

T
622.24
C672



D-6901

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

TESIS DE GRADO

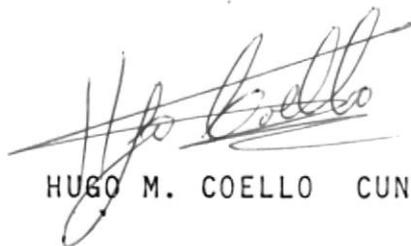
*EL LODO COMO FLUIDO DE PERFORACION.
PREPARACION, COMPORTAMIENTO Y ESTUDIO
DE ALGUNOS TIPOS EN UN LABORATORIO
DE FLUIDOS NONEWTONIANOS.*

POR:

Hugo M. Coello Cuntó

**PARA EL TITULO DE:
INGENIERO DE PETROLEOS
GUAYAQUIL - ECUADOR
1974**

La responsabilidad por los hechos, ideas
y doctrinas expuestas en esta tesis co-
rresponden exclusivamente al autor.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hugo Coello', with a stylized flourish underneath.

HUGO M. COELLO CUNTO

El Patrimonio Intelectual de la presente
Tesis de Grado corresponde a la ESCUELA
SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

A MIS PADRES:

Hugo Coello Maridueña

Italia Cuntó de Coello

A MI ESPOSA:

Elizabeth Ojeda de Coello

A MI HIJO:

Miguel Alfredo Coello Ojeda

A MIS HERMANOS

Héctor

Jorge

Rafael

A MIS COMPAÑEROS DE PROMOCION

A LA MEMORIA DEL INGENIERO:

Alfonso López Herrera, Di
rector del Departamento -
de Perforación del Insti-
tuto Mexicano del Petróleo

AL INGENIERO:

Tarquino López C.
Director de esta
Tesis

MIEMBROS DEL JURADO EXAMINADOR

Carquino Lopez

RESUMEN

La presente tesis presenta una recopilación de datos bibliográficos acerca de los fluídos de perforación que sirven de fundamento para la comprensión de los métodos de preparación y del comportamiento de los lodos en el laboratorio.

Por eso, en los primeros capítulos se tratan generalidades sobre la historia, las funciones y las propiedades de los fluídos estableciendo una relación entre ellas.

En el capítulo 3 se ensaya una clasificación de los mismos fluídos de perforación considerando su composición y su desarrollo natural. Se repasa también someramente el significado de los lodos y sus principales aplicaciones.

En la siguiente parte se pasa a conocer algunos aparatos o instrumentos de medida de las propiedades de los lodos. Con ello, y con la descripción de los procedimientos de operación de los mismos, se abre el camino para la observación del comportamiento de diferentes lodos preparados en un orden y concentración establecida.

Finalmente, y utilizando métodos similares en cada caso, se adicionan a un sistema bentonita-agua algunas sales sódicas y cálcicas conocidas como contaminantes por su frecuente presencia en las alteraciones que experimentan los lodos de perforación.

En todo caso, el trabajo de laboratorio se expone de una manera que invita al estudio y al control del comportamiento de los lodos así como también a la búsqueda del tratamiento químico adecuado para prevenir o corregir la alteración de sus funciones específicas.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. Generalidades	4
1.1. Breve Historia del Empleo y Desarrollo de los Fluídos de Perforación	4
1.2. Definición de Fluído de Perforación	8
CAPITULO 2. Propiedades y Funciones de los Fluídos de Perforación.	9
2.1. Propiedades. Importancia del Conocimiento de ellas.	9
2.1.1. Densidad	
2.1.2. Viscosidad	
2.1.3. Gelatinosidad	
2.1.4. Enjarramiento y filtración	
2.1.5. Potencial de Hidrógeno, pH	
2.1.6. Poder de Lubricación	
2.1.7. Resistividad	
2.1.8. Tensión Superficial	
2.2. Funciones	24
2.2.1. Limpieza del Agujero	
2.2.2. Enfria y lubrica la Sarta de Perforación y la Barrena	
2.2.3. Enjarra las Paredes del Agujero	
2.2.4. Evita Reventones	
2.2.5. Evita pérdidas de Circulación	

2.2.6. Evita Derrumbes	
2.2.7. Evita Pegadas de Tubería	
2.2.8. Otras funciones	
CAPITULO 3. Clasificación de los Fluídos de Perforación	32
3.1. Agua	32
3.2. Aceite	33
3.3. Gases	33
3.4. Espumas	35
3.5. Lodos	36
3.5.1. Lodos Naturales	
3.5.2. Lodos Bentoníticos Sódicos tra tados con Fosfatos	
3.5.3. Lodos Bentoníticos tratados con Tanino y Sosa	
3.5.4. Lodos Bentoníticos Sódicos tra- tados con Cromoligno-Cromoligno sulfonato	
3.5.5. Lodos Rojos	
3.5.6. Lodos Cálcidos	
3.5.7. Lodos Base Yeso	
3.5.8. Lodos Salados	
3.5.9. Lodos de Bajo contenido de Sól <i>i</i> dos Dispersos	
3.5.10 Lodos de Bajo contenido de Sól <i>i</i> dos no Dispersos	

	Pág.
3.5.11. Lodos de Emulsión Inversa	
3.5.12. Lodos Base Aceite	
3.6. Lodos Aereados	48
CAPITULO 4. Aparatos Principales Utiliza <u>dos</u> en la Determinación de Propiedades de los Fluídos - de Perforación. Métodos de Prueba.	50
4.1. Determinación de la Densidad	50
4.2. Determinaciones Reológicas	51
4.2.1. Viscosidad y Punto de Ceden- cia.	
4.2.2. Gelatinosidad	
4.3. Determinación de Propiedades de En- jarramiento.	54
4.4. Determinación del Porcentaje de A- ceite, Agua y Sólidos.	59
4.5. Determinación del Potencial de Hidró- geno.	61
4.6. Determinación de la Estabilidad de <u>E</u> mulsiones	
4.7. Determinación del Poder de Sellamien <u>to</u>	
4.8. Determinación de la Tensión Superfi- cial	64
4.9. Determinación del Poder de Lubrifica- ción.	67

	Pág.
CAPITULO 5. Preparación de Algunos Tipos de Lodos. Comportamiento a diferentes Concentraciones.	69
5.1. Lodo Bentonítico Sódico	74
5.1.1. Preparación	
5.1.2. Resultados de las Pruebas	
5.2. Lodo Cálcico	76
5.2.1. Preparación	
5.2.2. Resultados de las Pruebas	
5.3. Lodo Base Yeso	78
5.3.1. Preparación	
5.3.2. Resultados	
5.4. Lodo Salado	81
5.4.1. Preparación	
5.4.2. Resultados de las Pruebas	
5.5. Lodo Base Agua Emulsionado	84
5.5.1. Preparación	
5.5.2. Resultados de las Pruebas	
5.6. Lodo de Emulsión Inversa	87
CAPITULO 6. Adición de Contaminantes al Lodo Bentonítico sódico. Comportamiento.	89
6.1. Adición de Cloruro de Sodio	89
6.2. Adición de Hidróxido de Sodio	91
6.3. Adición de Sulfato de Sodio	91
6.4. Adición de Carbonato de Sodio	92
6.5. Adición de Cloruro de Calcio	93

	Pág.
6.6. Adición de Hidróxido de Calcio	94
6.7. Adición de Sulfato de Calcio	94
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES	103
NOMENCLATURA	106

SECCION CUADROS

	CUADRO
Relación de las funciones que deben cumplir los fluídos de perforación con respecto a sus propiedades.	2.1
Fluídos de Perforación.	3.1
Satisfacción de las Funciones por los diferentes Fluídos de Perforación.	3.2
Características de trabajo de los Lodos. Experiencias de Campo.	3.3

SECCION FIGURAS

	FIGURA
Deslizamiento de Planos en un Fluído.	2.1
Curvas de Flujo.	2.2
Representación gráfica de V_a , V_p y P_c .	2.3
Representación de la Gelatinosidad de dos Lodos de Perforación.	2.4
Influencia de la concentración sobre la Tensión Superficial de las soluciones Acuósas de los Acidos Grasos.	2.5
Disposición diagramática de la Circulación del Lodo en el Equipo de Perforación.	2.6

Balanza de Lodos.	4.1
Viscosímetro Fann VG Modelo 35.	4.2
Curva Típica de Flujo.	4.3
Filtro Prensa Ordinario Baroid.	4.4
Filtro Prensa de Alta Presión y Alta Temperatura Magco ^u bar.	4.5
Retorta de Destilación Baroid.	4.6
Potenciómetro Beckman.	4.7
Probador de Emulsiones Fann.	4.8
Obturómetro PEMEX-IMP.	4.9
Probador de Presión Extrema Baroid.	4.10
Lodo Bentonítico Sódico. Variación de Vp, Va, Pc con la Concentración de Bentonita.	5.1
Lodo Bentonítico Sódico. Variación de Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de bentonita.	5.2
Lodo Cálxico. Variación de Vp, Va, Pc con el pH.	5.3
Lodo Cálxico. Variación de Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con el pH.	5.4
Lodo Cálxico. Variación de Vp, Va, Pc con la concentración de Quebracho.	5.5
Lodo Cálxico. Variación de Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de Quebracho.	5.6
Lodo Cálxico. Variación de Vp, Va, Pc con la concentración de Cemento.	5.7

Lodo Cálxico. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y AP.A.T. con la concentración de C_e mento.	5.8
Lodo Base Yeso. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de CMC.	5.9
Lodo Base Yeso. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de CMC.	5.10
Lodo Base Yeso. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de Yeso.	5.11
Lodo Base Yeso. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y AP.A.T. con la concentración de Yeso.	5.12
Lodo Base Yeso. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de CLS.	5.13
Lodo Base Yeso. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de CLS.	5.14
Lodo Salado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de Atapulguita.	5.15
Lodo Salado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. con la concentración de Atapulguita.	5.16
Lodo Salado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de Almidón.	5.17
Lodo Salado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. con la concentración de Almidón.	5.18
Lodo Salado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de CMC.	5.19

Lodo Salado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. con la concentración de CMC.	5.20
Lodo Cálculo Emulsionado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de diesel.	5.21
Lodo Cálculo Emulsionado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de diesel.	5.22
Lodo Rojo Emulsionado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de diesel.	5.23
Lodo Rojo Emulsionado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de diesel.	5.24
Sistema CL-CLS Emulsionado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de diesel. CASO 1	5.25
Sistema CL-CLS Emulsionado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de diesel. CASO 1.	5.26
Sistema CL-CLS Emulsionado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de diesel. CASO 2	5.27
Sistema CL-CLS Emulsionado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de diesel. CASO 2.	5.28
Sistema CL-CLS Emulsionado. Variación de V_p , V_a , P_c con la concentración de diesel. CASO 3	5.29
Sistema CL-CLS Emulsionado. Variación de G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I. y A.P.A.T. con la concentración de diesel. CASO 3.	5.30

Contaminación con NaCl. Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.1
Contaminación con NaCl. Efecto sobre Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I.	6.2
Contaminación con NaOH. Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.3
Contaminación con NaOH. Efecto sobre Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I.	6.4
Contaminación con Na ₂ SO ₄ . Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.5
Contaminación con Na ₂ SO ₄ . Efecto sobre Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I.	6.6
Contaminación con Na ₂ CO ₃ . Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.7
Contaminación con Na ₂ CO ₃ . Efecto sobre Gi, G ₁₀ . Filtrado A.P.I.	6.8
Contaminación con CaCl ₂ . Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.9
Contaminación con CaCl ₂ . Efecto sobre Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I.	6.10
Contaminación con Ca(OH) ₂ . Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.11
Contaminación con Ca(OH) ₂ . Efecto sobre Gi, G ₁₀ , Filtrado A.P.I.	6.12
Contaminación con CaSO ₄ . 2H ₂ O. Efecto sobre Vp, Va, Pc.	6.13

	FIGURA
Contaminación con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Efecto sobre G_i , G_{10} , Filtrado A.P.I.	6.14

SECCION TABLAS

	TABLA
Lodo Cálxico. Variación del Enjarre, pH y Alcalinidad con las concentraciones de Sosa, Quebracho y Cemento.	5.1
Lodo Base Yeso. Variación del Enjarre, pH y Alcalinidad con las concentraciones de CMC, Yeso y CLS.	5.2
Lodo Emulsionado. Variación del Contenido de Agua, de Aceite y de Sólidos con la concentración de Diesel.	5.3
Lodo Emulsionado. Variación del Enjarre, pH, y Densidad con la concentración de Diesel.	5.4
Lodo Emulsionado Inversa. Variación de diferentes Propiedades con la Relación Aceite-Agua.	5.5
Adición de NaCl. Efecto sobre el pH y Cl^- del filtrado.	6.1
Adición de NaOH. Efecto sobre el pH y la Alcalinidad.	6.2
Adición de Na_2SO_4 . Efecto sobre el pH y la Alcalinidad.	6.3
Adición de Na_2CO_3 . Efecto sobre el pH y la Alcalinidad.	6.4

TABLA

Adición de CaCl_2 . Efecto sobre el pH y Cl^- del filtrado.	6.5
Adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Efecto sobre el pH y la Alcalinidad.	6.6
Adición de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Efecto sobre el pH.	6.7

BIBLIOGRAFIA

I N T R O D U C C I O N

Cuando las investigaciones geológicas y geofísicas han indicado los lugares donde se puede encontrar aceite, se perforan pozos para probar la existencia de esos hidrocarburos y para tener alguna idea sobre la extensión del reservorio.

Luego se perforan los pozos de producción para extraer el petróleo y llevarlo a la superficie de la manera más adecuada a las necesidades existentes.

Los pozos petrolíferos actuales muchas veces alcanzan grandes profundidades siempre atravesando variadas formaciones geológicas cuyo conocimiento es un requisito previo para el diseño de programas de cementación, de barrenas, de flúidos de perforación, etc.

Particularmente, los programas de flúidos en un pozo y su control, son conocidos desde hace un cuarto de siglo. A partir de esos inicios fundamentales se han perfeccionado poco a poco una serie de flúidos especiales y una variedad de equipos que prueben la calidad de los mismos.

La mayor parte de los estudios en el laboratorio de los flúidos de perforación se realizan debido a los problemas que se repiten en el campo lo cual obliga a llevar un control experimental de los flúidos y sus componentes estableciendo rangos de trabajo estimables.

El control de los flúidos de perforación se generaliza

a las etapas de reparación y terminación de pozos, pues se tiene en mente que en la búsqueda del petróleo y en la productividad del yacimiento, afecta de manera considerable algunas veces el mayor o menor daño que sufren las formaciones productoras.

Es por cierto claro que cuando hay invasión de fluidos extraños a las formaciones no se pueden obtener, con los registros eléctricos, datos precisos sobre los fluidos que contienen dificultándose el conocimiento de la realidad productora de un pozo.

También serán poco confiables los datos de los registros eléctricos y los análisis de núcleos cuando no se previene la excesiva filtración o las altas densidades que pueden provocar presiones hidrostáticas elevadas confinando a los fluidos del yacimiento u ocasionar fracturas en las capas facilitando la pérdida de circulación.

Para evitar esos problemas y otros inherentes a la perforación, el fluido deberá cumplir ciertas funciones específicas dentro de las cuales se considera también el interés creciente en disminuir los tiempos y riesgos de la perforación. Esto obliga al mismo tiempo, a establecer procedimientos y métodos de prueba, diseñar sistemas e instalaciones y programar oportunamente los materiales necesarios.

Buena parte de la extensa literatura que existe al respecto ha servido para ordenar esta tesis con el fin de que

se tenga un medio de consulta rápido y fácil para la comprensión del trabajo desarrollado y de otros que se puedan efectuar en un laboratorio de fluidos de perforación.

C A P I T U L O 1

GENERALIDADES

1.1. BREVE HISTORIA DEL EMPLEO Y DESARROLLO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION.^{1, 6, 11, 17, 18.}

Se tiene conocimiento que en las antiguas perforaciones de sondeo se adicionaba el agua con el fin de ablandar la roca y transportar los recortes hacia la superficie. Pero realmente es muy poco lo que se conoce sobre el uso del fluido de perforación en las primeras operaciones que se realizaron con herramienta de cable.

Prácticamente, la gran utilidad del fluido de perforación se desprende con el desarrollo del sistema rotatorio - constituyéndose en la base principal del progreso de las perforaciones rotatorias.

En poco tiempo los perforadores se dieron cuenta que el agua conteniendo arcilla daba mejores resultados que agua pura. Se evitaban así, derrumbamientos en la pared del pozo reduciéndose también la cantidad de agua perdida a través de las formaciones porosas.

La primera discusión sobre los lodos de perforación data del año 1914 realizada en Oklahoma por Heggen y Pallard. En ella recomendaban que en los equipos de percusión se mantuviera el agujero lleno de lodo para evitar los reventones. Strond

en 1921, recomienda que se debe agregar un material inerte para aumentar la presión hidrostática y evitar mejor los reven-tones, utilizándose por primera vez sulfato de bario (barita) en lugar de óxido de hierro.

Posteriormente, en 1929 se descubrió el uso de las bentonitas con buenos resultados. También en este año aparecen los primeros reactivos químicos para tratar los lodos conocidos.

A mediados de 1930 se trató de resolver el problema de las lutitas deleznales, mediante el empleo de lodos a base de silicato de sodio. Luego, en 1931, Marsh empezó a desarrollar los aparatos para verificar las propiedades del lodo. Introdujo el embudo para viscosidades. Así mismo se conoció el viscosímetro Stormer y el gelatinosímetro. A partir de este año se considera que comenzó a desarrollarse en grande la técnica de los lodos.

Por el 1937 se definieron casi todas las técnicas de laboratorio y de aparatos utilizados actualmente.

A medida que se aumentaba la profundidad de perforación, se necesitó el uso de reactivos para mejorar las características de los lodos nativos y controlar altas presiones, lutitas desmoronables, contaminaciones de sal, de anhídrita, etc.

Al final de los 30 el empleo de materiales reductores de

viscosidad se limitaba al quebracho (tanino) combinado con so sa cáustica iniciándose la utilización de almidones para el control de la pérdida de agua.

Para controlar la pérdida de circulación se tenía la mica como uno de los mejores aditivos aunque también se utiliza ba el papel celofán.

A partir de 1940 aproximadamente, es más notorio el progreso de la técnica del empleo de nuevos aditivos para los fluídos de perforación. Se amplían también los estudios de laboratorio para poder comprender el mecanismo bajo el cual actúan dichos aditivos. Se inició el uso de fosfatos para controlar más fácilmente la viscosidad así como también se puntualizaron los límites de potencial de hidrógeno (pH) entre los cuales funcionaba mejor el quebracho. Puesto que el empleo de los fosfatos no era suficiente para controlar la viscosidad en los lodos de alta densidad, se introdujeron los lodos de cal que influenciaron más de 15 años en la tecnolo gía de los fluídos de perforación.

Por otro lado los lodos salados vinieron a resolver los problemas que presentaban los lodos sódicos frente a la presencia de lutitas saladas.

Antes de 1952 ya se utilizó por primera vez un lodo base continua aceite con fines de reparación de pozos. Poco tiempo después se generalizó el empleo de los lodos emulsionados con

aceite con lo cual se disminuyó notablemente el tiempo de perforación. Por ese tiempo aparece la carboximetil celulosa de sodio (CMC) como un reductor de filtrado no fermentable.

Posteriormente, en 1955 se utilizaron los lignosulfonatos destacando en su empleo dos tipos de ellos: cromolignosulfonato sódico o amónico y los ferrocromolignosulfonatos. Entonces los lodos cálcicos son desplazados por los sistemas - cromoligno-cromolignosulfonatos (CL-CLS) debido a su mejor resistencia a la temperatura. En algunos lugares y con cierto éxito se comenzó por tratar de perforar con aire.

En la década del 1960 se introdujeron los detergentes - con el objeto de impedir el embolamiento de la barrena; también los lodos de emulsión inversa, los de base aceite y las espumas como fluídos de perforación. Al mismo tiempo que los sistemas de lodos cambiaban, los materiales obturantes usados en el control de las pérdidas de circulación, también evolucionaban. De los obturantes del tipo rígido como la mica, las fibras de caña y de madera, se pasó a las mezclas de obturantes fibrosos y granulares.

En la actualidad la dirección de los estudios futuristas parece que se encaminan hacia el uso de pocos pero más estandarizados materiales, que teniendo propiedades específicas, - venzan las dificultades presentes en la perforación.

1.2. DEFINICION DE FLUIDO DE PERFORACION ^{17,18}

Heggen y Pollard en 1914 definieron por primera vez al lodo como fluido de perforación diciendo que "... era una mezcla de agua con cualquier arcilla, la cual queda suspendida en el agua por cierto tiempo". En general, un fluido de perforación puede ser cualquier fluido movable, con propiedades específicas, que puede circularse en el sistema con el fin de coadyuvar a la perforación especialmente para eliminar los cortes.

Los fluidos más empleados son los lodos que usualmente consisten de:¹⁹

- una fase continua,
- una fase dispersa formadora de gel que proporcione viscosidad, tixotropía y enjarre; propiedades que se definen más adelante,
- otros sólidos inertes dispersados; y
- varios aditivos químicos necesarios para controlar las propiedades dentro de los límites deseados.

Vale anotar aquí que los fluidos de perforación constituyen el ingrediente más importante en el complejo programa de una perforación. Ellos afectan directamente la rata de penetración, la estabilidad del pozo, la evaluación de la formación, la productividad de la misma, la operación y uso del equipo, las operaciones de cementación y otras que en resumen inciden en el costo total del pozo.

CAPITULO 2

PROPIEDADES Y FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

2.1. PROPIEDADES.- IMPORTANCIA DEL CONOCIMIENTO DE ELLAS.^{2,7,10,17,19,24.}

Con el fin de resolver algunos de los problemas de la perforación se hace necesario conocer y medir las propiedades del fluido buscando sus relaciones con los problemas específicos. Si una propiedad puede correlacionarse a un problema, tendrá un valor importante pues permite justificar el tratamiento de un fluido para mantener esta propiedad dentro de un intervalo definido.

Muchas de las propiedades del fluido de perforación no son valores únicos que describen al fluido y su comportamiento, sino que dependen de las condiciones bajo las cuales se las determinan. Por ejemplo, la viscosidad de un lodo no es un valor único que determina cómo fluirá un fluido; sino que es función de la temperatura, de la presión y de la rata de corte a la cual se mide. Consecuentemente, hay un número infinito de viscosidades que pueden medirse cambiando las condiciones de medida.

Las propiedades requeridas para un fluido de perforación, así mismo variarán de tiempo en tiempo según sean las condiciones que se presenten en el avance del pozo. Tales condiciones incluyen a los tratamientos químicos y mecánicos, las composiciones de los materiales y las técnicas de perforación.

