18 % (Tabla N° 6).

Los fluidos de perforación influyen las tasas de penetración de dos maneras:

1.1 Tienden a formar una costra de filtrado en el fondo del hueco, creando una menor presión de rompimiento. Se puede impedir que se forme una costra por debajo de la broca, sin embargo, se forma una costra normal a los lados del hueco si la concentración de sólidos se mantiene en un valor bajo.

1.2 La viscosidad del lodo influye en la eficiencia de remoción de los recortes por debajo de la broca. Mientras más baja es la viscosidad por debajo de la broca, mejor será la remoción; pero la viscosidad significativa es aquella en la que prevalece las condiciones de flujo turbulento, no aquella medida en la superficie.

2. Mayor aprovechamiento hidráulico . Los polímeros poseen propiedades reológicas inusuales, la mas notable de ella es la habilidad para reducir las pérdidas de carga por fricción bajo flujo turbulento.

Consecuentemente las pérdidas de carga en la columna de perforación son considerablemente mas bajas que en aquellos casos en que se emplea lodo convencional.

Para una potencia dada en superficie, habrá una mayor disponibilidad de potencia hidráulica (HHP) en el trépano lo que también mejora el régimen de penetración.



## VI. EVALUACION ECONOMICA

### 6.1 COSTO DEL FLUIDO DE PERFORAR POR PIE PERFORADO

En Petróleos del Perú S.A., la preparación y mantenimiento del fluido de perforar está a cargo de una Cía. de servicio especializada, la cual está representada por un ingeniero de fluidos de perforación que permanece en el equipo de perforar durante las 24 Hrs. del día. La labor de esta Cía. de servicio, es a su vez supervisada por un ingeniero del Departamento de Perforación y eventualmente por otro del Departamento Técnico de Petróleo.

El costo del fluido de perforar se determina sumando los diferentes costos de los materiales que intervienen diariamente en su preparación y mantenimiento; como son: baritina, bentonita, aditivos químicos, agua, diesel, etc.

Estos costos, así como los materiales utilizados, se anotan en formatos especiales que se completan diariamente a las 24:00 Hrs. por el ingeniero de lodos. Aquí también se incluye el costo del servicio diario de ingeniería que cobra cada Cía. de Servicio.

El costo total del fluido de perforación así obtenido, se divide entre el número de pies perforados, obteniéndose el costo por pie del mismo.

## 6.2 COSTO TOTAL DEL POZO POR PIE PERFORADO

Para obtener el costo total por pie perforado, tenemos que adicionar al costo del fluido de perforar, los costos de operación del equipo de perforar; así como los de las brocas utilizadas en la perforación del pozo. Cabe indicar que los costos de operación del equipo de perforar incluyen los salarios del personal operador, mantenimiento y reparación de los diversos componentes que lo forman, aceites lubricantes, diesel, transportes, etc.

No se consideran los costos del casing de superficie (conductora) de 13 3/8" , casing de 9 5/8" , ni de 5 1/2" . Así también, no se ha tomado en cuenta los costos de los registros eléctricos ni cementación; ya que estos no intervienen en la comparación de los sistemas de lodos.

Finalmente, este costo total se divide entre el número total de pies perforados.

Con relación al número de días de perforación, no se considera las horas y/o días de bajada de casing de 13 3/8",

9 5/8" y 5 1/2"; ni tampoco los de registros eléctricos y cementación.

Como ejemplo para estos cálculos tenemos el pozo 7344 perforado con el Equipo N° 2:

Costo diario del equipo	:	6,094 U.S.\$
Profundidad final	:	4,984 pies
Días de perforación	:	13.17
Costo del fluido de perforar	:	U.S.\$ 27,183 ..(1)

Costos de operación del Eq. de perforar =

= Costo de equipo x días de perforación =  
 = U.S.\$ 6,094 x 13.17 = U.S.\$ 80,258 ....(2)

Costos de brocas utilizadas = : U.S.\$ 22,918 ....(3)

Costo total del pozo = (1) + (2) + (3)

= 27,183 + 80,258 + 22,918  
 = U.S.\$ 130,359

Costo total del pozo por pie perforado =

= Costo total del pozo / profundidad final =  
 = U.S.\$ 130,359/4,894 = 26.64 U.S.\$/pie

Costo del fluido de perforar por pie =

= Costo total del fluido de perforar / profundidad final  
 = U.S.\$ 27,183/4,984 = 5.55 U.S.\$/pie

### 6.3 VENTAJAS ECONOMICAS

Realizando los cálculos de la manera indicada, obtenemos los resultados de costos mostrados en las Tablas N°s 2 y 3, para cada pozo perforado con uno y otro sistema de lodo.