2.1.1 DENSIDAD.- Es importante el conocimiento de la densidad a lo largo de la mayor parte de la perforación, ya sea que ésta se realice a través de arenas de gas, de aceite, de agua salada o de lutitas, o ya sea que la perforación se lleve a cabo en zonas de producción de baja presión que pueden requerir de altas densidades las primeras y de bajas las segundas. Además, su control es esencial para el desempeño de las funciones que ejecutan los fluidos.

La densidad absoluta o simplemente densidad, es la masa de una sustancia dividida por su volumen. Las unidades más utilizadas se dan en gramos masa por centímetro cúbico (g/cc.), en libras masa por pie cúbico (lb/pie³) y en libras por galón (lb/gal).

La densidad relativa, peso específico o gravedad específica, es la relación de la masa de un volumen dado de una sustancia, entre la masa de un volumen igual de otra sustancia - que se toma como referencia.

La densidad de un fluido de perforación depende de la cantidad y peso específico de sus componentes líquidos y de los sólidos en suspensión. Las densidades comunmente empleadas en perforaciones poco profundas varían de 1.08 a 1.38 g/cc., pero existen casos de presiones anormales en los que se hace necesario el empleo de lodos más densos lo cual se consigue agregando materiales densificantes como barita (sulfato de bario), mineral de hierro, sulfuro de plomo y calizas.

La barita tiene una gravedad específica que fluctúa entre 4.2 y 4.3, es menos costosa que los minerales de hierro, es antiterrosiva en la mayoría de los sistemas y se encuentra más disponible que los otros productos. Los minerales de hierro (hematita, limonita, pirita, galena, etc.) y el sulfuro de plomo se emplean cuando se necesitan lodos con pesos superiores a 2.64 g/cc. en casos en que el pozo amenaza con reventarse, teniendo la mayoría de la sarta afuera del agujero o en cualquier situación donde no puede colocarse la barita en todo el pozo para controlar las altas presiones de formación. Las calizas, gravedad específica 2.7 - 3.2, se usaban cuando se suponía que la invasión de sólidos causaban daños a las formaciones. Esto se basaba en la teoría de que los ácidos remueven las calizas y reducen el daño.

En los casos en que sea necesario alterar el peso de los fluidos se puede emplear la fórmula:¹¹

$$P = \frac{V (D_2 - D_1)}{1 - \frac{D_2}{D_b}} \quad (2.1)$$

donde:

- P = peso del material densificante, gramos
- V = volumen inicial del fluido, mililitros
- D₁ = densidad inicial del fluido, g/cc.
- D₂ = densidad final del fluido, g/cc.
- D_b = densidad del material densificante, g/cc.

2.1.2 VISCOSIDAD.- La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia interna al flujo. Esta propiedad depende principalmente de la naturaleza del fluido, de los materiales que lleva en suspensión, del efecto de la temperatura sobre él, de la rata de agitación que existe en el sistema y de la reopexia o aumento en la velocidad de gelatinización.

Generalmente, el aumento de alcalinidad tiende a aumentar la viscosidad y el aumento de temperatura tiende a reducirla. También, al subir la presión se incrementa la viscosidad, siendo más notable este efecto a presiones considerablemente altas.

La principal función de esta propiedad es la de levantar y suspender los recortes de la formación en el espacio anular. Pero hay que considerar que en una misma formación y manteniendo todas las demás variables iguales, la velocidad de perforación disminuye a medida que se aumenta la viscosidad. Este efecto probablemente se debe a que al aumentar la viscosidad del fluido de perforación disminuye la eficiencia hidráulica de las bombas de lodo; incrementa las pérdidas por fricción en el circuito del lodo y a grandes valores proporcionan un colchón viscoso que disminuye la fuerza de impacto de los dientes de la barrena sobre la formación. Por otro lado, si se permite a la viscosidad llegar a un valor muy alto, el gas de las formaciones puede quedar atrapado en el fluido y no liberarse en la superficie pudiendo producirse reventones por el aligeramien

to de la columna hidrostática.

Analizando un poco más esta importante propiedad, se observa que, si imaginamos una lámina de líquido que se desplaza con una determinada velocidad, el movimiento molecular debe comunicar esta velocidad de arrastre a las capas inmediatas aunque dificultado por las fuerzas de cohesión existentes en el líquido. La fuerza tangencial F necesaria para mantener una diferencia de velocidad dv entre dos capas paralelas de sección A (Fig. 2.1) separadas una distancia d viene dada por la expresión²⁰

$$F = \frac{A \, dv}{d} \times V \quad (2.2)$$

donde el factor de proporcionalidad V es la viscosidad del fluido.

En el sistema cegesimal la viscosidad se mide en poises, que es la fuerza por unidad de superficie, en dinas por centímetro cuadrado, necesaria para mantener una diferencia de velocidad de un centímetro por segundo entre dos capas paralelas de fluido separadas un centímetro. En la práctica se emplea más el centipoise.

Despejando V en la ecuación (2.2) se tiene la siguiente relación muy útil para el estudio reológico o sea el estudio de la deformación y flujo de la materia.

$$v = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{dv}{d}} \quad (2.3)$$

ó

$$v = \frac{(\text{esfuerzo de corte})}{(\text{gradiente de velocidad})}$$

Al gradiente de velocidad también se lo conoce como velocidad o tasa de corte.

De acuerdo con la variación del valor de esfuerzo del corte al variar la velocidad de corte, se han establecido los fluídos newtonianos y los no newtonianos. A una presión y temperatura dada se determina que en los primeros existe una relación constante entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación o de corte resultante como se observa en el gráfico de la Fig. 2.2.²¹ En los segundos no existe tal relación lineal pues la viscosidad variará con la magnitud del esfuerzo de corte aplicado, y en algunos casos, con la duración del esfuerzo.

Hasta ahora no se ha propuesto una relación general que describa exactamente el comportamiento del esfuerzo - velocidad de corte de todos los sistemas no newtonianos en todas las proporciones de velocidad de corte. Sin embargo, se han establecido tres tipos o modelos ideales: los plásticos de Bingham, los pseudoplásticos y los dilatantes. La mayor parte de los fluídos de perforación son suspensiones coloidales y/o emulsiones que se comportan como fluídos plásticos o no newtonianos y se asemejan al modelo propuesto por Bingham.

Fluídos Newtonianos. Se caracterizan porque presentan una proporcionalidad directa entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de corte resultante, manteniendo constante la presión y la temperatura.

Dentro de esta categoría se puede considerar al agua, los aceites ligeros, etc.

Fluídos seudoplásticos. Para éstos la relación (2.3) no es constante. Más, si a esa relación se la define como una "viscosidad aparente", (V_a) se notará (Fig. 2.2) que para los materiales seudoplásticos, la viscosidad aparente es bastante alta para bajos esfuerzos de corte y decrece a medida que aumenta el esfuerzo. Ejemplos de este tipo son las soluciones de latex y algunas de jabón.

Fluídos Dilatantes. Presentan un comportamiento reológico opuesto al de los seudoplásticos, pues la viscosidad aumenta al aumentar el esfuerzo de corte. A esta categoría pertenecen las resinas vinílicas y el engrudo de almidón.

Fluídos plásticos de Bingham o Ideales. De manera diferente a un fluido newtoniano, un plástico de Bingham no se deformará continuamente hasta que el esfuerzo de corte aplicado supere a cierto valor mínimo conocido como punto de cedencia o punto cedente del material (P_c). Después que se ha logrado ese valor, incrementos iguales del esfuerzo de corte producirán también incrementos iguales de la velocidad de corte -

en la proporción denominada "viscosidad plástica", V_p . Ejemplos: aparte de los fluídos de perforación, están las lechadas de cemento, y la mayor parte de las suspensiones de sólidos que en general tienden a asociarse con la fase líquida.

La ecuación que gobierna esta clase de fluídos es:

$$T = P_c + V_p (C) \quad (2.4)$$

donde T = esfuerzo de corte

P_c = punto cedente

V_p = viscosidad plástica

C = velocidad de corte

El punto de cedencia o valor inicial del esfuerzo de corte, es una medida de las fuerzas que existen entre las partículas del fluído como resultado de cargas eléctricas positivas y negativas localizadas sobre o cerca de la superficie de las partículas. Si se deja en reposo al fluído las fuerzas tienden a mover las partículas sólidas por todos lados hasta alcanzar un arreglo geométrico donde las fuerzas de atracción y repulsión están saturadas. En otras palabras, los fluídos plásticos en reposo adquieren una consistencia gelatinosa, que desaparece por agitación. A este proceso reversible o isotérmico se denomina "tixotropía". En resumen, el punto de cedencia depende de la concentración en volumen de los sólidos, de sus propiedades de superficie y del campo eléctrico de los mismos

(concentración y tipo de iones en la fase líquida).

La viscosidad plástica es aquella parte de la resistencia al flujo que representa la fricción mecánica entre los sólidos presentes en el fluido, entre los sólidos y el líquido que los rodea y por el deslizamiento de la fase líquida. La magnitud de la viscosidad plástica dependerá entonces de la temperatura de la concentración en volumen de las partículas sólidas, de la forma de las mismas y de la viscosidad de la fase líquida.

En general, el control de las propiedades de viscosidad del lodo en el campo, está dirigido a mantener una constante y preferiblemente baja resistencia al flujo.

La viscosidad aparente de un líquido plástico es la que se determina a una sola velocidad de corte, suponiendo que ese valor corresponde a la de un fluido verdadero.

En la Fig. 2.3 se definen también los valores de las viscosidades y del punto cedente para un fluido de perforación típico.¹¹

2.1.3 GELATINOSIDAD. Esta propiedad depende básicamente del comportamiento tixotrópico del fluido, el cual varía con el gradiente geotérmico.

Los valores de la gelatinosidad pueden controlarse con los reactivos empleados para reducir viscosidades, dependiendo su

uso de las condiciones particulares de cada fluido de perforación.

Una elevada gelatinosidad puede causar el pegamiento de la tubería o cuando menos que las bombas trabajen con excesiva presión.

El potencial de hidrógeno del fluido, la contaminación de cemento, la de anhídrita y otras, son algunos factores que aumentan la gelatinosidad.

Fuerza de gelatinosidad o de gel. Esta es una medida del esfuerzo de corte requerido para producir una deformación permanente del gel, después de un tiempo de reposo dado.

La fuerza de gelatinosidad se refiere a la fuerza final del gel después de que un flujo ha permanecido sin movimiento el tiempo suficiente para que la fuerza mencionada llegue a un máximo.

Rapidez del gel. Es el tiempo que toma para formarse el gel. Esto es, si el gel se forma lentamente después de que el fluido está en reposo, se dice que ésta es baja, o si este proceso ocurre en un tiempo relativamente corto después de que cesa el movimiento, la rapidez del gel se afirma que es alta.

En la Fig. 2.4 la curva A ilustra un lodo que tiene una

más alta gelatinosidad y una más baja fuerza de gelatinosidad final, que el lodo representado por la curva B. Es de notarse que en ambos casos el gel formado rápidamente en un principio, alcanza finalmente un valor constante después de cierto tiempo de reposo de cada lodo. La pendiente de la línea punteada puede considerarse que es el promedio de rapidez de gel indicada por cada uno de estos lodos, basada solamente en una lectura y en un tiempo de asentamiento de diez minutos. Sin embargo, el verdadero valor de la rapidez de gelatinosidad en un tiempo dado, será la pendiente de una tangente a la curva. Así se ve que la rapidez de gelatinosidad de cualquier lodo, es un máximo inmediatamente de que cesa la agitación y llega a ser cero, cuando se ha alcanzado la fuerza final de gel.

El valor de la gelatinosidad usualmente se mide a 10 segundos, G_1 , y a 10 minutos G_{10} , para el mantenimiento de los fluídos de perforación. Comúnmente se lo expresa en libras/100 pies cuadrados.

2.1.4. ENJARRAMIENTO Y FILTRACION.- Es la propiedad que tienen los coloides de formar una película, costra o enjarre relativamente impermeable en las paredes del pozo, para consolidar la formación, retardar el paso del fluído a la misma y lubricar la tubería.

Los factores primordiales que afectan a esta propiedad - en los fluídos de perforación son:

- concentración y clase de los sólidos, especialmente los de dimensiones coloidales.
- constitución química de la fase acuosa.
- tensión superficial del fluido de perforación.
- presencia de electrolitos provenientes de las formaciones.
- presión diferencial entre la columna hidrostática y la presión de formación.
- tipo de la formación que se atravieza (porosidad, permeabilidad).
- temperatura, que afectará la rapidez de pérdida del fluido al disminuir su viscosidad.

En cuanto a la unidad de medida no existe una para determinar el valor del enjarramiento en un fluido de perforación, pero existen métodos en los cuales se mide el valor relativo - que permite preveer su comportamiento y su control así como el del filtrado. Comunmente se utiliza la prueba a baja presión (A.P.I.) y la prueba a alta presión y alta temperatura (A.P.A.T.)

2.1.5 POTENCIAL DE HIDROGENO (pH). La concentración del ión hidrógeno se utiliza para expresar el grado de acidez o alcalinidad de un fluido de perforación. Debido a que los valores numéricos para la concentración del ión hidrógeno a menudo son fracciones extremadamente pequeñas (por ejemplo, 1/10000000). se utiliza la unidad pH. Esta unidad se define como el negativo del logaritmo de la concentración del ión hidrógeno.

Básicamente, puede describirse al pH como una medida de la acidez o alcalinidad de una sustancia. Para el efecto se emplea una escala que se extiende desde cero hasta catorce, - con siete como punto neutral (pH del agua pura a 25 grados centígrados), en el cual los iones hidrógeno e hidroxilos existen en igual concentración. Los números mayores de siete indican el grado de alcalinidad mientras que los menores de siete indican el grado de acidez.

La medida del pH se utiliza como una ayuda en la determinación de las necesidades para el control químico del fluído así como para indicar la presencia de contaminantes como el cemento, el yeso, etc. El potencial de hidrógeno adecuado para cualquier fluído de perforación, depende del tipo de lodo que se está empleando.

2.1.6 PODER DE LUBRIFICACION. Todo fluído de perforación tiene una capacidad de lubricación que le permite cumplir con la función de lubricar las superficies metálicas de la barrena y de la sarta de perforación.

La medida del grado de lubricación determinará la cantidad necesaria de aceite o de aditivos especiales que disminuyen la excesiva torsión de la herramienta.

Las propiedades lubricantes del lodo se indican, en un laboratorio, con la medida del coeficiente de fricción.

2.1.7. RESISTIVIDAD. Fundamentalmente, la determinación de la resistividad es la medida de la resistencia al flujo de la corriente eléctrica a través de una muestra de forma conocida.

La resistividad eléctrica se toma en el lodo, en el filtrado y en el enjarre. Es aconsejable medirla durante la perforación para permitir una mejor evaluación de las características de las formaciones perforadas a partir de los registros eléctricos.

Se anota también que esta propiedad, que se expresa en ohm-metro, depende de los electrolitos de la formación, del tratamiento químico del fluido de perforación, del porcentaje de sólidos, del porcentaje de aceites y de la temperatura.

2.1.8 TENSION SUPERFICIAL. Una superficie líquida tiende a reducir su área al mínimo debido a las fuerzas sin balancear ocasionadas por la atracción molecular que se producen en la superficie. Las moléculas que se encuentran en la superficie son atraídas hacia el seno del líquido, produciendo la contracción de la superficie y dando lugar a una fuerza en el mismo plano de la superficie.^{22,23.}

Este hecho explica la forma esférica de las partículas, la elevación del agua en un tubo capilar y el movimiento de un líquido a través de un sólido poroso.

La fuerza que actúa a lo largo y paralelamente a la superficie se define como tensión superficial que normalmente se expresa en dinas por centímetro.

En un líquido esta propiedad disminuye al elevarse la temperatura y alcanza un valor muy pequeño a unos cuantos grados bajo la temperatura crítica.

En cuanto a la fase intermedia entre dos líquidos mutuamente saturados, ésta tiende a contraerse y, en principio, la tensión interfacial presente puede medirse utilizando los métodos que se usan para determinar la tensión superficial.

Las tensiones interfaciales son más sensibles a las impurezas que las superficiales. La adición de un tercer componente puede disminuir la tensión superficial considerablemente; pero si ese tercer componente provoca un aumento en la tensión, el efecto será pequeño. En el caso de agregar a una interfase acuosa solución - aire, los solutos tales como los ácidos orgánicos, los alcoholes, los ésteres, los éteres, las aminas, las cetonas, etc. pueden producir un efecto elevado sobre la tensión superficial del agua, como se observa por ejemplo en la Fig. 2.5 con los ácidos grasos. Específicamente, los jabones y los detergentes son muy activos para disminuir las tensiones superficiales e interfaciales.

Entre las ventajas que se obtienen al reducir la tensión superficial de los fluidos de perforación están las siguientes:

- aumento de la velocidad de perforación en algunos tipos de formaciones, especialmente en lutitas.
- más facilidad para eliminar el filtrado de baja tensión superficial.
- con fluídos de baja tensión superficial se evita el embolamiento de la barrena y se reduce el peligro de las pegaduras diferenciales.

2.2. FUNCIONES.- RELACION CON RESPECTO A LAS PROPIEDADES.

Inicialmente los fluídos de perforación fueron empleados en la perforación rotatoria con el fin primordial de lubricar, enfriar la barrena y extraer continuamente los sólidos de la formación. Sin embargo, para llenar los requerimientos de un pozo de perforación petrolífera con el mínimo de dificultades, con mayor rapidez y menores costos, el fluído cumple una gran variedad de funciones.^{2, 9, 17, 19, 24.}

El empleo del fluído de perforación se muestra aproximadamente en el diagrama de la Fig. 2.6.²⁶

2.2.1. LIMPIEZA DEL AGUJERO. En general esta función consiste en limpiar el fondo del pozo, suspender, sacar y eliminar los cortes de la formación.

La rápida y fuerte acción de limpieza sobre los roles de la barrena y el fondo del agujero permiten que los dientes ataquen nuevas rocas lográndose así una mayor vida de la barrena

y más eficiencia en la perforación.

La velocidad ascendente del fluido lleva los recortes hacia la superficie mientras se mantiene suficiente volumen en circulación. Durante la perforación, la velocidad depende de la capacidad de la bomba, del tamaño del agujero y de la tubería de perforación.

A una velocidad determinada, las pequeñas viscosidades y las bajas fuerzas de gel dan más efectividad al levantamiento de los recortes. Se puede deducir esto de la definición general del número de Reynold para los flujos turbulento y laminar (viscoso).

La densidad del fluido tiene un efecto de flotación sobre las partículas; al aumentarla, incrementa la velocidad de arrastre y disminuye la velocidad de asentamiento pero al mismo tiempo disminuye la eficiencia de bombeo.

En los períodos en que no hay circulación, el material grueso y pesado que está en suspensión tiende a sentarse pudiendo producir pegadas de tubería.

Por otro lado, también se desea que los recortes, partículas de arena u otros sólidos caigan en las presas de lodo antes de que regresen a la succión de la bomba. Realmente es difícil preparar un fluido que se gelifique en el pozo pero no en las presas. En general, las propiedades tixotrópicas -

de un fluido tendrán una mayor o menor importancia en el agujero, según las condiciones que se presenten.

2.2.2 ENFRIA Y LUBRICA LA SARTA DE PERFORACION Y LA BARRENA. El fluido de perforación debe absorber calor de la tubería y de la barrena generado por el contacto con las paredes y el fondo del pozo. El calor específico y el volumen circulado, determinan la capacidad de un fluido para absorber ese calor que se disipa al salir el fluido a la superficie.

Mientras tanto con la capacidad de lubricación se busca principalmente disminuir las fracciones en el agujero, llevar a un mínimo las pegadas de tubería y eliminar el embolamiento de la barrena y de los lastrabarrenas.

En algunas oportunidades se agregan al fluido lubricantes de carga máxima para impartir lubricación a la superficie de los cojinetes de la barrena cuando están sujetas a grandes presiones y altas temperaturas. Se incrementan así, las tasas de penetración y la vida de la barrena. También, los materiales de carga máxima desarrollan otras funciones útiles como la reducción de la fuerza de torsión y del arrastre de la tubería, como ayuda para prevenir las pegadas por diferencia de presión o en la liberación de la tubería si esta se pega con la pared del hueco.

2.2.3 ENJARRA LAS PAREDES DEL AGUJERO. A menudo es importante tener un fluido que rápidamente produzca una costra

impermeable en la pared del agujero con el fin de reducir la pérdida de filtración y el engrosamiento del enjarre.

El enjarramiento de un fluido de perforación depende de la cantidad y estado físico del material coloidal. Se ha demostrado repetidamente en el campo que cuando se utiliza un fluido con suficiente contenido coloidal se disminuyen las dificultades de perforación. De modo contrario, un lodo con baja cantidad de coloides y alto contenido de sólidos inertes depositará una gruesa película filtrante que dificulta el movimiento de las herramientas y permite el paso de una cantidad excesiva de filtrado a la formación, lo que puede dar origen a derrumbes.

2.2.4 EVITA REVENTONES. Básicamente la prevención de reventones la constituye el control de las presiones subterráneas. Este control depende de la presión hidrostática del fluido con la que se puede evitar el flujo descontrolado al pozo.

Las reducciones de presión por debajo de la presión de la columna hidrostática puede estar ocasionada en muchos casos por la baja densidad del fluido, por el sondeo efectuado al sacar la tubería, por no llenar el pozo con fluido durante el viaje de la herramienta o por pérdida de circulación. Para evitar la entrada súbita de fluido de la formación al pozo, se necesita agregar al fluido, material densificante finamente dividido.

2.2.5 EVITA PERDIDAS DE CIRCULACION. Una pérdida de circulación se define como la fuga ya sea parcial o total del fluido circulante sin separación de sus componentes, a las formaciones atravesadas. Son comunes en todas las profundidades y con cualquier tipo de fluido.

Las pérdidas de circulación se observan en formaciones - de gravas o arenas no consolidadas, en zonas fracturadas o con cavernas y en los casos donde la presión de la columna ha ocasionado el fisuramiento o el fracturamiento de las capas. El grado de pérdida durante la perforación es una medida de las condiciones de presión y de permeabilidad del estrato penetrado.

Algunos de los problemas que ocasionan las pérdidas del fluido pueden evitarse:

- seleccionando el tipo más adecuado de fluido.
- manteniendo los valores más bajos posibles de viscosidad - plástica, punto cedente y gelatinosidad disminuyendo así las caídas de presión por fricción del fluido.
- controlando, una buena capacidad de acarreo del fluido, evitando el asentamiento de los cortes.
- procurando las mínimas pérdidas de filtrado evitando el hinchamiento de las paredes por hidratación.
- procurando no agregar cantidades elevadas de sólidos que mo

tive incrementos innecesarios en la densidad.

- adicionando aditivos para pérdidas de circulación (obturantes) si se hace necesario trabajar con densidades de fluidos muy altas.
- trabajando con alto porcentaje de aceite en fluido bien emulsionado que contribuye a evitar embolamientos de la herramienta y ayude a proporcionar un movimiento más uniforme de la sarta de perforación dentro del pozo.

2.2.6 EVITA DERRUMBES. Por derrumbes se entiende, la caída de la roca fragmentada (de pared) al agujero perforado lo cual puede ocasionar atoramientos al meter o sacar la tubería de perforación.

Un derrumbe puede deberse a un enjarramiento inadecuado de las paredes, a los efectos de erosión del fluido sobre la pared del agujero, a una tasa excesiva de circulación, a fluctuaciones de presión en el pozo o por permitir que el nivel del fluido disminuya al sacar la tubería.

Similar a otras, la solución a estos problemas dependerá de las condiciones que se presenten en el pozo. De esta manera se definirá el tipo de lodo a emplear para prevenir las graves consecuencias del derrumbe.

2.2.7 EVITA PEGADAS DE TUBERIA. La densidad y las propiedades tixotrópicas tienen principal ingerencia en el atra-

pamiento de la sarta de perforación al meterla, sacarla, perforando o en las pruebas de formación.

La función del lodo es la de evitar las causas que producen pegadas de tubería siendo las más comunes las ocasionadas por derrumbes, por presión diferencial, por formación de enjambre grueso y por el asentamiento de los recortes.

2.2.8. OTRAS FUNCIONES. El cumplimiento cada vez más completo de las actividades anteriores llevan al fluido de perforación a realizar otras funciones de reconocida importancia como son:

- proteger las zonas productoras
- proteger las muestras y los núcleos de las pruebas de formación.
- ayudar a la toma de registros eléctricos.

En los dos primeros casos se cuidará de que el fluido no dañe permanentemente la formación manteniendo la densidad más baja posible y con poco filtrado. En general las necesidades para la evaluación de las formaciones productoras constituyen un factor primordial en la selección de los fluidos de perforación. Las prácticas y el control que se lleve del fluido influirá considerablemente en la información que se obtenga de las formaciones perforadas.

En el caso en que se toman registros eléctricos, la co-

rriente eléctrica generada por el equipo y las respuestas de las formaciones pasan a través del fluido de perforación por lo cual se tratará de mantenerlo con bajas resistividades para tener un conocimiento más preciso de las zonas atravezadas.

Como conclusión de este capítulo se ha establecido en el Cuadro 2.1 un resumen de cómo se relacionan las principales funciones y propiedades de un fluido de perforación con el fin de ayudar a su programación y estudio.¹¹

C A P I T U L O 3

CLASIFICACION DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

De las múltiples clasificaciones existentes, en este capítulo se describirá aquella que considera el desarrollo natural y la composición de los fluidos de perforación. Según esto, se los puede dividir en seis grandes grupos: agua, aceite, gases, espumas, lodos, lodos aereados; tal como aparecen en el Cuadro 3.1.^{3, 7, 10, 11, 18, 19.}

3.1. AGUA

En los principios de la perforación de pozos, el agua fue muy utilizada pero su empleo decayó rápidamente debido a los problemas que producía, como el hinchamiento de las arcillas y el consecuente atrapamiento de la tubería.

Con el agua se sacan los cortes de la barrena solo cuando la velocidad en el espacio anular es lo suficientemente elevada pues por sí misma no posee capacidad de suspensión. La eliminación total de los fragmentos se cumple cuando se utiliza el agua por un solo ciclo ya que de lo contrario se transforma el sistema a un lodo natural por incorporación de las arcillas de la formación. En cambio, la utilización del agua en un circuito cerrado, con la adición de sustancias que inhiben la hidratación de las arcillas, le dió al sistema la denominación de "agua sucia" que, al mejorarse posteriormente, constituyeron los lodos de baja concentración de sólidos no dispersos.

En la actualidad aunque en ciertas áreas es el mejor fluido para la aplicación de métodos de evaluación de formaciones y es el adecuado en zonas de bajas presiones de formación, en otras muchas regiones, es incapaz de llevar a cabo las funciones de los fluidos de perforación (Cuadro 3.2).

3.2. ACEITE

El aceite como fluido de perforación, es utilizado cuando se perfora en zonas productoras de gran potencia que pueden ser dañadas por el agua o en aquellas áreas donde se necesita más información sobre el contenido de agua de la formación.

Aunque las ratas de perforación son menores que las que resultan empleando fluidos a base de agua, el aceite tiene un precio elevado, le falta capacidad de suspensión y de enjarramiento de las paredes, tiene limitaciones por su baja densidad y presenta un alto índice de peligrosidad. Debido a esos factores adversos, su empleo como fluido de perforación prácticamente se ha terminado.

3.3. GASES

Entre el aire, el gas natural, el anhídrido carbónico y el nitrógeno, el primero de los nombrados es uno de los gases más empleados como fluido de perforación. En sus comienzos, a pesar de que en algunos casos se tenían ratas de perforación diez veces más grandes que aquellas utilizando fluidos a base

de líquidos, habían problemas de seguridad, de presiones subterráneas de fluidos y también en la evaluación geológica.

Además, se limitó su uso por no tener capacidad para aislar los acuíferos que terminaban por producir pegadas de tubería. Aparece entonces el empleo de los detergentes que permiten al fluido producir una espuma al encontrarse con el agua. Básicamente, la espuma reducirá la humectabilidad de las lutitas expuestas y eliminará el agua que entra al pozo.

Como característica, los fluidos gaseosos reducen las pérdidas de circulación, la contaminación de la zona productora y el daño de formación, pero no cumplen con las funciones de suspender los cortes, evitar los derrumbes y los reventones, etc. (Cuadro 3.2).

La perforación con gases se considera ideal para evaluar las formaciones porque:

- la circulación del fluido mantiene el hueco más limpio, que la circulación de lodo debido a su alta velocidad.
- se detecta fácilmente la presencia de formaciones productivas de poco espesor y de muy baja presión.
- no existe el efecto adverso de la presión hidrostática del lodo.

3.4. ESPUMAS

En realidad, el sistema de perforación con espumas preformadas es una variación de la perforación con gases aunque en este caso, la presencia de agentes espumantes disminuye el riesgo de incendios y explosiones.

Este sistema consiste en la inyección de una solución - que contiene un agente espumante y substancias estabilizadoras al flujo de un gas, que pasan a través de un "preformador de espumas", hecho de un medio poroso, el cual aumenta la superficie de contacto entre el gas y la solución espumante originando una espuma estable que entra al pozo por medio de la tubería de perforación principalmente para eliminar el agua de la formación.

La calidad de la espuma se controla por las relaciones relativas gas-líquido así como también por la concentración del agente espumante.

De las operaciones efectuadas con este fluido, se concluye que sus buenos resultados se deben a que:

- genera la presión hidrostática necesaria en zonas de baja presión y donde el potencial de acuíferos es bajo.
- cubre la pared del pozo de una película que evita los derrumbes y que se mantiene hasta que se instala la tubería de revestimiento.

- tiene suficiente fuerza ascendente para sacar los cortes a la superficie.
- lubrica y enfría la barrena.
- conduce a mejores terminaciones de pozo, se tienen mejores ratas de perforación y disminuye los problemas de operación.

Así como los gases, por su baja presión hidrostática, la espuma no se puede usar en áreas de presión indeterminada, en formaciones no consolidadas y de lutitas desmoronables. Se requiere también de equipo especial en la superficie para el control y seguridad.

3.5. LODOS

Los fluidos de perforación llamados lodos, son aquellas suspensiones, de materiales dispersos en una fase continua, que tienen la capacidad de suspender otros materiales que le imparten al sistema, densidad, poder de enjarramiento y cualidades tixotrópicas, para satisfacer cada vez mejor sus funciones específicas. En el Cuadro 3.3. aparecen diferentes tipos de lodos con sus intervalos de trabajo.

3.5.1. LODOS NATURALES. Son suspensiones de arcillas naturales, dispersadas por agitación mecánica. Sus propiedades varían ampliamente dependiendo de la calidad de las arcillas utilizadas, de las formaciones perforadas y del agua de que se dispone.

La densidad de este lodo puede estar entre 1.03 y 1.40 g/cc mientras el filtrado tiene valores elevados. Otras limitaciones aparecen en el Cuadro 3.3.

Aunque son ideales para perforar a bajo costo muchos pozos, son muy dañinos a las formaciones productoras debido a sus altos filtrados. En general, este sistema se emplea para perforaciones rápidas y superficiales donde no existen problemas de contaminaciones.

3.5.2. LODOS BENTONITICOS - SODICOS TRATADOS CON FOSFATOS. La arcilla inorgánica llamada bentonita se emplea para formar una suspensión coloidal en agua dulce a la que se agregan los fosfatos para controlar la viscosidad y la gelatinosidad con el fin de dispersar las formaciones arcillosas en el sistema.

Estos lodos pueden tener densidades altas a la vez que permiten el control de la pérdida de agua lográndose un filtrado A.P.I. hasta de 6 ml. El pH aumenta a medida que se incrementa la concentración de fosfatos, llegando a un máximo cuando se utiliza el pirofosfato tetra sódico ($\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$). Ver Cuadro 3.3.

Cuando la cantidad de sólidos dispersos alcanza altos valores, el tratamiento con el fosfato empieza a perder su efectividad, lo cual es más notorio en lodos de elevada densidad. También a temperaturas mayores que 70 grados centígrados, los

fosfatos empiezan a descomponerse perdiendo sus propiedades - dispersantes.

En caso de ocurrir contaminaciones de cloruro de sodio, sulfato de calcio o cemento en cantidades apreciables, los fosfatos son floculados debiendo suspenderse su empleo.

3.5.3. LODOS BENTONITICOS TRATADOS CON TANINO Y SOSA.- Son muy similares a los anteriores pues cambia solamente el tratamiento de control que ahora se efectúa a base de taninos y sosa cáustica.

A estos lodos que mantienen el pH entre 8.5 y 9.5 se los ha denominado de "pH medio".

El tratamiento con tanino y sosa propicia un mejoramiento en el filtrado lográndose valores hasta de 5.0 ml en la prueba A.P.I. Otras características aparecen en el Cuadro 3.3.

En el campo, un fluido tratado con tanino puede usarse desde el comienzo de un pozo hasta su terminación, pero generalmente por economía, se lo emplea cuando la temperatura del pozo ya no permite seguir trabajando con el fosfato o porque las condiciones del pozo exigen el cambio.

3.5.4. LODOS BENTONITICOS SODICOS TRATADOS CON CROMOLIGNO-CROMOLIGNOSULFONATO. Usualmente, el sistema Cromoligno -

cromolignosulfonato (CL-CLS) es un lodo de agua dulce con "pH medio", aunque a menudo el uso de esta combinación de materiales se extiende al lodo con agua salada.

Los cromolignosulfonatos han reemplazado, en la perforación profunda, a los productos tánicos, fosfatos y otros aditivos empleados para el control de las propiedades reológicas de los lodos fase continua agua. También proporcionan un buen control de la filtración dentro de fuertes cambios en el peso y en el contenido de sólidos del lodo. En ciertos casos se les adicionan pequeñas cantidades de carboxi metil celulosa de sodio como reductor de la pérdida de filtrado.

Con la adición de liqñitos y lignosulfonatos se obtienen fluídos de perforación que reducen los efectos de la temperatura, la hidratación de las arcillas y las contaminaciones salinas y cálcicas.

Este sistema de lodos es actualmente el más aceptado dado su amplio rango de trabajo (Cuadro 3.3.). Se pueden obtener filtrados del orden de 0.5 ml A.P.I., también emulsionar con aceite hasta un 20% sin necesidad de agregar un agente emulsionante y mantenerse estable hasta los 180 grados centígrados.

3.5.5. LODOS ROJOS. Son muy similares a los lodos bentoníticos sódicos tratados con taninos, diferenciándose en el pH pues en estos, fluctúa entre 10.5 y 11.5 lo que le permite

al lodo tener una mayor resistencia a las contaminaciones con sal (15000 ppm).

La experiencia en el campo ha demostrado que hay otros tipos de lodos con más estabilidad, por lo que casi se ha abandonado su empleo.

3.5.6. LODOS CALCICOS. Se producen partiendo de los lodos bentoníticos sódicos a los que se les da un tratamiento intensivo con taninos (quebracho por ejemplo) y sosa cáustica, lo cual permite la adición posterior de hidróxido de calcio (CaO) o cemento, para efectuar el cambio de la arcilla sódica en cálcica que es menos hidratable. Para reducir el filtrado se agrega almidón pregelatinizado o se emulsiona el lodo.

La sosa cáustica que se adiciona, mantiene el calcio en los valores suficientes para que auxilie al tanino en la habilidad de dispersión así como también actúa como bactericida cuando se añade el almidón.

El lodo cálcico produce baja viscosidad, gelatinosidad pequeña, buena suspensión del material densificante, facilidad en el control de lodos pesados, tolerancia a las concentraciones relativamente grandes de sales flocculantes y más estabilidad del agujero. Se lo emplea para perforar lutitas hidratables, arcillas y columnas estratigráficas que con tengan altos porcentajes de material calcáreo.

Una de las ventajas principales de estos fluídos es la baja gelatinización que presentan cuando tiene elevada densidad con pH de 12.5. Las altas temperaturas (cerca de los 120 grados centígrados) causan la solidificación del fluído por endurecimiento de las lutitas. En la práctica han sido desplazados por el sistema CL-CLS.

3.5.7. LODOS BASE YESO. A menudo se emplean estos lodos cuando se perforan secciones considerables de yeso y anhidrita, especialmente donde estas formaciones anteceden y/o tienen intercaladas capas de sal y lutita. Se obtienen a partir de lodos bentoníticos sódicos tratados con ferro-cromolignosulfonatos, lignitas y sosa cáustica que permite realizar el cambio de las arcillas de base sódica a cálcica por medio de la adición de sulfato de calcio (yeso) que con el agua controlan la viscosidad y la gelatinosidad. Para el control del filtrado se utiliza el coloide orgánico CMC; obteniéndose los valores indicados en el Cuadro 3.3. Para evitar la fermentación del material orgánico se puede agregar un bactericida o mantener un pH mayor que 12 con alcalinidad mayor que 0.25% de hidróxido de sodio.

La elevada gelatinosidad inicial de los lodos base yeso es desventajosa pues casi no existe sedimentación, lo cual aumenta el peso del lodo y dificulta el control de la viscosidad, constituyendo un serio problema la presencia de gas.

El rango de trabajo con respecto al pH es bastante am-

plio según la cantidad de sosa empleada aventajando a los lodos tratados con cemento o cal pues resisten hasta temperaturas de 140°C. También se ha encontrado que los lodos bentoníticos base yeso evitan más pegadas de tubería que los cálcicos aunque la resistencia a la contaminación salina es similar.

3.5.8. LODOS SALADOS. Son usados principalmente en pozos destinados a atravesar cuerpos salinos de espesor considerable o numerosos filones de sal y algunas veces también cuando se encuentran flujos de agua salada. En las operaciones de reparación se lo emplea como un tipo especial de lodo inhibido que permite evitar daños a las formaciones productoras.

En estos lodos la fase continua es agua saturada de sal a la que se ha agregado la arcilla atapulguita, la cual se hidrata en medios salinos, reemplazando en su función a la bentonita. Además es indispensable el empleo de almidones pregelatinizados o CMC como reductores de filtrado.

La tendencia a formar espuma puede reducirse empleando solamente las pistolas de fondo en las presas de lodo o agregando agentes solubles de actividad superficial.

El pH de los lodos salados tiene un amplio rango de trabajo obtenido por la adición de sosa cáustica pudiendo mantenerse por más tiempo con la adición de cal. (Cuadro 3.3).

Un aspecto importante que hay que considerar es que muchas veces se adapta mejor a las condiciones de perforación - que los fluídos a base de aceite, sobre todo porque el fluído del pozo fácilmente se puede convertir en fluído salino, ahorrando el tiempo que se demoraría en preparar un fluído a base de aceite. Pero también se debe tener presente que su mantenimiento es más difícil cuando se tienen grandes cantidades de sales de calcio, magnesio o potasio.

Con el desarrollo de la producción petrolera en el mar, puede ser provechosa el agua de mar en la preparación de fluídos salados eliminando el transporte de agua dulce durante la perforación.

3.5.9. LODOS DE BAJO CONTENIDO DE SOLIDOS DISPERSOS. Debido principalmente a la baja densidad que presentan, se los emplea con frecuencia como fluídos de terminación o reparación de pozos.

En estos lodos la fase continua es agua y la fase suspensora o dispersa es un polímero del tipo de la carboxi metil - celulosa (CMC) que impide, de manera limitada, la hidratación de las arcillas al recubrir la superficie de los cortes. Por tal motivo, fácilmente se puede convertir a otros sistemas de fluídos de perforación cuando se produce la dispersión de las arcillas naturales.

Con estos fluídos se obtiene menor cantidad de tratamien

to químico, y mayor utilización de la potencia hidráulica. La viscosidad, la gelatinosidad, la densidad y el punto de cedencia son por lo general bajos en estos fluídos, lo cual permite que una gran parte de la potencia disponible para el bombeo sea utilizada para las toberas de la barrena.

3.5.10. LODOS DE BAJO CONTENIDO DE SOLIDOS NO DISPERSOS. Se lo ha desarrollado para la perforación de zonas que no requieren densidades altas como las áreas sin gas donde se presentan formaciones de lutitas compactas, dolomitas, areniscas, etc.

Con el propósito de inhibir la roca perforada se necesita que la fase acuosa del lodo contenga sal (5%) y que el pH se mantenga bajo.

Variando pocas características, se han preparado un número considerable de estos fluídos tratando de evitar el incremento de densidad a la vez que mantener una viscosidad suficiente para suspender y sacar los cortes del agujero.

A los lodos con bajos sólidos no dispersos se los puede preparar:

- utilizando flocculantes para precipitar sólidos.
- agregando aceite y emulsificantes para obtener partículas de gran tamaño, aumentar la viscosidad y controlar el filtrado.

- empleando bentonita de buena calidad para controlar la viscosidad y el filtrado.
- usando un material suspensor como la CMC o el almidón para controlar el filtrado.

Con estos sistemas de lodos se hace necesario el empleo de equipos mecánicos para eliminar los sólidos, tal como las centrífugas decantadoras.

3.5.11. LODOS DE EMULSION INVERSA. Normalmente, para hacer una emulsión se agitan juntos dos líquidos inmiscibles, a ceite y agua por ejemplo, tendiendo a separarse una vez termi nada la agitación. En los fluidos base-agua, el medio en el cual están dispersos todos los componentes químicos es el a gua, formándose la emulsión cuando se agrega algún a ceite. Lo que sucede es que las partículas finamente divididas, que com ponen el fluido, actúan como emulsionantes, formando una capa alrededor de las gotas de aceite, evitando que se junten. - Por la inestabilidad de este tipo de emulsión (mecánica) cu ando la cantidad de aceite se incrementa hasta el 20%, es necesario agregar agentes emulsionantes.

Los más significativos grupos de emulsionantes son los - jabones y los detergentes cuya característica esencial es su afinidad eléctrica por el agua y por el aceite. De esa forma, el emulsionante envuelve una gota de estos líquidos repeliéndolas antes de chocar entre sí, proporcionando mayor estabili

dad a la emulsión.

Los lodos de emulsión inversa tienen como fase continua al aceite y la fase dispersa la forman las miscelas del agua emulsionada (20 - 40%). Sus características están relacionadas a su fase continua, por lo que no son afectados por sales de sodio, magnesio, calcio o potasio ni por sólidos provenientes de los estratos perforados, tampoco filtran agua, por tanto no dispersan ni reblandecen las arcillas.

La mayoría de las veces, las emulsiones inversas son sistemas no iónicos, característica ideal para la perforación de pozos en que se encuentra ácido sulfhídrico y azufre evitando la intensa corrosión de la herramienta producida al emplear lodos base-agua.

Como el filtrado de estos lodos es aceite, tanto en la perforación como en la completación y reparación de pozos, se elimina la acción perjudicial que sobre el yacimiento ocasionan los filtrados de los lodos convencionales afectando la permeabilidad de los mismos debido a efectos de tensiones superficiales.

Las pruebas en el laboratorio indican que las propiedades de las emulsiones varían cuando se cambia la relación aceite - agua. Por lo general, tienen altas viscosidades, bajas gelatinosidades, bajos filtrados y buena resistencia a las presiones a las elevadas temperaturas y a las contaminaciones. (Cuadro 3.3).

Por su elevado costo y alta resistividad se los emplea más comúnmente en las completaciones y reparaciones de pozos y otras operaciones especiales (pescas).

3.5.12. LODOS BASE ACEITE. Están formados esencialmente de aceite diesel en un 98% mezclado con asfaltos oxidados, álcalis, ácidos orgánicos y agentes estabilizadores. El asfalto constituye la fracción coloidal que proporciona viscosidad y forma un enjarre sellante. Un amplio rango de viscosidad y gelatinosidad se obtiene variando la combinación del ácido orgánico y el material alcalino que forman un jabón inestable. Las adiciones del ácido orgánico adelgazan el lodo mientras que adiciones de álcalis lo espesan. A menudo se agregan otros reactivos que sirven como agentes estabilizantes.

La densidad requerida se la puede obtener con carbonato de calcio o sulfato de bario (barita).

La cantidad pequeña de agua que contienen sirve para formar un jabón inestable lo que hace posible el control de las propiedades físicas. Esta agua no puede humectar las formaciones, tampoco puede eliminarse sin destruir al lodo.

La utilidad del lodo base aceite se fundamenta en el hecho de que el filtrado es aceite, lo cual evita la hidratación de las lutitas y de las arcillas atravezadas durante la perforación o presentes en la formación productora.

Estos lodos son particularmente útiles para muestrear, para perforar o terminar pozos en formaciones de baja presión, - de baja permeabilidad. Con los lodos base aceite se pueden efectuar cementaciones comunes o forzadas y tratamientos con ácido sin que se alteren sus propiedades.

Respecto a los registros eléctricos, solo son afectivos los que se llevan a cabo con electrodos de contacto o recurriendo a los registros radioactivos.

Aunque tienen un escaso mantenimiento su costo inicial es elevado y aumenta considerablemente en caso de pérdida de circulación.

Este tipo de lodos debe protegerse lo mejor posible de las contaminaciones por el agua de las lluvias y de los peligros de incendio. Así también, en las partes de caucho que van a estar en contacto con él, deben emplearse hules sintéticos resistentes al aceite.