De aquí observamos, que en promedio, el costo del lodo convencional disperso (lignosulfonato) es más económico en 0.69 U.S.\$/pie que el lodo semi disperso. Pero si analizamos el costo total del pozo, que es lo que finalmente buscamos, podemos apreciar que en realidad se obtiene un ahorro significativo de 5.78 U.S.\$/pie al utilizar el sistema de lodo semi-disperso (Tabla N° 6).

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

1. El sistema de lodo semi-disperso es mas económico que el sistema de lodo disperso. Aunque el costo de lodo por pie sea ligeramente mayor en 0.69 U.S.\$/pie, el costo total del pozo perfórado por pie es sensiblemente menor, lográndose un ahorro de 5.78 U.S.\$/pie (ver Tabla N° 5 y Gráfico. N° 3).
2. El rate de penetración aumenta en un 18 % debido a que disminuye la re-perforación de los recortes.
3. Mayor aprovechamiento hidráulico al reducir las pérdidas de carga por fricción en los chorros de la broca.
4. El sistema de lodo semi-disperso requiere de un eficiente sistema de control de sólidos fin de mantener baja la relación de concentraciones de sólidos corregidos a bentonita.
5. El valor del exponente "n" afecta la acción decorte adelgazamiento (shear-thinning) y por ende la viscosidad del fluido de perforar a medida que atraviesa los chorros de la broca.

6. La relación punto cedente/viscosidad plástica afecta la velocidad de levantamiento de los recortes en las secciones agrandadas.
7. El agua de preparación debe tener una dureza de 60 - 80 ppm de  $\text{Ca}^{2+}$  y presencia de cloruros del orden de los 500 a 800 ppm de  $\text{Cl}^{-}$  a fin de no disminuir la efectividad del polímero.

### RECOMENDACIONES

1. Continuar empleando el sistema de lodo semi-disperso en la perforación de pozos ubicados en la zona de Leones ya que significa un ahorro importante de divisas para el país.
2. Estudiar la factibilidad de implementar y desarrollar el uso de este tipo de fluidos de perforación en otros yacimientos.
3. Implementar el uso de limpiadores de lodo (mud cleaners) a fin de mejorar el sistema de separación de sólidos y disminuir la relación de concentraciones de sólidos corregidos a bentonita.

## IX. BIBLIOGRAFIA

1. "Polímeros solubles en agua en la industria de los fluidos de Perforación". Adelina J. Son, Hector Villarreal. Houston, Marzo 1985.
2. "Fluidos de perforación a base de polímeros". Hector E. Guevara, Juan C. Caro, Orlando Pirán, Diego Otero. Cía. Naviera Perez Companc.
3. "Advantages of polymer muds". H.C.H. Darley. Petroleum Engineering, Sept. 1976, Pag. 46 al 52.
4. "Water soluble polymers in the drilling fluids industry". Rod V. Lauzon. 1982.
5. "Non-dispersed polymer mud: A new drilling concept". J.L. Lummus, L.J. Field. Petroleum Engineer, March 1968, Pag. 59 al 65.
6. "Lodos polímeros". Carlos Nasser. Magco-bar drilling fluids.
7. "Polymer application guide". Magco-bar drilling fluids.

8. "Polymer drilling fluids system". NL Baroid/NL Industries Inc.
9. "Monpac". Montello product bulletin - 11/82. Oklahoma.
10. "Monpac ultra-low". Montello product bulletin 5/86. Oklahoma.
11. "Drispac". Drilling Specialties Company Technical Services Division.
12. "How synthetic organic polymers affect drilling fluids". D.P. Enright, A.C. Perricone. Petroleum Engineer, April 1988, Pag. 55 al 58.
13. "Química Orgánica". Robert T. Morrison, Robert N. Boyd. Fondo Educativo Interamericano S.A. Cap. 32, Pag. 1051 al 1077.
14. "Análisis petrográfico de seis muestras laterales del pozo 7346-Leones". Mauricio Muro. Petróleos del Perú S.A. Agosto 1988.
15. "Manual of Drilling Fluids Technology". NL Baroid/NL industries, Inc.
16. "Tecnología aplicada de lodos". Imco Services.



17. "Composition and properties of oil well drilling fluids".  
George G. Gray, H.C.H. Darley, Walter F. Roggers. Gulf Publishing Company. Fourth edition.
  
18. "Reología de los fluidos de perforación de pozos de petróleo". Boletín API BUL 13D. Mayo 1985. Instituto Americano del Petróleo.