3.6. LODOS AEREADOS

Son los mismos lodos de fase continua agua que conservan sus características pero que, necesitándose disminuir su densidad en forma temporal durante la perforación, se inyecta aire comprimido al sistema de circulación. Con este procedimiento no solo se disminuyen las pérdidas de circulación, sino que también se aumenta considerablemente la tasa de penetración -

por barrena.

Como fluídos de perforación, los lodos aireados presentan las siguientes ventajas sobre los gases:

- puede penetrarse mejor la zona de agua de baja presión, pues con el gas los recortes llegan a causar puentes o tapones - que provocan pegaduras.
- es más seguro pues en caso de una "venida" únicamente se inyecta lodo para desplazar al aireado que estaba en el pozo, consiguiéndose tener la densidad necesaria para controlar la afluencia.
- se obtienen agujeros menos desviados.
- se pueden obtener fácilmente los recortes.
- se consigue mejor estabilidad en el agujero.

Finalmente, para controlar la corrosión se emplearán inhibidores como el dicromato de potasio por ejemplo.

C A P I T U L O 4

APARATOS PRINCIPALES UTILIZADOS EN LA DETERMINACION DE PROPIEDADES DE LOS LODOS (METODOS DE PRUEBA)

Durante las operaciones realizadas en el laboratorio y en el campo se emplean algunos instrumentos y aparatos que permiten el conocimiento y control del comportamiento de los lodos bajo diferentes situaciones. Como los valores que se obtienen varían de acuerdo a condiciones en que se determinan, es importante conocer aquellos equipos y los métodos utilizados. De entre ellos, se tratarán los más importantes usados en el presente trabajo de laboratorio.^{5, 7, 8, 9, 12.}

4.1. DETERMINACION DE LA DENSIDAD

El instrumento más empleado es la balanza para los lodos (Fig. 4.1) con escala de peso específico desde 0.72 a 2.88 en graduaciones de 0.01 unidades. Para realizar la medición se emplea el siguiente procedimiento:

- se coloca la base de la balanza en una superficie nivelada.
- se llena totalmente la copa con el lodo. Si la copa está mojada, se desecha la primera porción y se vuelve a llenar. No debiendo quedar aire atrapado en la muestra de lodo, se golpea ligeramente la copa hasta que desaparezcan las burbujas.
- se coloca la tapa dándole un ligero movimiento de rotación

hasta que quede firmemente sentada sobre la copa, asegurándose de que un poco de lodo escape por el orificio de purga.

- se lava y seca el exterior de la balanza.
- se coloca la balanza sobre su base y se pesa.
- se toma la lectura en el lado de la pesa - cursor próximo a la copa.

El valor de la densidad se reporta en gramos por centímetro cúbico (g/cc).

La balanza debe calibrarse frecuentemente con agua dulce a 21°C, la cual debe dar una lectura de 1.00 g/cc. El ajuste se hace quitando o poniendo municiones en el depósito especial al extremo del brazo de la balanza.

Es de notar que la temperatura del lodo no afecta la exactitud de las lecturas.¹⁷

4.2. DETERMINACIONES REOLOGICAS

Normalmente se necesita determinar las viscosidades plástica y aparente, el punto cedente y las gelatinosidades (características tixotrópicas) de los lodos para lo cual se ha empleado el Viscosímetro Multitrotacional Fann, modelo 35 (Fig. 4.2).

La medida básica es el esfuerzo al corte necesaria para

hacer girar un rotor sumergido en el lodo que se prueba, el cual está contenido en un vaso que se mantiene estático.

El viscosímetro opera a las velocidades de rotación de 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm efectuando los cambios de velocidad por medio de engranajes y cambios de velocidad del motor.

4.2.1. VISCOSIDAD Y PUNTO DE CEDENCIA. Las lecturas del valor del esfuerzo de corte obtenidas a 300 y 600 rpm en el viscosímetro, están dentro del régimen de flujo laminar de los lodos y forman una recta cuya pendiente es el valor de la viscosidad. (Fig. 4.3).

El procedimiento de medida seguido es así:

- Se agita el lodo por probar a una alta velocidad durante 5 minutos.
- Se vacía al vaso hasta su marca y se coloca éste en su base elevándolo hasta que el nivel del lodo coincida con la marca en el rotor, fijándolo con el tornillo.
- Se arranca el motor a 600 rpm y se toma la lectura correspondiente después de un minuto de haber iniciado la agitación.
- Se cambia la velocidad del rotor a 300 rpm tomando nuevamente la lectura correspondiente, un minuto después de haber iniciado la agitación a 300 rpm.

Como resultados se reportarán:

Viscosidad Aparente, V_a = Lectura a 600 rpm dividida por dos, centipoises.

Viscosidad Plástica, V_p = Lectura a 600 rpm menos lectura a 300 rpm, centipoises.

Punto de Cedencia, P_c = Lectura a 300 rpm menos V_p , lb/100 pie².

4.2.2. GELATINOSIDAD.- En este caso el viscosímetro opera a 3 rpm. Para la medición se repiten los dos primeros pasos del procedimiento seguido en 4.2.1. Luego:

- Se arranca el motor a 600 rpm con el fin de agitarlo durante 2 minutos e inmediatamente se cambia la velocidad a 3 rpm.
- Se para el motor y rápidamente se opera el aparato a las correspondientes 3 rpm.
- La máxima lectura obtenida corresponderá al valor de la gelatinosidad a 10 segundos llamada también de cero minutos.
- Se deja en reposo la misma muestra durante 10 minutos más. Al término de este lapso se efectuará cuidadosamente la lectura a 3 rpm correspondiente al punto máximo alcanzado antes del rompimiento del gel.

Las lecturas obtenidas se registran como:

Gelatinosidad Inicial, G_i = Lectura de 3 rpm a 10 segundos (lb/100 pie²).

Gelatinosidad a 10 minutos, G_{10} = Lectura de 3 rpm a 10 minutos ($lb/100 pie^2$).

En climas cálidos y secos se forma una costra en la superficie del lodo durante los diez minutos de espera. Esta costra debe romperse, especialmente alrededor del rotor, unos segundos antes de tomar la lectura.¹⁷

Tanto en este procedimiento como en el del 4.2.1., el aparato debe calibrarse periódicamente empleando mezclas de glicerina y agua pura a la temperatura ambiente. También hay que limpiar el aparato con el rotor trabajando a 600 rpm sumergido en agua o en un solvente apropiado si se han probado lodos a base de aceite.

4.3. DETERMINACION DE PROPIEDADES DE ENJARRAMIENTO.

Las propiedades de formar un enjarre o costra en la pared del pozo y la pérdida de filtrado se determina por medio de un filtrado prensa (Fig. 4.4.) de área filtrante específica, a una presión de 100 libras por pulgada cuadrada y durante un intervalo de 30 minutos. La prueba consiste en determinar la cantidad de líquido que se extrae de una muestra de lodo y el espesor de los sólidos que quedan retenidos por el papel filtro empleado.

El objeto de esta prueba es también el de conocer los componentes sólidos y químicos del lodo necesarios para formar una película delgada y de baja permeabilidad.

Aunque existen filtros prensa para hacer las determinaciones a elevadas temperaturas y altas presiones, la pérdida de agua determinada a la temperatura ambiente puede corregirse, en forma aproximada, por cambios de temperatura, sabiendo que el filtrado de un lodo es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la viscosidad del líquido filtrado.¹⁹

$$Q_i = Q \sqrt{\frac{V}{V_i}} \quad (4.1)$$

en donde: Q_i = Filtrado a la temperatura T_i .

Q = Filtrado a la temperatura T .

V_i = Viscosidad de la fase líquida a T_i .

V = Viscosidad de la fase líquida a T .

T_i, T = Temperaturas correspondientes.

Los valores así obtenidos, se cumplen si no se cambian las propiedades coloidales del lodo, o en otras palabras que la viscosidad del filtrado sea la única variable.

Comúnmente se hace la determinación del filtrado a 7.5 minutos, se multiplica por dos y se registra este valor como el filtrado a 30 minutos. Este procedimiento no da resultados correctos y se recomienda únicamente cuando se tienen valores muy altos de pérdida de agua. Esta determinación a 7.5 minutos se basa en la ley de filtración que dice: "en un mismo líquido, cuando se utiliza el mismo filtrante y se hace la prueba a la misma temperatura, los volúmenes filtrados son di

rectamente proporcionales a las raíces cuadradas de los tiempos que duren las pruebas".¹⁹

$$\frac{Q_i}{Q} = \sqrt{\frac{t_i}{t}} \quad (4.2)$$

en donde: Q_i = Filtrado a t_i minutos, cc.

Q = Filtrado a t minutos, cc.

t_i, t = Tiempos de filtración, minutos.

La diferencia de valores en el filtrado del lodo calculado a 7.5 minutos y el determinado a 30, se debe principalmente a que en el filtro prensa queda cierta cantidad de filtrado retenido en la parte inferior del papel filtro que no se mide.

El procedimiento para realizar las determinaciones con el filtro prensa ordinario es el siguiente:

- Se tienen limpias y secas todas las partes del instrumento
- Se revisan los empaques de caucho, debiendo cambiárselos en caso de estar gastados o deformados.
- Se ensamblan las piezas de la celda. Se llena con lodo hasta un centímetro antes del borde superior de la celda. Se pone la celda en el marco y se la tapa firmemente. Se coloca una probeta graduada, seca, bajo el tubo de descarga de la celda para recibir el filtrado.
- Se cierra la válvula de escape y se ajusta el regulador de presión hasta obtener 100 lb/plg^2 en 30 segundos o menos.

Empezada la prueba, se comienza a tomar el tiempo.

- A los 30 minutos se mide el volumen de filtrado. Se cierra la válvula de presión, se cierra el regulador y se abre la válvula de escape.
- Se retira la celda del soporte, se tira el lodo, se desarma para obtener el papel filtro con el enjarre. Se lava el enjarre y se mide su espesor.

Se registra el volumen del filtrado (A.P.I.) en centímetros cúbicos, aproximando a 0.1 cc y el espesor del enjarre en milímetros aproximando a 0.5 mm.

En algunas determinaciones se emplea el filtro prensa de alta presión y alta temperatura (A.P.A.T.) con el objeto de tener filtrados bajo condiciones que se aproximen un poco más a las condiciones que presentan los pozos a medida que se los profundiza. (Fig. 4.5). A continuación se describe el procedimiento de prueba para 300°F y 500 lb/plg² utilizando un filtro de área de 3.5 pulgadas cuadradas.

- Se calienta la chaqueta calefactora con la corriente adecuada. Se coloca el termómetro en la chaqueta y se ajusta el termostato del aparato a la temperatura deseada.
- Con la válvula de entrada cerrada y la celda invertida, se llena con la muestra de lodo hasta un centímetro antes del empaque para permitir su expansión.
- Se coloca un papel filtro y se pone el empaque encima del papel.

- Se coloca la tapa de la celda encima del empaque y se apretan después los tornillos únicamente con los dedos.
- Con la tapa de la celda hacia abajo, se coloca dentro de la chaqueta calefactora con todas las válvulas cerradas. Se pone un termómetro en el agujero de la celda.
- Se coloca el receptáculo de contrapresión para prevenir la vaporización del filtrado. Se aplica 100 lb/plg^2 por arriba y abajo de la celda con las válvulas cerradas.
- Se abre la válvula superior suministrando las 100 lb/plg^2 a la muestra que se está calentando. Esta presión disminuye al mínimo la ebullición de la muestra.
- Al alcanzar la temperatura deseada en el termómetro de la celda, se aumenta la presión de la unidad a 600 lb/plg^2 y se abre la válvula de la parte inferior de la celda. Se empieza a tomar el tiempo.
- Si la contrapresión aumenta a más de 100 lb/plg^2 se la reduce cuidadosamente dejando salir un poco del filtrado, manteniendo la diferencia de presión deseada. Se mantiene la temperatura en $\pm 5^\circ\text{F}$.
- Después de 30 minutos de filtración, se cierra la válvula inferior de la celda y después la superior de la misma.
- Se baja la presión de los reguladores y se los vacía cuidadosamente.

- Se desconecta el receptáculo después de pasar el filtrado a una probeta.
- Se desconectan las unidades de presión.
- Se mantiene la celda en posición hacia arriba y se enfria a temperatura ambiente. Por la válvula superior se descarga la presión. Para enfriar la celda con mayor rapidez se la sumerge en agua hirviendo la que se desplazará con agua fría hasta temperatura ambiente.
- Se invierte la celda, se aflojan los tornillos y se quita la tapa.
- Se separa el enjarre, se lo enjuaga, se mide y registra - su espesor en milímetros a la temperatura de prueba.

La pérdida de agua se anota a 500 lb/plg^2 y 300°F , multiplicando por dos el volumen total de filtrado con aproximación de 0.1 cc.

4.4. DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE ACEITE, AGUA Y SOLIDOS

Con el conocimiento del contenido de sólidos y líquidos, se puede tener la información que indique la necesidad de variar la cantidad de agua o de agentes químicos presentes. Así mismo el control apropiado de un lodo de emulsión dependerá del contenido de aceite.

Para la presente determinación se utiliza la retorta de destilación para lodos (Fig. 4.6) con el siguiente procedi-

miento:

- Se saca la retorta del receptáculo aislante, desenroscando el depósito de lodo de la retorta.
- Se rellena la cámara de evaporación con fibra de acero.
- Se llena lo mejor posible el depósito de lodo con la muestra.
- Se coloca la tapa del depósito de lodo, permitiendo la salida del exceso de lodo por el orificio de purga.
- Se limpia externamente todo el depósito sin derramar el lodo.
- Se enrosca el depósito a la cámara de evaporación.
- Se coloca la retorta en la cámara aislante.
- Se cierra la tapa de la cámara aislante.
- Se coloca una probeta graduada debajo de la descarga del condensador. Se puede poner previamente en la probeta de una a dos gotas de líquido humectante para facilitar la separación de las fases agua-aceite.
- Se conecta el aparato a una fuente de corriente eléctrica (115 voltios). Se cierra el circuito eléctrico del aparato.
- Se destila durante 35 minutos, \pm 5 minutos.
- Se abre el circuito eléctrico del aparato.

- Sin mover la retorta, se la deja enfriar durante 10 minutos. Se retira la probeta y se hacen las lecturas correspondientes a los volúmenes de agua y aceite recuperados.

Se registrará el:

Porcentaje de agua = volumen de agua x 10

Porcentaje de aceite = volumen de aceite x 10

Porcentaje de sólidos = 100 - (% agua + % aceite)

Se debe operar este aparato solamente con los voltajes indicados, evitando que se caliente al rojo.

La presencia de humedad en las partes exteriores de la retorta y del condensador es indicio de fugas que producen errores en los resultados.

Como precaución, se debe colocar la fibra de acero de manera uniforme con el objeto de evitar el arrastre de sólidos con el destilado.

4.5. DETERMINACION DEL POTENCIAL DE HIDROGENO, pH.

El método colorimétrico y el electrométrico son los métodos empleados para conocer la concentración de iones hidrógeno del lodo o de su filtrado y que han satisfecho las necesidades presentadas en el campo o en el laboratorio.

Por disponer de facilidades en el laboratorio se emplea con regularidad el método electrométrico utilizando un ins-

trumento de electrodos de vidrio llamado potenciómetro. (Fig. 4.7.)

La operación del potenciómetro se basa en la generación de un potencial eléctrico en un sistema de electrodos sumergidos en la muestra. El potencial se amplifica y se convierte en unidades pH por medio de un voltímetro.

Para obtener la lectura con el potenciómetro se procede como se establece a continuación:

- Se ajusta el instrumento con una apropiada solución reguladora.
- Se oprime el botón de seguridad (standby) que cierra el circuito eléctrico.
- Se lava el extremo de los electrodos con agua destilada y se los seca con papel absorbente.
- Se sumerge el extremo de los electrodos (y el termocompensador para compensación automática de la temperatura) en la muestra.
- Para la compensación manual de la temperatura, se toma aparte la temperatura de la muestra y se la establece en el control de temperatura del aparato.
- Se toma y se registra la lectura del pH oprimiendo el botón correspondiente.

4.6. DETERMINACION DE LA ESTABILIDAD DE EMULSIONES.

Con el objeto de conocer la estabilidad de las emulsiones ya sean de agua en aceite o de aceite en agua, se emplea el probador de emulsiones (Fig. 4.8).

Para realizar las mediciones:

- Se conecta el aparato a la corriente eléctrica.
- Se pone el interruptor multiplicador en la posición X1 con el control del voltaje en cero.
- Se introducen los electrodos en la muestra bien agitada hasta que se cubran con la emulsión.
- Se eleva el voltaje y se mira la franja indicadora del aparato la cual se moverá cuando hay flujo de corriente entre los electrodos.
- Se lee y se registra el voltaje que se produce al cambiar bruscamente la posición de la franja. Si esta desviación no se produce, se pone el interruptor en las posiciones X2 ó X4.
- Se repiten los pasos anteriores.

4.7. DETERMINACION DEL PODER DE SELLAMIENTO.¹⁶

En la prevención de pérdidas y en la recuperación del lodo de perforación se emplean con bastante frecuencia los materiales denominados obturantes. Los obturantes más comunes son los granulares, los fibrosos y mezclas de éstos.

Para conocer el poder de sellamiento de un lodo al que se agregan obturantes granulares se puede emplear el obturómetro Pemex-IMP (Fig. 4.9) siguiendo en procedimiento descrito a continuación.

- Se colocan las roldanas a las placas del obturómetro y se aprietan con el brazo de torsión hasta una lectura establecida.
- Se vacía al tubo del obturómetro el sistema bajo prueba hasta llenarlo totalmente. Durante esta operación debe golpearse moderadamente el tubo con el fin de eliminar el aire.
- Se purga la manguera del aparato y se conecta a la parte superior del tubo haciéndose el apriete con un mazo.
- Se aplica presión por medio de la bomba hidráulica hasta que la aguja del manómetro regrese violentamente a cero.
- Se repite la operación anterior hasta comprobar la máxima presión a la cual no es posible registrar mayor aumento.
- Se reporta la máxima presión leída en el manómetro.

4.8. DETERMINACION DE LA TENSION SUPERFICIAL.

Uno de los métodos más exactos para medir cuantitativamente la tensión superficial se basa en la altura que alcanza un líquido en un tubo capilar. Otros métodos son: la medición de la fuerza necesaria para desprender un aro de la

superficie del líquido, el peso de las gotas que se desprenden de un gotero especial y la reflexión de la luz de ondas formadas en la superficie del líquido.

El procedimiento que se describe utiliza el método del aro de alambre, empleando el tensiómetro.¹⁴

- En una mesa libre de vibraciones se nivela el tensiómetro.
- Se coloca una muestra en un vaso de vidrio. Debe tenerse cuidado de que la muestra no se contamine con agua, con aceite o con cualquier otra sustancia.
- El aro de platino-iridio, perfectamente limpio, se coloca en el gancho y se pone freno al brazo de la balanza.
- El vaso con la muestra se coloca en su soporte. El soporte se levanta hasta que el aro quede sumergido a unos 3 milímetros de la superficie.
- Se quita el freno al brazo de torsión. Con el control del lado derecho del estuche, se nivela el brazo de torsión hasta que su imagen esté en línea con la marca de referencia en el espejo. Debe tenerse cuidado de que el aro se mantenga bajo la superficie del líquido durante esta operación, subiendo o bajando el soporte de la muestra.
- Con el control principal al frente del instrumento, se pone el cero del vernier con el cero de la escala exterior - del indicador de tensión superficial.

- Se baja el soporte de la muestra hasta que el aro esté en la superficie del líquido y con el control del lado derecho del estuche se mantiene el brazo de torsión nivelado con la marca de referencia en el espejo. Al bajar más la muestra, la superficie del líquido estará distendida, pero el índice debe mantenerse al nivel de la marca. Se continúa con los dos ajustes simultáneamente hasta que la película distendida en la superficie del líquido se rompa.
- La lectura de la escala exterior en este punto es la tensión superficial aparente del líquido, en dinas/centímetro, a la temperatura del laboratorio.

Para el cálculo de la tensión superficial verdadera, se emplea:

$$T_{sr} = T_{sa} \times f$$

donde:

T_{sr} = Tensión superficial verdadera.

T_{sa} = Tensión superficial aparente.

f = Factor de corrección.

$$f = 0.7250 + \frac{\sqrt{0.01452 T_{sa} + 0.04534 - \frac{1.679 r}{R}}}{R} \quad (4.3)$$

donde:

R = Radio del aro, centímetros.

r = radio del alambre del aro, centímetros.

D = Densidad de la fase líquida a la temperatura

tura de la muestra, g/cc.

d = densidad del aire a la presión y temperatura ambiente, g/cc.

C = Circunferencia del aro, centímetros.

4.9. DETERMINACION DEL PODER DE LUBRIFICACION.

El probador de presión extrema (Fig. 4.10) es una sencilla máquina diseñada con el propósito de evaluar las propiedades lubricantes de los fluidos de perforación.

Con el probador de lubricación se mide el grado relativo de lubricación de la siguiente manera:¹⁴

- Se coloca el anillo de prueba sobre la flecha cónica que se localiza en la parte baja del eje de la banda. Se ajusta el anillo y se aprieta con la llave con la ayuda de un perno con resorte.
- Se coloca el bloque de prueba en su portador localizado sobre la flecha conectada al brazo de torsión.
- Se colocan aproximadamente 350 ml de la muestra en el recipiente y se coloca éste apoyado sobre la base móvil introduciendo el conjunto del anillo y bloque de prueba, de tal manera que éstos queden cubiertos por la muestra líquida a probar.
- Se coloca el brazo de torsión dentro de la manivela con la que se regula la carga aplicada, éste no debe tener ningun-

na presión en el momento que se conecte el motor.

- Se empieza a aplicar carga con incrementos apropiados de 5 libras cada segundo. En el instante en que el brazo de torsión empieza a indicar la fuerza mínima aplicada, se conecta la alarma del reloj y se sigue aplicando la carga hasta que alcance la marca de 150 libras-pulgadas, esta carga se debe mantener constante durante 3 minutos.
- Cuando suene la alarma, se para el motor y se quita la carga aplicada. Se quita el bloque de prueba y se mide su -desgaste, anotando éste en milímetros.

Los anillos y los bloques deben limpiarse perfectamente de la grasa que los protege contra la oxidación, antes de someterlos a la prueba.

La medida de la capacidad relativa de la lubricación se determina por:

$$P = 9.60 \frac{C}{L} \quad (4.4)$$

- donde:
- P = Resistencia de la película, kg/cm^2 .
 - C = Lectura del brazo de torsión, kg-cm .
 - L = Longitud del desgaste, mm .

C A P I T U L O 5

PREPARACION DE ALGUNOS TIPOS DE LODOS. COMPORTAMIENTO A DIFERENTES CONCENTRACIONES

En muchos trabajos de investigación sobre los lodos y como guía para las operaciones de campo relacionadas, se hace necesario conocer cómo se preparan y cómo se comportan estos fluídos en un laboratorio para fluídos no-newtonianos empleando materiales y equipos comunes y específicos de ellos.

Para el efecto, en esta tesis, se han confeccionado gráficos que muestran el comportamiento de algunos lodos sometidos a pruebas reológicas, de filtración, de concentración de iones hidrógeno, etc.^{4, 6, 8, 9, 18}

Materiales y Reactivos. En la constitución de casi todos los lodos se empleó agua bidestilada como fase continua, evitando en lo más posible la presencia de sales del tipo cloruros o sulfatos que perjudican considerablemente las condiciones del fluído.

Cuando fue necesario se utilizó como material densificante a la barita, un mineral natural de sulfato de bario que es cuatro veces más denso que el agua (4.23 g/cc.). Sus principales funciones en el pozo son las de controlar las presiones de la formación, comprobar la creación de cavernas en formaciones no compactas y facilitar el viaje de la herramienta.

En cuanto al material coloidal se puede establecer que, en general, para entender el comportamiento del lodo de perfo

ración, se necesita comprender un poco a las arcillas.

Las arcillas son materiales de tamaño coloidal que consisten de una o más capas de aluminosilicatos hidratados y que presentan plasticidad cuando se humedecen. Las capas de mineral se apilan una sobre otra como un paquete de naipes manteniéndose unidas por fuerzas residuales de superficie. Al suspender en el agua las arcillas, éstas presentan varios grados de hinchamiento que dependen de su origen y de la naturaleza coloidal y química de cualquier otra substancia presente.

La montmorillonita sódica (bentonita) es la arcilla más importante y la más comúnmente usada para obtener viscosidad y control en la pérdida de fluido.

En las placas de arcilla, la superficie planar o de área mayor, está cargada negativamente y asociada con una nube de cationes que pueden mantenerse muy cerca de la superficie según su carga y concentración. Esto produce un incremento en las fuerzas de atracción entre las placas permitiendo que solamente contengan películas delgadas de agua. Los cationes divalentes (Ca^{++} , Mg^{++}) aumentan aquellas fuerzas a la vez que disminuyen la película de agua mientras que los cationes monovalentes (Na^+) dan lugar a menores fuerzas atractivas entre las placas y el consecuente ingreso de una mayor cantidad de agua. Por tal motivo, la bentonita sódica muestra un mayor hinchamiento en agua que la bentonita cálcica. Cuando la

concentración catiónica en la solución es elevada, los cationes asociados, son forzados a juntarse a la superficie de la arcilla, encogiendo la capa de agua unida y produciendo un menor hinchamiento. Se puede notar esto, en el poco hinchamiento de la bentonita en agua salada.

Por otro lado, para introducirse en la reología de las suspensiones arcillosas, se necesita conocer el estado de asociación de las partículas.

Las partículas planas de arcilla tienen dos superficies diferentes; la cara que está cargada negativamente y el borde que puede estar cargado positivamente cuando se ha desorganizado el enrejado y se expone una superficie de unión interrumpida. Las cargas eléctricas y los cationes asociados que pueden cambiarse, producen un campo de fuerzas eléctricas alrededor de las partículas que determina cómo actuarán las partículas unas con otras. Si los iones se encuentran separados de las partículas, las fuerzas de repulsión entre los planos cargados negativamente son grandes y las placas se dispersarán. Usualmente algo de atracción existe entre las partículas por lo que raramente se presenta una dispersión completa.

Las partículas de arcilla pueden asociarse de tres formas diferentes: cara-cara, borde-borde o cara-borde. La unión de las partículas puede ocurrir en estas formas simultáneamente o con predominio de un tipo de enlace. La asociación cara-cara, o agregación, lleva a la formación de placas

más gruesas o paquetes. Así se disminuye el número de partículas provocando una disminución en la viscosidad. La dispersión, contraria a la agregación, originará grandes viscosidades.

Las placas de arcilla generalmente están agregadas antes de que se hidraten, producida la cual toma lugar cierta dispersión. El grado de dispersión depende del contenido electrolítico del agua, del tiempo, de la temperatura, de los cationes asociados a la arcilla y de la concentración de la arcilla.

La asociación borde-borde o cara-borde es un proceso de floculación con incremento de viscosidad. El enlazamiento de las partículas dependerá de las fuerzas que actúan sobre ellas y a la disponibilidad de partículas a ser unidas.

Ciertos elementos químicos agregados al lodo neutralizan las cargas libres, con el resultado de que las partículas no se asocian mucho borde-borde o cara-borde; el lodo será defloculado. Ejemplos defloculantes son los lignosulfonatos, los taninos y los polifosfatos.

Las arcillas empleadas para elaborar los lodos que se describirán a continuación comprenden una bentonita sódica con 10% de humedad y una mezcla de arcillas comunes de bajo rendimiento con una humedad del 7%.

Equipo y Aparatos. En lo que respecta a los equipos y

aparatos, se utilizaron los siguientes:

- Mezclador con una sola propela o hélice.
- Viscosímetro Fann multitrotacional, modelo 35.
- Vaso metálico apropiado para el mezclador.
- Balanzas granataria y analítica.
- Reloj con alarma.
- Filtro prensa de baja presión, Baroid.
- Filtro prensa de alta presión y alta temperatura, Magcobar.
- Potenciómetro Beckman.
- Balanza de Lodos, Baroid.
- Agitador tipo Dispensor.
- Regulador de Revoluciones para el Dispensor.
- Frascos de vidrio de boca ancha de capacidades mayores que 500 cc.
- Papel filtro apropiado para cada uno de los filtro prensa.
- Equipo común de Laboratorio como: probetas graduadas, vasos de precipitados, buretas, pipetas, agitadores magnéticos, - etc.

Determinaciones realizadas. Las suspensiones preparadas se dejaron en reposo varias horas dando tiempo a que haya una mayor interacción entre los materiales componentes.

Después de ese período se agitaron los lodos por algunos minutos empleando el mezclador. Durante la agitación se pue-

de medir el potencial de hidrógeno con el potenciómetro introduciendo los electrodos en cada uno de los vasos del mezclador.

Inmediatamente se pasaron las suspensiones al vaso del viscosímetro y se procedió a determinar las viscosidades, el punto de cedencia y las gelatinosidades.

Se regresaron las muestras al vaso del mezclador para agitarlas nuevamente por cinco minutos. Se transfieren enseguida al filtro prensa de baja presión para las determinaciones de las propiedades de enjarramiento.

Obtenido el filtrado, se lo pasa a un vaso de precipitados donde se le tomó el pH con el potenciómetro.

Se agitaron 500 ml más de cada una de las muestras de lodo y se pasaron a la celda del filtro prensa de alta presión, alta temperatura para conocer la pérdida de agua bajo tales condiciones.

Se separó una pequeña parte de la suspensión agitada para medir densidad con la balanza de lodos; contenido de agua, de sólidos y de aceite usando la retorta de destilación.

La alcalinidad del lodo y del filtrado se obtuvo titulando pequeñas muestras con una solución H_2SO_4 N/50.

5.1. LODO BENTONITICO SODICO.¹³

Se prepararon nueve suspensiones de bentonita agregando

20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 gramos de bentonita sódica, con 10% de humedad, a un litro de agua destilada.

Con el fin de observar principalmente el efecto de la concentración de bentonita sobre algunas de las propiedades del lodo, se llevaron a cabo las determinaciones respectivas siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

5.1.1. PREPARACION.- Se pesan en la balanza analítica los gramos de bentonita. Se agrega la bentonita lentamente al agua destilada, mientras se está agitando en el mezclador.

Una vez terminada la adición, se continúa agitando durante 20 minutos. Se transfiere la suspensión al frasco y se deja en reposo 16 horas como mínimo y 24 como máximo.

De la suspensión coloidal se toman 500 ml. Se agitan durante 5 minutos empleando el mismo mezclador y se determinan las principales características físicas y químicas del lodo.

5.1.2. RESULTADOS.- Para todas las suspensiones de bentonita se obtuvo un pH promedio de 9.25; en tanto que, el pH del filtrado se mantuvo aproximadamente en 9.00.

Como era de esperarse, las propiedades reológicas aumentan rápidamente (Fig. 5.1.) con la concentración de bentonita expresada en g/ltr. En cambio, tanto el filtrado A.P.I. como el A.P.A.T. disminuyen de manera considerable demostrando la avidez de las partículas de arcilla por el agua (Fig.

5.1.) con la concentración de bentonita expresada en g/ltr. - En cambio, tanto el filtrado A.P.I. como el A.P.A.T. disminuyen de manera considerable demostrando la avidez de las partículas de arcilla por el agua (Fig. 5.2.). El espesor del enjarre, obtenido en el filtro prensa de baja presión, disminuyó desde 3.6 mm hasta 1.0 mm.

5.2. LODO CALCICO¹⁵

Para formar el lodo cálcico se agregó al lodo natural, cantidades variables de tanino (quebracho), hidróxido de sodio y cemento en las siguientes concentraciones:

<u>MATERIALES</u>	<u>CASO 1</u>	<u>CASO 2</u>	<u>CASO 3</u>
Tanino	4 g/ltr.	variable	4 g/ltr.
Hidróxido de Sodio	pH variable	3 g/ltr.	3 g/ltr.
Cemento Ca (OH) ₂	7 g/ltr.	7 g/ltr.	variable

5.2.1. PREPARACION.- En cada uno de los casos se miden los mililitros de agua destilada y se vacían al vaso metálico. Se coloca el vaso en el agitador manteniéndose la agitación durante la adición de la arcilla (100 g/ltr, con 7% de humedad) y de los materiales en el orden y cantidades ya especificados.

Se agita el lodo 15 minutos después de la adición de cada uno de los productos. Se transfiere la suspensión al frasco de vidrio, cerrándolo herméticamente y dejándolo en reposo durante 17 horas \pm 1 hora, a temperatura ambiente.

Se pasa la suspensión al vaso metálico y se agita durante 10 minutos, antes de realizar las determinaciones de las principales características físicas y químicas del lodo.

5.2.2. RESULTADOS.- Variando el pH desde 11.3 hasta 13.8 en el CASO 1, se observa que inicialmente (Figs. 5.3 y 5.4) hay una fuerte disminución de las viscosidades y del punto cedente, debido principalmente a la acción defloculante del tanino auxiliado por el NaOH. Después de un pH = 12.5 se incrementan las propiedades, pues las altas concentraciones de sodio reemplazan al calcio en las arcillas originando la dispersión de las partículas. En este Caso el pH se controló con la sosa que varió desde 0 hasta 12.00 g/ltr.

La disminución de las propiedades reológicas en el CASO 2 (Figs. 5.5 y 5.6) muestra claramente la defloculación del lodo a medida que se incrementa la concentración de quebracho manteniéndose el pH entre 12.3 y 12.5.

Se puede notar en la Tabla 5.1, que los aumentos del tanino producen una disminución en la alcalinidad de la suspensión y del filtrado, en tanto que, aumentan con la adición de sosa caústica en el CASO 1.

Para el CASO 3, los cationes divalentes de Ca^{++} provenientes del cemento, llevan a la disminución del número de partículas, lo cual detiene el aumento del punto cedente y de las viscosidades (Fig. 5.7). Se presenta por otro lado, un pequeño aumento en el filtrado y en la gelatinosidad inicial; aumento

que es más notorio en la curva de gelatinosidad a 10 minutos. En el presente CASO 3, el pH del lodo se mantiene en 12.40 y el del filtrado en 12.00. El volumen del ácido sulfúrico gastado en la titulación del lodo y del filtrado se incrementa - tal como se observa en la Tabla 5.1.

A ninguna de las suspensiones se le agregó barita, por lo que la densidad fue baja: 1.09 - 1.10.

De todas las muestras trabajadas en la retorta, se obtuvieron los siguientes valores promedios:

Porcentaje de Sólidos	= 7%
Porcentaje de Aceite	= 0%
Porcentaje de Agua	= 93%

5.3. LODO BASE YESO¹⁵

En la conformación del lodo a base de yeso se emplearon - diversas cantidades de sulfato de calcio hidratado ($H_2SO_4 \cdot 2H_2O$) de cromolignosulfonato (CLS) como defloculante, de carboxi metil celulosa de sodio (CMC) como reductor del filtrado y de sosa que proporciona el necesario carácter básico a la suspensión para que actúen a satisfacción los reductores de viscosidad.

El lodo base constituyó una suspensión de 100 g/ltr. de una arcilla común con 7% de humedad.

<u>MATERIALES</u>	<u>CASO 1</u>	<u>CASO 2</u>	<u>CASO 3</u>
CLS	11 g/ltr.	11 g/ltr.	Variable
Hidróxido de sodio	pH=9.5-10.5	pH=9.5-10.5	pH=9.5-10.5
Yeso (Sulfato de calcio)	14 g/ltr.	Variable	14 g/ltr.
CMC	Variable	4 g/ltr.	4 g/ltr.

5.3.1. PREPARACION.- Para cada CASO se miden en una probeta los centímetros cúbicos de agua destilada y se vacían al vaso metálico. Se adapta el vaso en el agitador manteniendo la agitación cuando se agrega la arcilla y los materiales en el orden establecido.

Después de la adición de cada uno de los productos se agita el lodo por 15 minutos. Se pasa la suspensión al frasco de vidrio, cerrándolo herméticamente y dejándolo en reposo durante 17 horas \pm 1 hora, a temperatura ambiente.

Se transfiere el lodo de yeso al vaso metálico para agitarlo en el mezclador durante 10 minutos antes de realizar las determinaciones de las principales características físicas y químicas del lodo.

5.3.2. RESULTADOS.- Con una solución de sosa al 50% se controló el pH entre 9.5 y 10.5, nivel determinado en otras experiencias como el adecuado para que los lignosulfonatos actúen satisfactoriamente en la suspensión.

En el CASO 1, el efecto que causan las adiciones de carbo

xi metil celulosa sobre el lodo se nota, como era de esperarse, por la disminución del filtrado en la Fig. 5.10. Las viscosidades, el punto de cedencia y las gelatinosidades aumentan (Fig. 5.9) por el empleo de una CMC sódica de alta viscosidad, la cual enmascara la acción defloculante del cromoliginosulfonato que se mantiene invariable en 11 g/ltr.

Aumentando solo la concentración de yeso (CASO 2) se inhibe la dispersión de las partículas, inhibición que se refleja en la mayor cantidad de agua libre que produce la disminución de las propiedades reológicas en las Figs. 5.11 y 5.12.

En el mismo CASO 2 la adición de 4 g/ltr. de CMC controla una pérdida posiblemente fuerte del filtrado A.P.I. que traería como consecuencia la formación de una gruesa costra de lodo. Con alta presión y alta temperatura, la pérdida de agua es más notable (Fig. 5.12).

Aún en el CASO 3 (Fig. 5.13) no se define bien la acción defloculante del CLS por la alta viscosidad del compuesto de celulosa (CMC). A pesar de eso, el aumento en la concentración de lignito lo presenta también como un reductor del filtrado, principalmente a alta temperatura (figura 5.14).

La estabilidad de la gelatinosidad en valores relativamente bajos (Fig. 5.14) demuestra que las cargas eléctricas

de los bordes en las partículas de arcilla se están neutralizando por la absorción del lignosulfonato.

Finalmente, la Tabla 5.2 permite conocer el comportamiento del lodo base yeso, en cuanto al espesor del enjarre, al pH y a la alcalinidad. Esto es un complemento al conocimiento de la evolución de las propiedades establecidas en los gráficos adjuntos.

Cabe anotar también que los lodos base yeso preparados se desarrollaron con una densidad de 1.06 g/cc y un porcentaje de sólidos igual al 6%.

5.4. LODO SALADO

Para preparar el lodo salado se utilizó, como fase continua, al agua destilada saturada con 315000 ppm de cloruro de sodio. Los otros componentes fueron empleados en el orden y cantidad descritas a continuación:

<u>MATERIALES</u>	<u>CASO 1</u>	<u>CASO 2</u>	<u>CASO 3</u>
Atapulguita	Variable	60 g/ltr.	60 g/ltr.
Cloruro de Sodio	315 g/ltr.	315 g/ltr.	315 g/ltr.
Hidróxido de Sodio	15 g/ltr.	1.5 g/ltr.	1.5 g/ltr.
Almidón	-	Variable	-
CMC	2 g/ltr.	-	Variable

5.4.1. PREPARACION.- Se mide el volumen necesario de agua destilada y se transfieren al vaso metálico. Agitando en el mezclador se le agregan los gramos de atapulguita (arcilla). Inmediatamente, sin suspender la agitación, se añaden los gramos de cloruro de sodio químicamente puro y se continúa por 20 minutos más la agitación.

Manteniendo la agitación se agregan, por cada litro de agua empleado en la preparación del lodo, 5 ml de solución de hidróxido de sodio al 30%. Se añaden también los gramos de almidón o de carboxi metil celulosa agitando 15 minutos después de la adición de cada uno de los productos.

Se transfiere la suspensión al frasco de vidrio y se cierra herméticamente. Se deja en reposo a temperatura ambiente por 17 horas ± 1 hora.

Se transfiere la suspensión al vaso metálico y se agita durante 10 minutos. Inmediatamente se efectúan las determinaciones de las principales características físicas y químicas, del lodo.

5.4.2. RESULTADOS.- Cuando solo se incrementa la concentración de atapulguita (humedad = 7.1%) como en el CASO 1, se nota un comportamiento similar a cuando se adicionaba la arcilla bentonita al agua dulce (bidestilada).

En el agua saturada con 315 000 ppm de cloruro de sodio

La bentonita está lejos de proporcionar la reología y la tixotropía que se obtiene en agua dulce. En cambio las partículas de atapulguita, debido a su estructura cristalina tipo aguja, tienen disponible una gran área superficial para la absorción de agua pudiendo dispersarse en aguas salinas (Figs. 5.15 y 5.16).

Para este CASO una importante pérdida de agua tiene a disminuir por la presencia de los 2 g/ltr. de CMC ayudado por la sosa que proporciona al lodo un pH de 11.5 (Fig. 5.16).

En los otros dos CASOS la acción del almidón y de la carboxi metil celulosa se deja sentir en la reducción del filtrado habiendo también reducción en las propiedades reológicas. - Ver desde la Fig. 5.17 hasta la 5.20.

En el CASO 2 agregando almidón al lodo salino, la pérdida de agua disminuyó desde 124.9 cc hasta 84.8 cc mientras que en el CASO 3 adicionando CMC el filtrado bajó hasta 49.7 cc. Paralelamente, los primeros enjarres alcanzaron espesores mayores de un centímetro evidenciando la fuerte filtración.

Por último, para los tres CASOS se obtuvieron también los siguientes valores:

Densidad	= 1.15 - 1.20
pH Lodo	= 11.3
pH Filtrado	= 11.3

5.5. LODO BASE AGUA EMULSIONADO

Añadiendo aceite diesel en cantidades variables, se emulsionaron lodos cálcicos, rojos y sistemas cromoligno-cromolignosulfonatos preparados en las siguientes concentraciones:

LODO CALCICO EMULSIONADO

Arcilla	100 g/ltr.
Tanino	6 g/ltr.
Hidróxido de sodio	3 g/ltr. (10 ml de solución al 30%)
Cemento (Ca OH)	8 g/ltr.
Barita	670 g/ltr.
Diesel	0% - 20% en volumen

LODO ROJO EMULSIONADO

Arcilla	100 g/ltr.
Tanino	5 g/ltr.
Hidróxido de Sodio	3 g/ltr. (10 ml de solución al 30%)
Barita	670 g/ltr.
Diesel	0% - 20% en volumen

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

	<u>CASO 1</u>	<u>CASO 2</u>	<u>CASO 3</u>
Arcilla	100 g/ltr.	100 g/ltr.	100 g/ltr.
Cromolignosulfonato	21 g/ltr.	18 g/ltr.	15 g/ltr.
Cromolignito	10.5 g/ltr.	9 g/ltr.	7.5 g/ltr.
Barita	670 g/ltr.	670 g/ltr.	670 g/ltr.
Diesel	0% - 20% en volumen		

5.5.1 PREPARACION.- Para todos y cada uno de los lodos descritos se toma primeramente el volumen necesario de agua destilada y se vierte al vaso metálico.

Se coloca el vaso en el agitador manteniéndose la agitación durante la adición de los materiales (con excepción del aceite) en el orden y cantidades ya especificadas. Después de cada adición se mantiene la agitación por unos 15 minutos más.

Se pasa la suspensión al frasco de vidrio y se cierra herméticamente para dejarla en reposo a temperatura ambiente por 17 horas \pm 1 hora.

Se transfiere el lodo al vaso metálico y se agita durante 10 minutos, al cabo de los cuales se añade lentamente el aceite manteniendo siempre la agitación. A las muestras que no se les añade diesel, se les determina sus propiedades inmediatamente después de los 10 minutos de agitación.

Antes de realizar las pruebas de las principales características físicas y químicas correspondientes, se agita el lodo ya emulsionado por unos 15 minutos más.

5.5.2. RESULTADOS.- Desde la figura 5.21 hasta la 5.29 se grafican los valores obtenidos en las diferentes determinaciones realizadas para cada uno de los lodos emulsionados. Al observarlas en conjunto se puede deducir que la adición -

de diesel proporciona un pequeño aumento en la viscosidad debido a que el área interfacial entre los micro glóbulos de aceite y la fase acuosa es muy grande. Los glóbulos de aceite, rodeados de finas partículas de arcilla, actúan como sólidos para producir el aumento en la viscosidad.

Así mismo, el aumento en el porcentaje de diesel ocasiona una reducción en el filtrado tanto a baja como alta presión puesto que los glóbulos de la emulsión van a taponar los capilares de la costra.

En todos los casos el filtrado no mostró indicios de filtración de aceite.

En las figuras mencionadas anteriormente, durante las primeras adiciones de diesel, aumentaron las fuerzas necesarias para romper el gel pero luego, comenzaron a disminuir cuando el volumen de aceite era del 10 al 15%.

Un efecto consecuente de la agregación de aceite, es la reducción en el peso de los lodos tal como se observa en la Tabla 5.4. En la misma tabla aparecen los valores del enjarre y del potencial de hidrógeno.

Como ejemplo de la rutina seguida en el control de este tipo de lodos emulsionados, se establece la Tabla 5.3 que muestra las variaciones en el contenido de aceite obtenido en la retorta de destilación.

5.6. LODO DE EMULSION INVERSA

Dentro de los diversos sistemas de emulsiones inversas que existen, se escogió el sistema Drilex de la Dril de México S.A.²⁵

Los materiales empleados fueron:

	RELACION 60/40	INCREMENTO DE RELACION 60/40 a 70/30	80/20
Diesel Residuo	462 ml	333 ml	441 ml
Drilex (asfalto oxidado)	27 ml	10.9 ml	35 ml
Drilox (álcali)	30 g	12.3 g	30 g
Agua al 5% de sal	327 ml	-	120 ml
Barita	791.2 g	323.6 g	1737.2 g
	CANTIDAD 1000 ml	1000 ml	1000 ml
	DENSIDAD 1.5	1.50	2.20

5.6.1. PREPARACION.- Se coloca la cantidad determinada de Diesel en un frasco de vidrio de boca ancha para preparar la emulsión de relación 80/20 ó 60/40.

Agitando vigorosamente en el dispersor se agrega el drilex necesario y la mitad del agua salada preparada con 5 ó 10 minutos de agitación después de cada adición.

Lentamente se agrega el drilox manteniendo la agitación por 5 ó 10 minutos más.

Se añade el resto de la sal y se agita el lodo por 30 minutos.

Se ajusta la densidad con la cantidad de barita especificada.

Con la emulsión 60/40 se prepara la 70/30 adicionando con agitación los materiales especificados para el incremento.

Todas las suspensiones una vez preparadas se agitan por 2 horas en el dispersor entre 80 y 90 rpm.

Se calienta rolando a 60°C durante 18 horas.

Se enfría y se agita en el dispersor por 5 minutos antes de realizar las determinaciones reológicas y de filtrado.

5.6.2. RESULTADOS.- En la Tabla 5.5. se observa que la viscosidad de las emulsiones inversas antes y después de las 18 horas de rolar, tiende a ser alta mientras que los valores de la gelatinosidad son relativamente pequeños.

Con el filtro prensa A.P.I. no hubo filtrado en tanto que con la prueba de alta presión (500 lb/plg^2) y alta temperatura (300°F) el volumen filtrado fue escaso.

CAPITULO 6

ADICION DE CONTAMINANTES AL LODO BENTONITICO SODICO. COMPORTAMIENTO.^{4, 6, 17, 27.}

Es necesario comprender los problemas que originan las sustancias que afectan a los fluidos de perforación para que puedan evitarse y combatirse con la mayor eficiencia. Pero hay que anotar que cuando se incorpora un electrolito a una suspensión de arcilla la distribución de fuerzas eléctricas, influyentes en las propiedades reológicas, es tan compleja - que puede dificultar la identificación del fenómeno.

En este capítulo se muestra el efecto de los contaminantes sobre sistemas sencillos de arcilla-agua preparando lodos bentoníticos al 5% en peso, a los cuales después de agitarlos en el mezclador por 5 minutos al final del tiempo de reposo (\pm 24 horas), se les adicionaron cantidades variables de sales de sodio y de calcio hasta 30 g/ltr manteniendo la agitación por 20 minutos más.

Una vez contaminados los lodos, se pasó a determinar sus propiedades utilizando el equipo especificado en el capítulo 5.

6.1. ADICION DE CLORURO DE SODIO (NaCl)

En la perforación de pozos petrolíferos la contaminación de sal (NaCl) se origina por la presencia de domos y estratos salinos, por flujos de agua salada y algunas veces en la salmuera con que se prepara al lodo.

A bajas concentraciones de cloruro de sodio se produce una floculación de las partículas de bentonita lo cual origina un aumento de la viscosidad aparente, del punto cedente y de las gelatinosidades (Figs. 6.1 y 6.2). Esto se debe a que al aumentar la concentración de sal, los iones so dio neutralizan las cargas de repulsión en las placas de bentonita mientras que los iones cloro incrementan las cargas negativas del medio acuoso que rodea a la partícula arcillosa. Esos dos efectos producen movimientos más desordenados que favorecen las uniones borde-borde y cara-borde, (efecto de floculación) así como también los choques entre ellas que rompen las placas, dejando al descubierto cargas positivas y negativas por los bordes fomentando aún más la floculación.

Agregando más y más sal al lodo (desde 15000 ppm aproximadamente) se inhibe poco a poco la hidratación de las ar cillas provocando seguidamente la caída de la viscosidad a valores muy bajos.

La floculación de las partículas disminuye el área dis ponible para la aborción del agua lo cual da como resultado un aumento en las pérdidas de agua y en el espesor del enjarre obtenido en las pruebas de filtración A.P.I. (Fig. 6.2).

Por otro lado y principalmente para conocer como se pue de detectar la presencia de cloruro de sodio en un lodo, se

determinó la existencia de cloruros por titulación del filtrado. El incremento del ión Cloro se puede observar en la Tabla 6.1, y también una pequeña reducción en el potencial de hidrógeno a medida que aumentan los gramos de NaCl agregados a la suspensión.

6.2. ADICION DE HIDROXIDO DE SODIO (NaOH)

Desde 0 hasta 30 g/ltr. de sosa cáustica (NaOH) se agregaron en constante agitación a las muestras debidamente preparadas de lodo bentonítico al 5%.

El comportamiento obtenido con esta contaminación (Figs. 6.3 y 6.4) es muy similar al que se tuvo cuando se agregó cloruro de sodio. Pero se puede notar en este caso que la floculación produce valores más altos de viscosidad, gelatinosidad y punto cedente.

La característica alcalina del lodo contaminado con NaOH se nota en la Tabla 6.2 por el incremento en los centímetros cúbicos de H_2SO_4 N/50 consumidos al titular una pequeña muestra del filtrado A.P.I. de cada lodo. En cambio, el pH se mantiene más o menos en un valor de 12.3, después de un incremento inicial desde 9.25.

6.3. ADICION DE SULFATO DE SODIO (Na_2SO_4)

Las cantidades de sulfato de sodio añadidas al lodo ben

tonítico producen el comportamiento que aparecen en las Figuras 6.5 y 6.6.

Las propiedades reológicas tienden a decrecer durante las adiciones de cantidades menores a 30 g/ltr. (30000 ppm) del sulfato. En cambio, la pérdida de agua aumenta desde 15 cc hasta 20 cc.

En general se puede decir que esos fenómenos se llevan a cabo debido a que cuando hay considerables adiciones de Na_2SO_4 las placas de arcilla pierden sus moléculas de agua las cuales son atraídas fuertemente por los electrolitos de la suspensión.

El incremento en los valores obtenidos en las pruebas de pH y en la titulación del filtrado A.P.I. con una solución de H_2SO_4 N/50, aparecen en la Tabla 6.3 demostrando el carácter básico de la suspensión contaminada.

6.4. ADICIÓN DE CARBONATO DE SODIO (Na_2CO_3)

Igual que con las sales sódicas anteriores, la adición de carbonato de sodio presenta una disminución en las viscosidades y en las fuerzas de gel del lodo, mientras la pérdida de agua aumenta hasta unos 30 cc (Figs. 6.7 y 6.8).

A bajas concentraciones de Na_2CO_3 las curvas indican una floculación de las arcillas.

En cuanto a la alcalinidad del filtrado y al pH del lodo se obtiene un cierto incremento (Tabla 6.4).

6.5. ADICION DEL CLORURO DE CALCIO (CaCl_2)

En la contaminación con cloruro de calcio hasta los 30 g/ltr. el ión calcio que desplaza al ión sodio de la suspensión, neutraliza las cargas eléctricas de la superficie arcillosa produciendo una floculación que se nota al comienzo de las curvas de las Figs. 6.9 y 6.10.

Aproximadamente a partir de las 5000 ppm las curvas indican la deshidratación de las partículas coloidales que da como resultado la disminución de las viscosidades, el punto cedente y las gelatinosidades a un valor más bajo que el original. Mientras tanto, la pérdida de agua y el enjarre aumentan considerablemente por la reducción de la capa de agua ubicada entre las partículas.

La presencia del ión cloro en la fase acuosa se revela en el análisis de cloruros practicado en el filtrado (Tabla 6.5).

También disminuyen los valores del pH a medida que se incrementa la adición del cloruro de calcio, tal como ocurre con la contaminación del NaCl.

6.6. ADICION DE HIDROXIDO DE CALCIO $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Es muy frecuente la contaminación del lodo con hidróxido de calcio presente en las mezclas de cemento de donde se produce principalmente como resultado de la hidrólisis de varios silicatos y aluminatos de calcio alcalinos.

Con las primeras concentraciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ la contaminación conduce a que el ión calcio reemplace al sodio en las partículas permitiendo que se agrupen formando flóculos y también porque los iones hidroxilos del cemento producen un incremento en el pH y en la alcalinidad (Tabla 6.6) favoreciendo la dispersión de las partículas.

El resultado es que se aumenta levemente la viscosidad aparente, el punto cedente, las gelatinosidades, el filtrado y el enjarre (Figs. 6.11 y 6.12).

Posteriores adiciones de hidróxido de calcio producen una reducción de las propiedades reológicas con respecto al salto inicial de la curva.

6.7. ADICION DE SULFATO DE CALCIO ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

En presencia de flujos de agua yesosa o al perforar capas de yeso ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se produce la contaminación del lodo bentonítico originada por los iones Ca^{+2} y SO_4^{-2} del

compuesto.

La agregación de las partículas de arcilla se observa en las pruebas de laboratorio, adicionando yeso a una suspensión de bentonita que da como resultado una disminución en los valores de las propiedades reológicas después de que se incrementan por floculación a bajas contaminaciones. (Figs. 6.13 y 6.14).

La conversión de bentonita sódica a cálcica proporciona un incremento del filtrado A.P.I. hasta 30 cc aproximadamente debido a que la cálcica está menos hidratada lo que origina una mayor cantidad de agua libre (Fig. 6.14).

Tal pérdida de agua se mantiene en 30 cc por la mejor disposición de las plaquetas de arcilla en el enjarre.

En vista de que los iones sulfato no tienen efecto sobre el pH del fluido, éste disminuye (Tabla 6.7) por la acción de los iones Ca^{+2} a diferencia de la contaminación con cemento - que produce un aumento en el pH del sistema.

CONCLUSIONES

1. El presente estudio trata del comportamiento de un número de lodos de perforación de acuerdo a su composición, características y mantenimiento. Además se incluyen al principio generalidades sobre la historia para entrar a tratar sobre las propiedades y funciones de los lodos que son capítulos que nos preparan para comprender los trabajos y ensayos llevados en esta tesis que trata de muchos problemas que pueden surgir en la perforación de pozos petrolíferos.
2. Un fluido de perforación capacitado para desempeñar las funciones descritas en el capítulo 2, obviamente tiende a ser un sistema complejo donde parte de esa complejidad proviene de los aditivos empleados y de los diferentes ambientes encontrados en varias situaciones geológicas. Entre estos ambientes se incluyen: la naturaleza física y química del estrato a penetrarse, la composición del agua de formación y la disponibilidad de arcillas.
3. La breve exposición sobre los tipos de fluidos de perforación demuestra el amplio rango de composiciones de uso corriente hoy en día. De entre ellos se destacan los lodos base agua y base aceite como los mas utilizados por su disponibilidad en el campo.
4. Las operaciones realizadas en los lodos se llevaron a cabo con los instrumentos y los procedimientos de medición espe

cificados en el capítulo 4 siguiendo las indicaciones correspondientes al cuidado y mantenimiento emitidas por los fabricantes. Consecuentemente, son accesibles las relaciones que se pueden realizar entre los comportamientos de diversos tipos de suspensiones pues todas estuvieron sujetas a los mismos métodos de prueba.

Es de anotar, que la mayoría de estos aparatos sirven de manera positiva para controlar el comportamiento de los fluídos en el campo.

5. Los lodos se prepararon variando las concentraciones de los materiales componentes tomando como referencia aquellos lodos tipos que cumplen principalmente los requerimientos reológicos y de filtración necesarios en el pozo.

Tales lodos son:

LODO BENTONITICO SODICO

Agua	1000 cc
Bentonita	50 - 80 gramos
Densidad	1.03 - 1.10

LODO CALCICO

Agua	1000 cc
Bentonita	50 - 80 gramos
Tanino	3 - 6 gramos
Hidróxido de sodio	3 - 6 gramos

Cemento	5 - 15 gramos
---------	---------------

LODO BASE YESO

Agua	1000 cc.
Bentonita	50 - 70 gramos
CLS	10 - 15 gramos
Hidróxido de sodio	3 - 4 gramos
Yeso	10 - 20 gramos
CMC	3 - 6 gramos

LODO SALADO

Agua	1000 cc
Atapulguita	50 - 80 gramos
Cloruro de sodio	315 gramos
Hidróxido de sodio	2 gramos
Almidón	10 gramos
CMC	3 - 6 gramos (en caso de no emplear almidón).

LODO ROJO

Agua	1000 cc
Bentonita	50 - 70 gramos
Tanino	2 - 8 gramos
Hidróxido de sodio	1 - 4 gramos

SISTEMA CL-CLS

Agua	1000 cc
Bentonita	50 - 100 gramos

CLS 20 - 30 gramos

CL 10 - 20 gramos

6. La dispersión de la bentonita en agua dulce destilada y la de atapulguita en agua saturada con 315 g/ltr. de cloruro de sodio, producen comportamientos similares a medida que aumenta sus concentraciones: las propiedades reológicas crecen, mientras las pérdidas de agua disminuyen.
7. Las pruebas de laboratorio indican que las características de filtración de lodos salinos pueden mejorarse marcadamente por la adición de almidón o carboxi metil celulosa de sodio.
8. Pequeñas cantidades de taninos y lignosulfonatos se emplearon en lodos de calcio, rojos y base yeso los cuales con la sosa aseguran su alcalinidad para que esos aditivos defloculantes trabajen efectivamente. Sin embargo, los taninos son precipitados por cationes polivalentes - perdiendo su efectividad en presencia de ellos.
9. Se puede decir en general que los reactivos agregados van a modificar químicamente el medio líquido en que se mueven las arcillas actuando por intermedio de cargas eléctricas, modificando las fuerzas entre partículas y ocasionando consecuentes alteraciones en las propiedades de los lodos.

10. Para los lodos de emulsión inversa con densidad de 2.20 frecuentemente se determinan, con fines de control, las características de la suspensión y la estabilidad térmica junto con las pruebas reológicas y de filtración que son comunes para todas las relaciones aceite - agua.

Los datos obtenidos en esta tesis son suficientes para - mostrar que la viscosidad de estos lodos tiende a ser elevada en tanto que las gelatinosidades y el filtrado son generalmente bajos.

11. Se proporcionan muchos resultados que permiten la predicción del comportamiento de los materiales sometidos a las condiciones de uso normal en la perforación de pozos petroleros. Sin embargo, no se describen procedimientos específicos que den valores absolutos en el funcionamiento de esos materiales sometidos a todas las condiciones debido a las múltiples variables que afectan el desenvolvimiento de algunos aditivos en el fluido de perforación.

12. Generalmente, en las adiciones de sales de calcio (sulfato, hidróxido) o de sodio (cloruro, hidróxido, carbonato, sulfato) a un sistema agua-arcilla, se produce primero un incremento en la gelatinización, viscosidad y punto cedente. Al continuar incrementando la concentración del cation, la floculación que tiende a la agregación y la deshidratación de las partículas arcillosas, ocasiona una -

disminución de las propiedades reológicas muchas veces por debajo de lo normal mientras la pérdida de agua aumenta debido a la mayor cantidad de agua libre.

13. Los efectos de floculación y de agregación de las partículas gobiernan el ordenamiento de las mismas en el enjarre produciendo una mayor o menor filtración respectivamente.
14. Los valores del pH obtenidos tanto en las pruebas realizadas sobre los lodos como durante las contaminaciones, muestran de manera general, que la medida efectuada en el lodo es un poco mayor que la del filtrado. Esto lleva a pensar que hay una cantidad de iones alcalinos en el filtrado que no pasa a través del filtro prensa A.P.I.

Algunas ocasiones el pH del filtrado supera en pocas centésimas al pH del lodo lo cual es explicable si se considera que la determinación en los lodos se realizó a unos 20°C del laboratorio, momentos antes de comenzar con las pruebas reológicas mientras que la del filtrado, se efectuó cuando ya se habían trabajado de 10 a 20 muestras de lodo y las condiciones de temperatura eran realmente diferentes con dos o tres grados centígrados. Además, el mismo hecho de laborar en un laboratorio de fluidos que permanecía en constante actividad, impedía aislar completamente las suspensiones y los filtrados para evitar la inclusión de sustancias extrañas provenientes de trabajos simultáneos y próximos.

Otro aspecto de considerar es que el potenciómetro empleado estuvo sujeto a recalentamiento producido por la corriente eléctrica aplicada y también los electrodos fueron constantemente introducidos en diversos líquidos. Todo lo cual puede hacer variar algunas mediciones.

Con esto se quiere expresar que a pesar del extremado cuidado observado en el manejo de este y otros aparatos, siempre se presentan factores difíciles de controlar o evitar.

15. La considerable cantidad de muestras y las limitaciones normales de un laboratorio no permite efectuar las determinaciones a tiempos exactamente iguales.

Esos factores afectan las propiedades de los lodos produciéndose cambios más o menos fuertes que al graficarlos dificultan el trazado de curvas continuas. De ahí que se ha preferido resaltar las respuestas de las mediciones uniendo con rectas los puntos obtenidos manteniendo el criterio de que las tendencias de las curvas son más importantes que los valores puntuales en el presente trabajo.

16. Las titulaciones con soluciones valoradas definidas, ayudan a describir el carácter ácido o alcalino de los filtrados, cuando el pH no sufre variaciones apreciables.

RECOMENDACIONES

No está por demás recordar que, en un afán de mejorar el nivel de preparación, la Escuela Superior Politécnica del Litoral por intermedio del Departamento de Ingeniería de Geología, Minas y Petróleos, dispuso la instalación de algunos laboratorios entre los cuales se cuenta el de fluidos de perforación, tratando así de ponerse a la par con las exigencias actuales.

Con ese fin se realizará el montaje del laboratorio de fluidos con proyecciones académico-docentes que permitan cumplir una serie de prácticas planificadas para nuestro medio ambiente, proporcionando básicamente, un complemento de la materia Perforación como mejor medio para su aprendizaje. Desde este punto de vista, el presente trabajo de tesis forma parte de esos objetivos, pues su conocimiento y aplicación va dirigido a:

1. Fundamentar la teoría del programa de fluidos de perforación dictado en el Departamento.
2. Establecer el orden de las prácticas de laboratorio.
3. Buscar los lugares de aprovisionamiento de materiales y reactivos empleados en las prácticas.
4. Adquirir los instrumentos mas comunes en un diseño sencillo y suficientemente exacto para el trabajo de los estudiantes.

debido al elevado costo de mantenimiento de los mismos.

5. Comparar con otros métodos de prueba y de preparación.
6. Entrar al conocimiento de los productos que disminuyan o eliminen los efectos de contaminación.

Por otro lado, dentro de un organismo de investigaciones a nivel nacional, en un laboratorio de fluidos de perforación se puede llevar a cabo la formación de investigadores, la investigación científica básica y aplicada, la difusión de los desarrollos científicos y su aplicación a la técnica petrolera, el desarrollo de nuevas tecnologías y procesos para la elaboración de productos que sustituyan a los de importación, la preparación de personal técnico, obrero y administrativo, etc. etc.

Dentro de ese aspecto, el trabajo desarrollado en esta tesis establece un procedimiento que sirve como base en la investigación de las innovaciones en los fluidos de perforación, así como en la aplicación de normas de calidad de las materias primas que entran en su composición. Ello trae consigo:

1. El estudio de los materiales empleados en la manufactura de los fluidos de perforación de pozos petrolíferos.
2. La normalización de la calidad de estos productos.
3. El desarrollo de nuevos productos o sistemas de lodos.

4. La solución a problemas concretos en que interyengan los fluídos de perforación.
5. La elaboración de manuales de técnicas de laboratorio.
6. El establecimiento de medidas de seguridad para el manejo y mantenimiento de equipos y materiales.
7. El análisis de las muestras de los productos aplicando las normas de calidad.

Sea cual fuere la finalidad de instalar los laboratorios de petróleo en general, se procurará la participación de los sectores explotados o fundamentales, en su camino hacia la toma del poder del Estado como medio para lograr que los ingresos provenientes de la riqueza hidrocarburífera beneficien al pueblo ecuatoriano.

NOMENCLATURA

A.P.I.	= American Petroleum Institute
A.P.A.T.	= Alta Presión y Alta Temperatura
°C	= Grados Centígrados
cc	= Centímetros cúbicos
CL-CLS	= Cromoligno-Cromolignosulfonato
CMC	= Carboxi Metil Celulosa de Sodio
cPo	= Centipoises
F	= Grados Farenheit
Gi	= Gelatinosidad inicial o a los 10 <u>se</u> gundos.
G ₁₀	= Gelatinosidad a los 10 minutos
g/cc	= Gramos por Centímetro Cúbico
g/ltr.	= Gramos por Litro
k/cm ²	= Kilogramos por Centímetro Cuadrado
k-cm	= Kilogramos - Centímetro
lb/gal	= Libras por Galón
lb/100 pie ²	= Libras por 100 Pies Cuadrados
lb/pie ³	= Libras por Pié Cúbico
lb/plg ²	= Libras por Pulgada Cuadrada
ml	= Mililitros
mm	= Milímetros
N	= Normal
Pc	= Punto cedente o de Cendencia
pH	= Potencial de Hidrógeno
ppp	= Partes por Millón
rpm	= Revoluciones por Minuto
Va	= Viscosidad Aparente
Vp	= Viscosidad Plástica

SECCION CUADROS

CUADRO 2.1 Relación de las Funciones que Deben Cumplir los Fluidos de Perforación con Respecto a sus Propiedades.

FUNCIONES DE LOS FLUIDOS		PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS							
		DENSIDAD	VISCOSIDAD	GELATINOSIDAD	ENJARRAMIENTO	POTENCIAL HIDROGENO	PODER DE LUBRIFICACION	RESISTIVIDAD	TENSION SUPERFICIAL
LIMPIA EL AGUJERO	Limpia el Fondo	x	x		x				
	Suspende y Saca los Cortes	x	x	x					
	Elimina los Cortes	x	x	x					
Enfria y Lubrica la Sarta de Perforación y la Barrena		x					x		
Enjarra las Paredes del Agujero		x			x				
Evita Reventones		x	x	x					
Evita Pérdidas de Circulación		x	x	x	x				
Evita Derrumbes		x	x		x				
Evita Pegadas de Tubería		x			x				
OTRAS	Protege las Zonas Productoras	x			x	x			x
	Protege las Muestras y Núcleos	x			x	x			x
	Ayuda a la Toma de Registros Eléctricos	x	x	x		x		x	

CUADRO 3.1

FLUIDOS DE PERFORACION

1. AGUA

2. ACEITE

3. GASES

Aire

Gas Natural

Anhidrido Carbónico

Nitrógeno

4. ESPUMAS

5. LODOS

Fase Continua Agua

Lodo Natural

Lodo Bentonítico Sódico Tratado con Fosfatos

Lodo Bentonítico Sódico Tratado con Tanino y Sosa

Lodo Bentonítico Sódico Tratado con CL-CLS

Lodo Rojo

Lodo Cálcico

Lodo Base Yeso

Lodo Salado

Lodo de Bajo Contenido de Sólidos Dispersos

Lodo de Bajo Contenido de Sólidos no Dispersos

Fase Continua Aceite

Lodo de Emulsión Inversa

Lodo Base Aceite

6. LODOS AEREADOS

CUADRO 3.2 SATISFACCION DE LAS FUNCIONES POR LOS DIFERENTES FLUIDOS DE PERFORACION.

<u>FUNCIONES</u>		Agua	Aceite	Gases	Lodos	Lodos Aereados	Espumas
Limpia el Agujero	Limpia el Fondo	si	si	si	si	si	si
	Suspende los Cortes	no	no	no	si	si	si
	Saca los Cortes	*	*	*	si	si	si
	Elimina los Cortes	**	*	**	si	si	**
Enfria y Lubrica la Sarta de Perforación y la Barrena		si	si	si	si	si	si
Enjarra las Paredes del Agujero		no	no	no	si	si	no
Evita Reventones		*L	no	no	si	si	no
Evita Pérdidas de Circulación		no	no	si	si	si	si
Evita Derrumbes		no	*L	no	si	si	no
Evita Pegadas de Tubería		no	*L	*L	si	si	si
OTRAS	Protege Zonas Productoras	no	si	si	si	si	si
	Protege Muestras y Núcleos	no	si	si	si	si	si
	Ayuda a la Toma de Registros Eléctricos	si	*L	no	*S	*S	*L

* depende de la capacidad del equipo superficial.

** en caso de utilizarse por una sola ocasión.

*L limitada por diversos factores.

*S selectiva.

LODOS	DENSIDAD g/cc	FILTRADOS Mínimo Común(ml)		pH	TEMPERATURA MAXIMA C	SALINIDAD p.p.m. Cl ⁻
		A.P.I.	A.P.AT.			
Naturales	1.03-1.40	14.0	70.0	7.0- 8.5	60	0- 7000
Bentonítico Sódico Tratado con Fosfato	1.03-2.25	6.0	30.0	8.0- 9.9	70	0- 7000
Bentonítico Sódico Tratado con Tanino	1.03-2.25	5.0	30.0	8.5- 9.5	90	0-10000
Bentonítico Sódico Tratado con CL-CLS	1.03-2.25	0.5	18.0	9.0- 9.5	180	0-150000
Rojos	1.03-2.25	5.0	30.0	10.5-11.5	90	0-12000
Cálcicos	1.05-2.25	1.0	15.0	11.5-13.0	120	0-70000
Base Yeso	1.05-2.25	1.0	15.0	9.0-12.5	140	0-70000
Salinos	1.05-2.25	1.0	15.0	6.0-12.5	150	150000-Saturación
Bajo Contenido de Sólidos Dispersos	1.03-1.05	3.0	15.0	7.0- 8.5	150	0-200000
Bajo Contenido de Sólidos no Dispersos	1.01-1.04	10.0	30.0	7.0- 8.5	150	50000-200000
Emulsión Inversa	0.98-2.25	0.0	5.0	no	250	50000-Saturación
Base Aceite	0.98-2.25	0.0	5.0	no	250	0-Saturación

CUADRO 3.3

CARACTERISTICAS DE TRABAJO DE LOS LODOS.

Experiencias de Campo.

SECCION FIGURAS

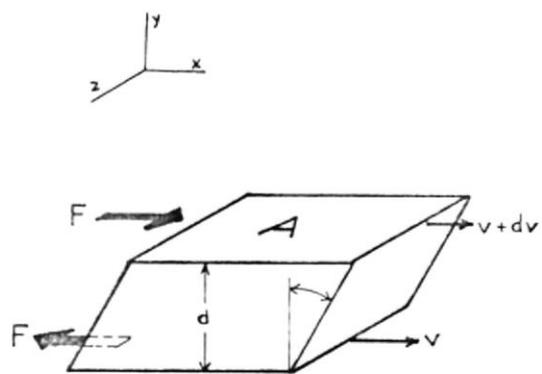


Fig. 2.1

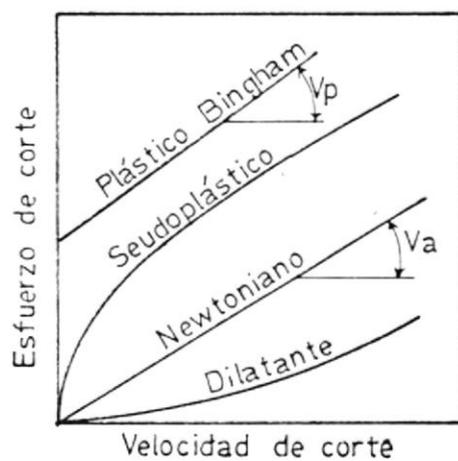


Fig. 2.2

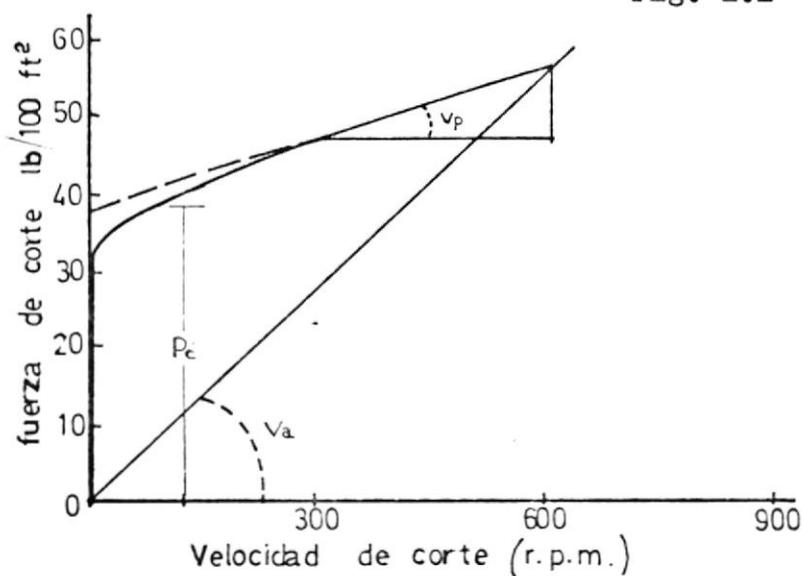


Fig. 2.3

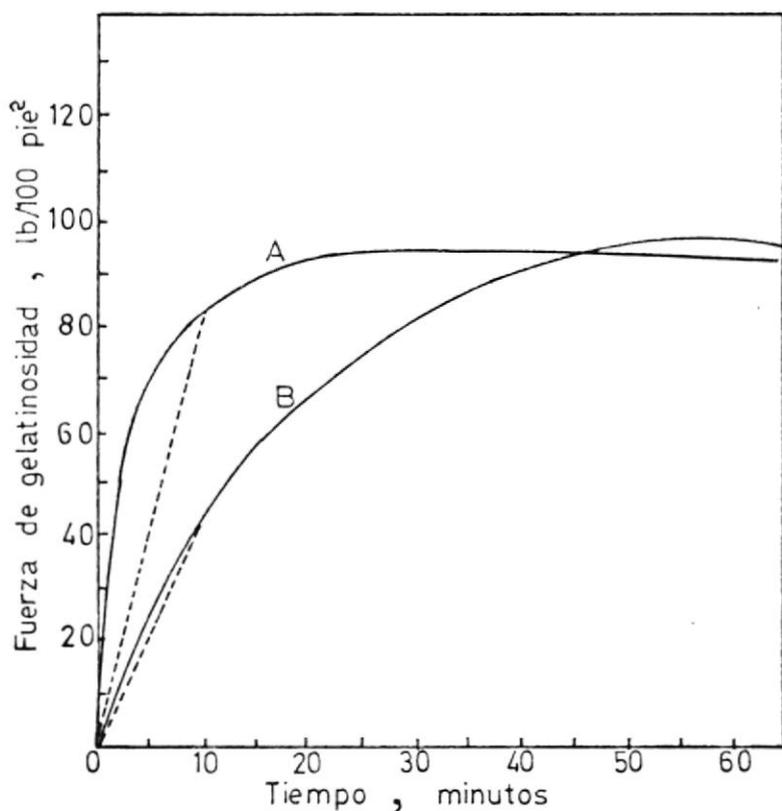


Fig. 2.4

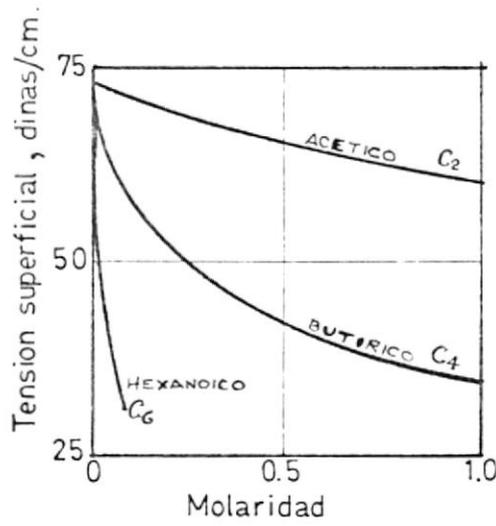
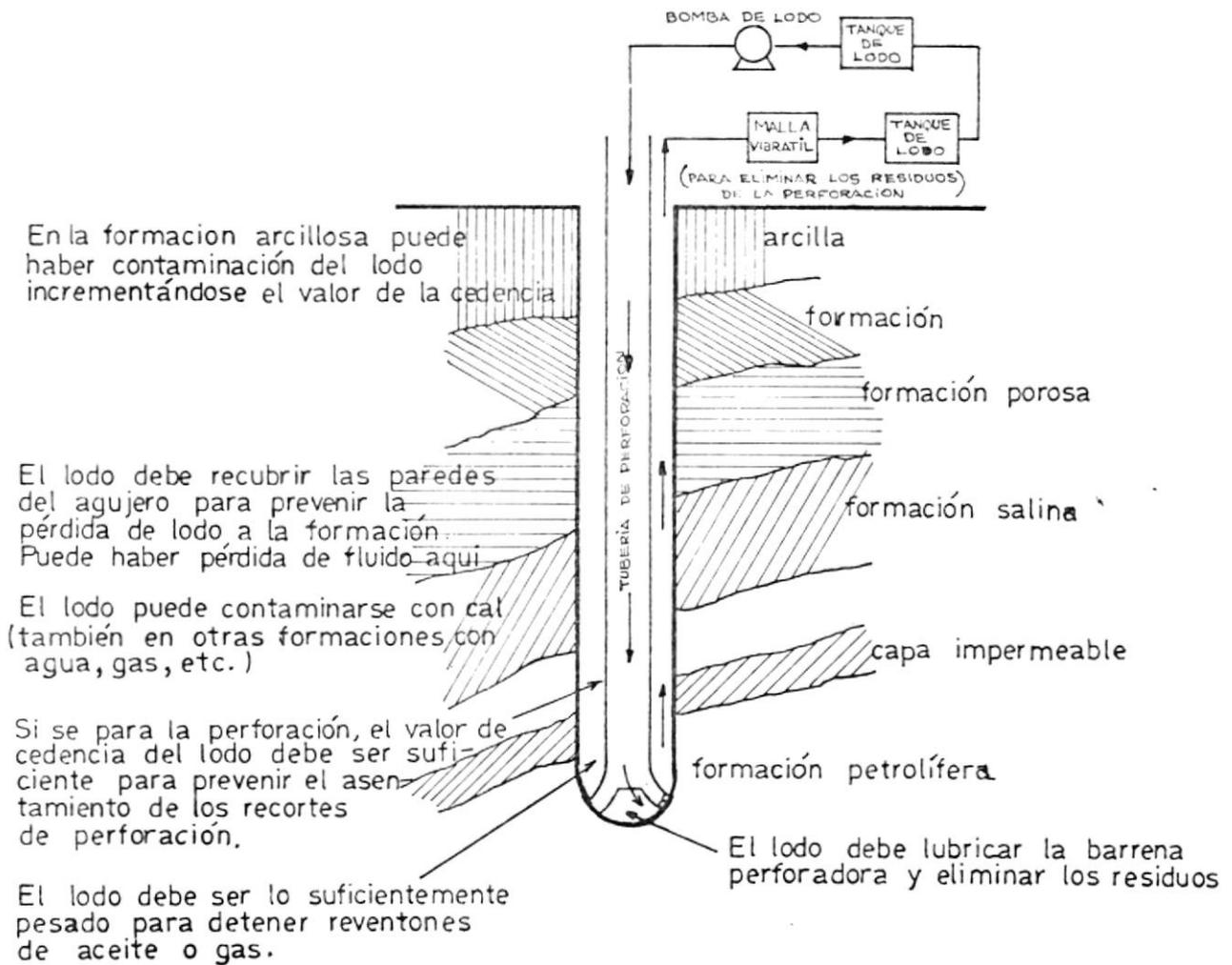
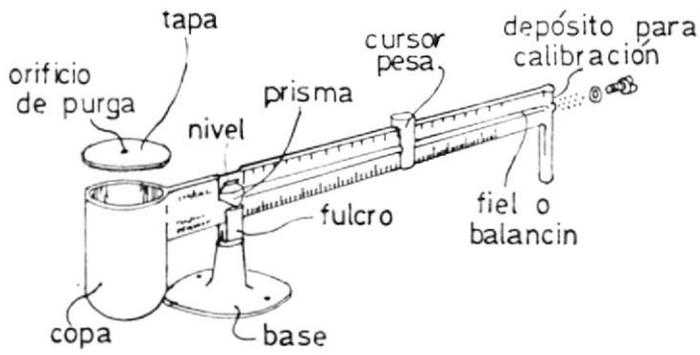


Fig. 2.5

Fig. 2.6





BALANZA DE LODOS

Fig. 4.1

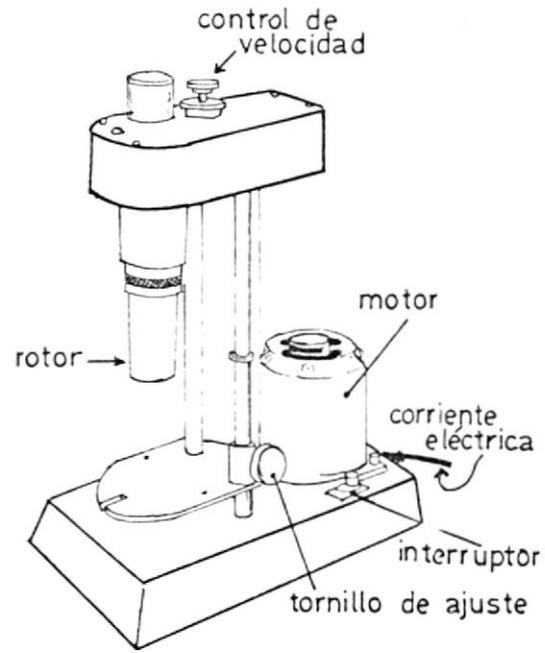


Fig. 4.2

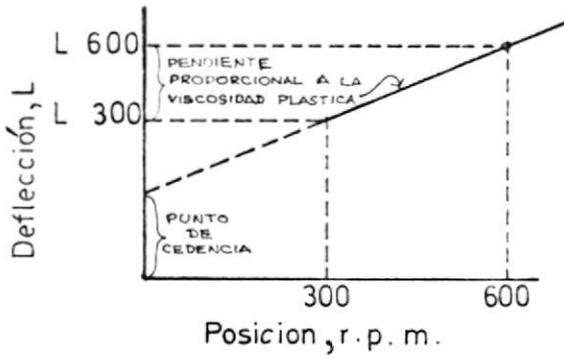


Fig. 4.3

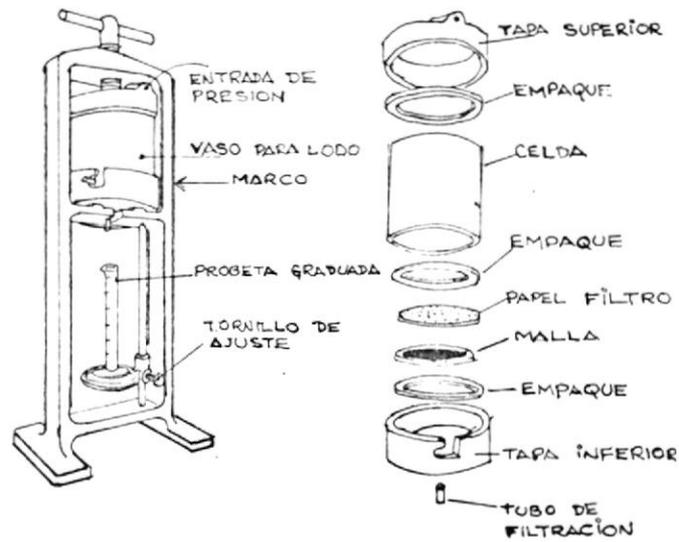


Fig. 4.4

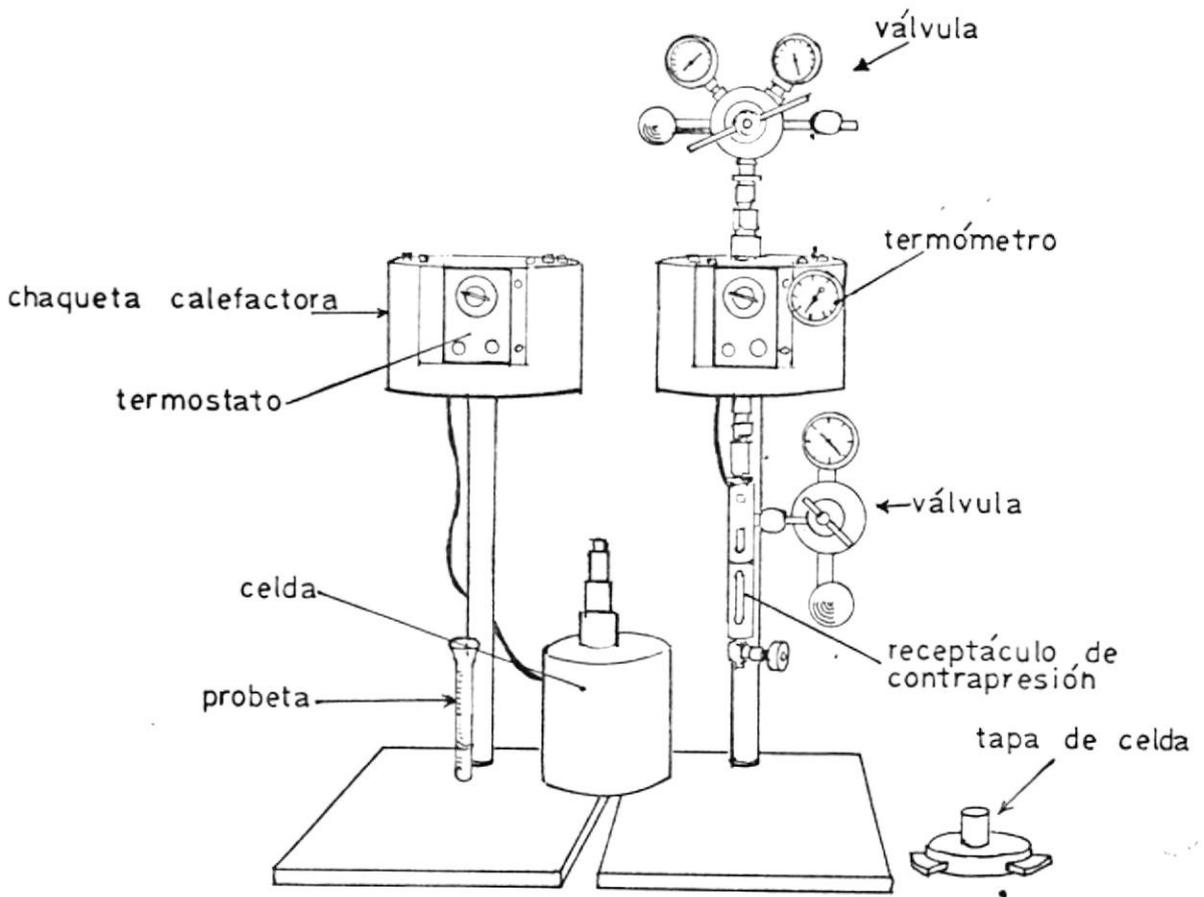


Fig. 4.5

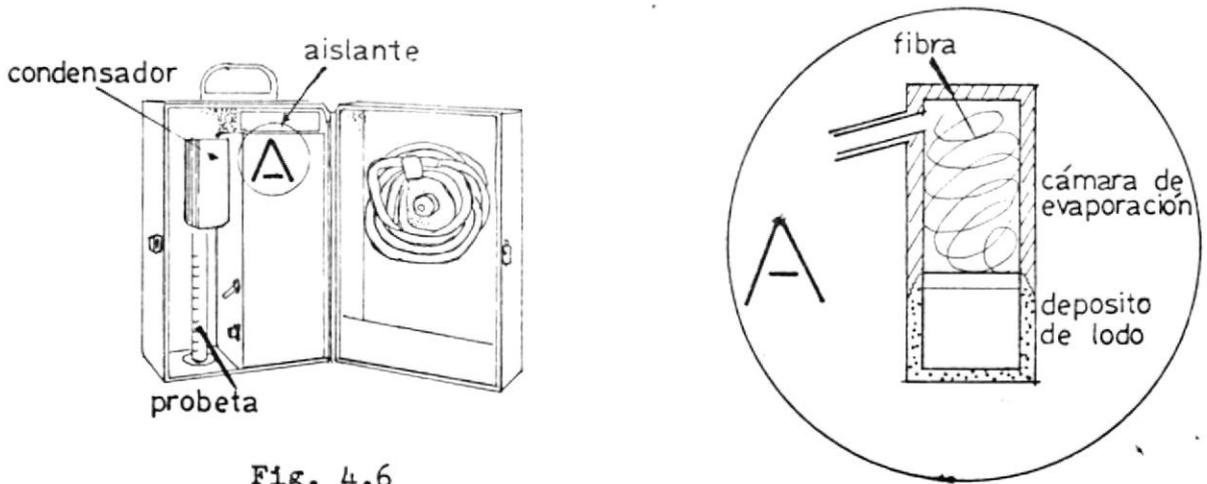


Fig. 4.6

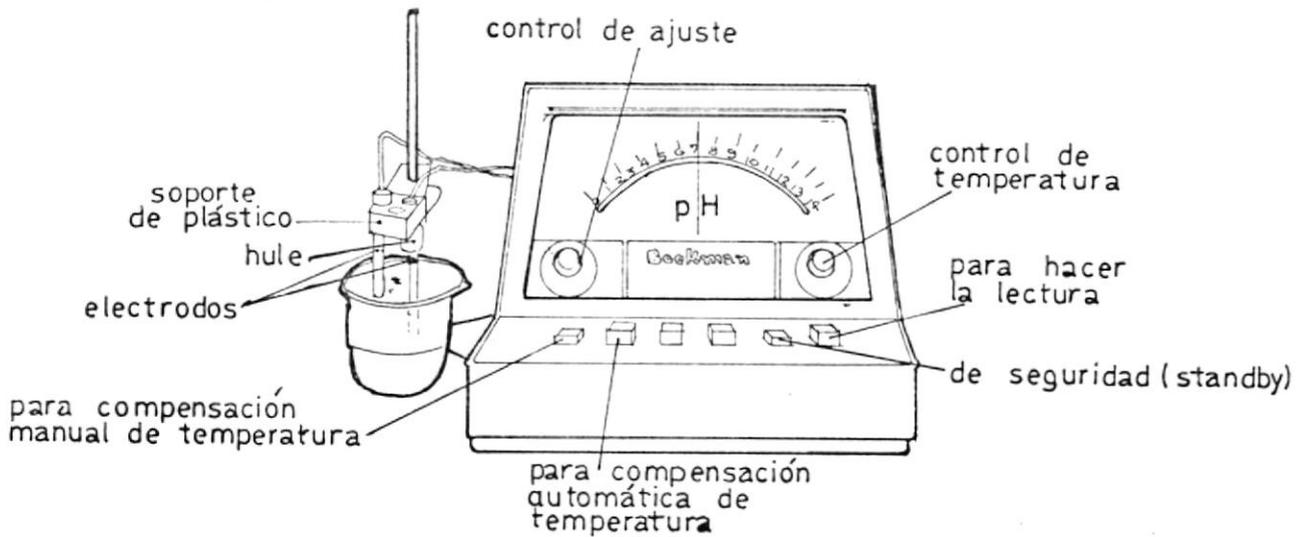


Fig. 4.7

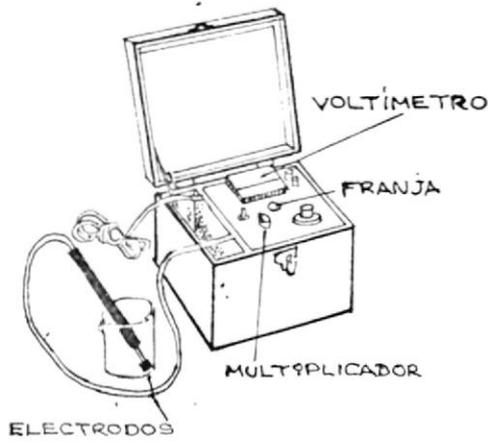


FIG. 4.8

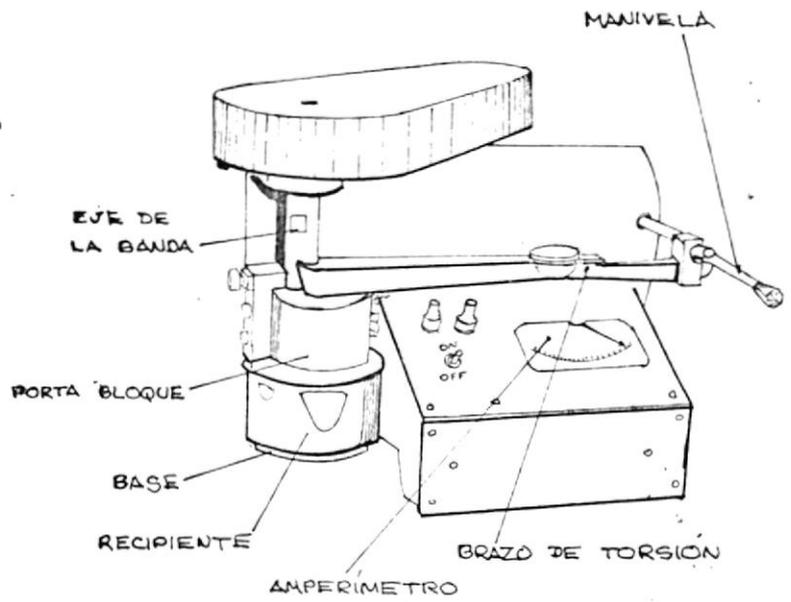


FIG. 4.10

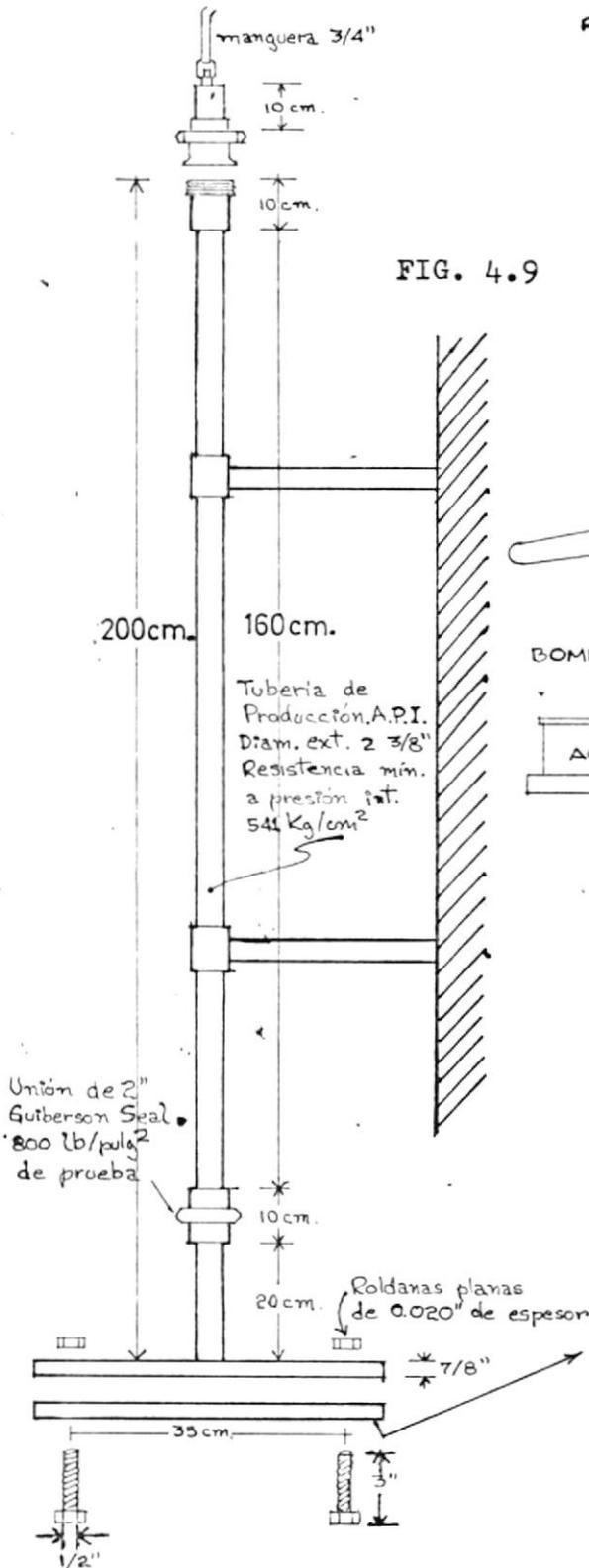
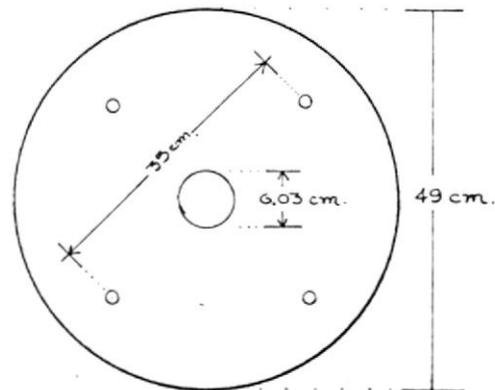
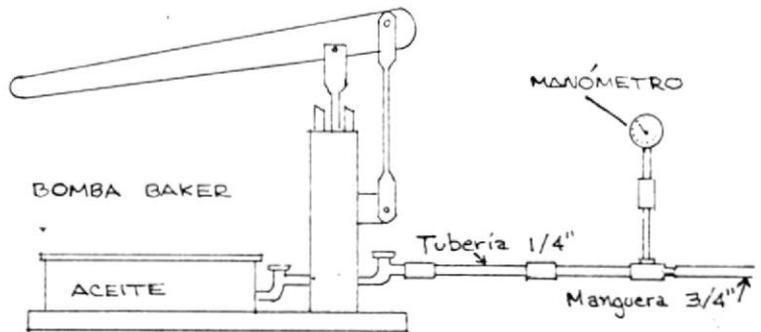


FIG. 4.9



LODO BENTONITICO SODICO

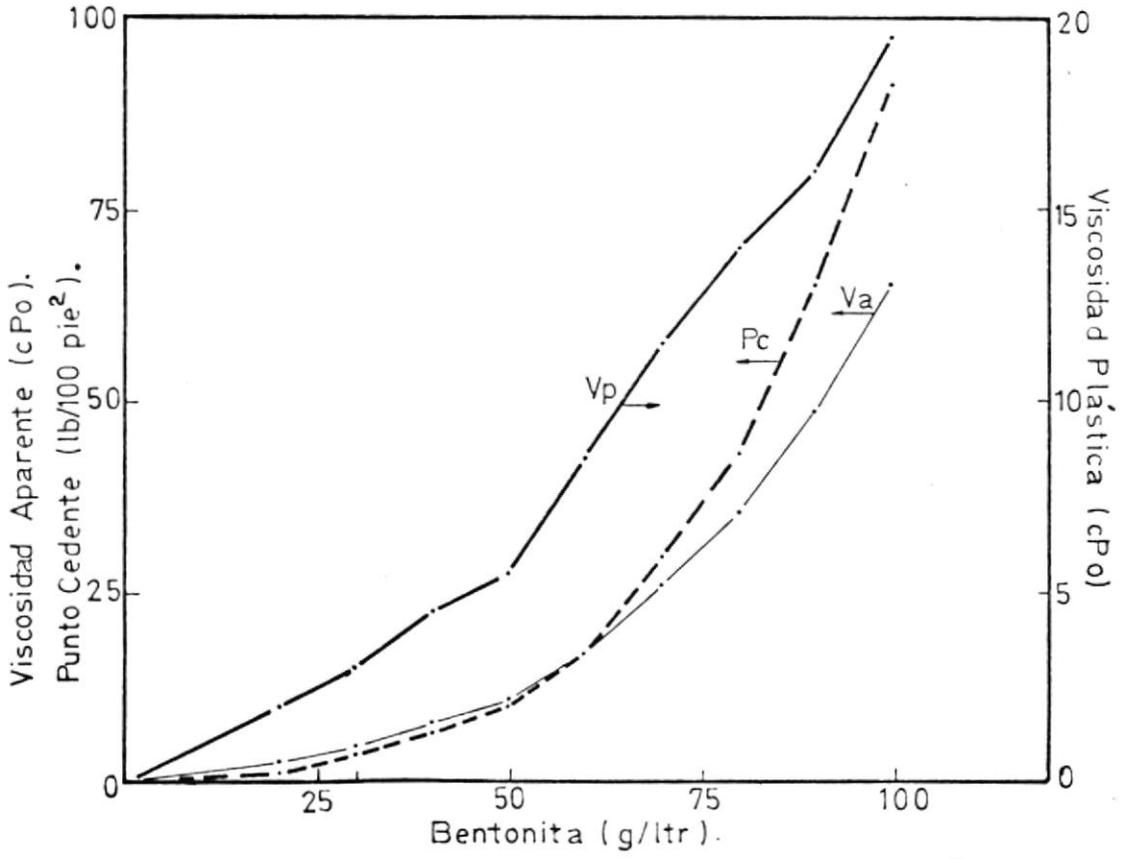
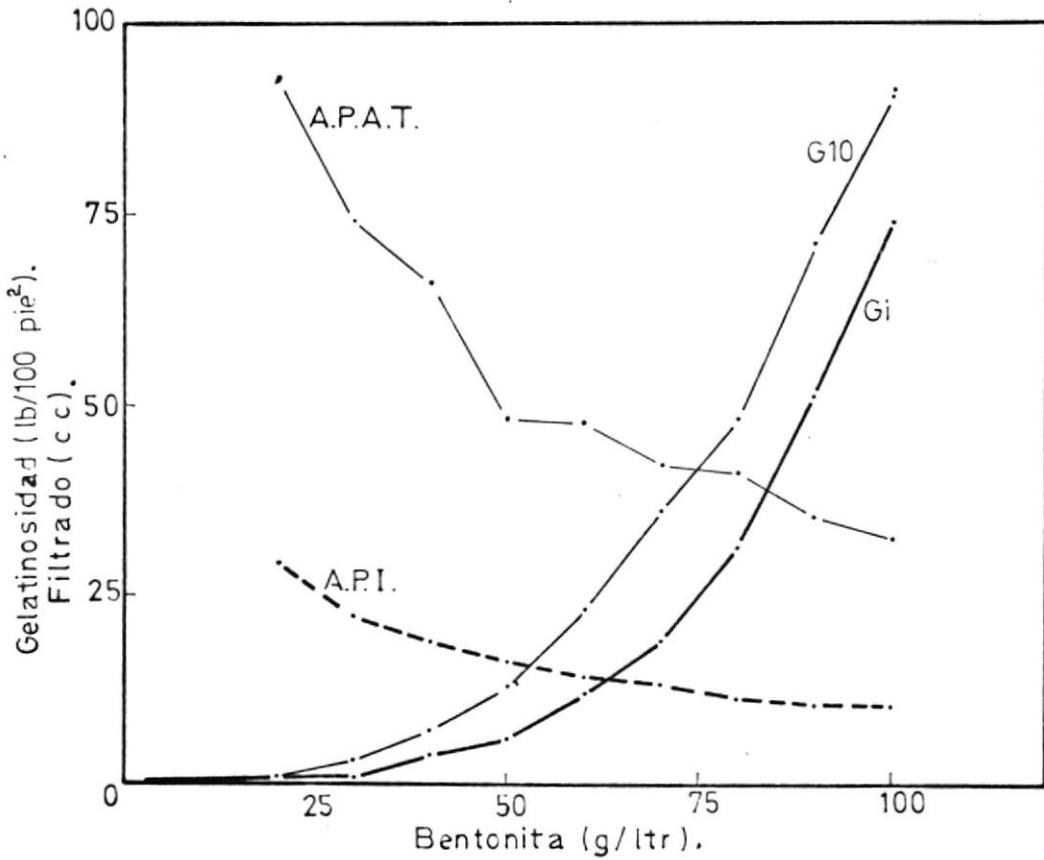


FIG. 5.1

LODO BENTONITICO SODICO.

FIG. 5.2



LODO CALCICO

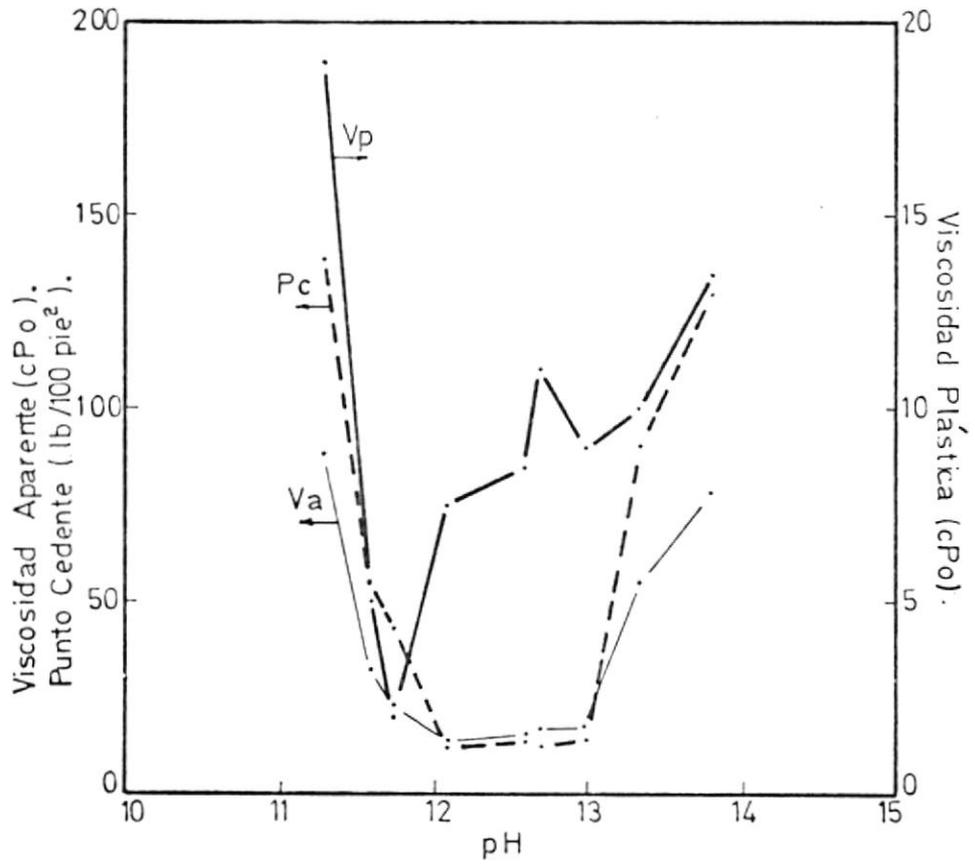
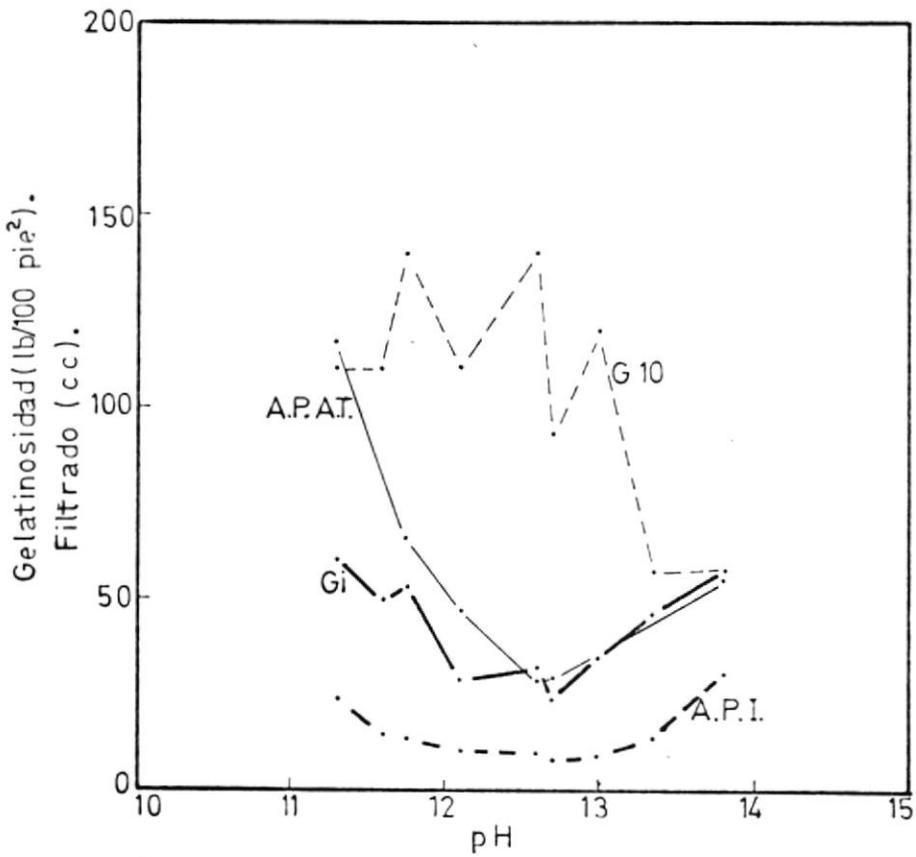


FIG. 5.3

LODO CALCICO.

FIG. 5.4



LODO CALCICO

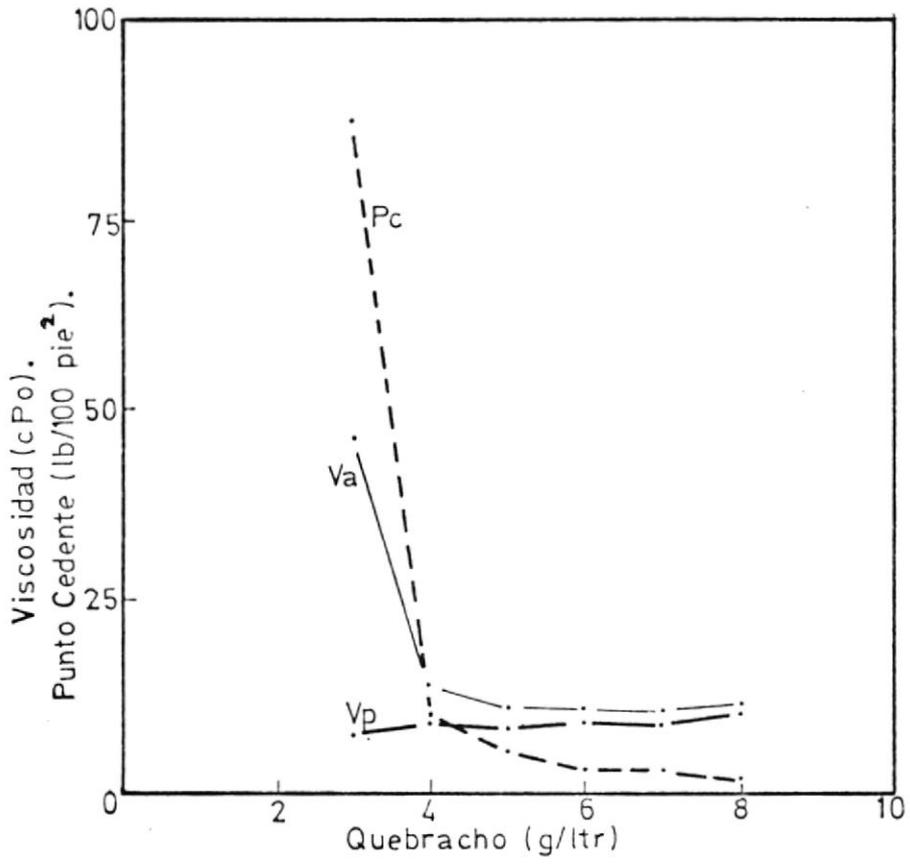
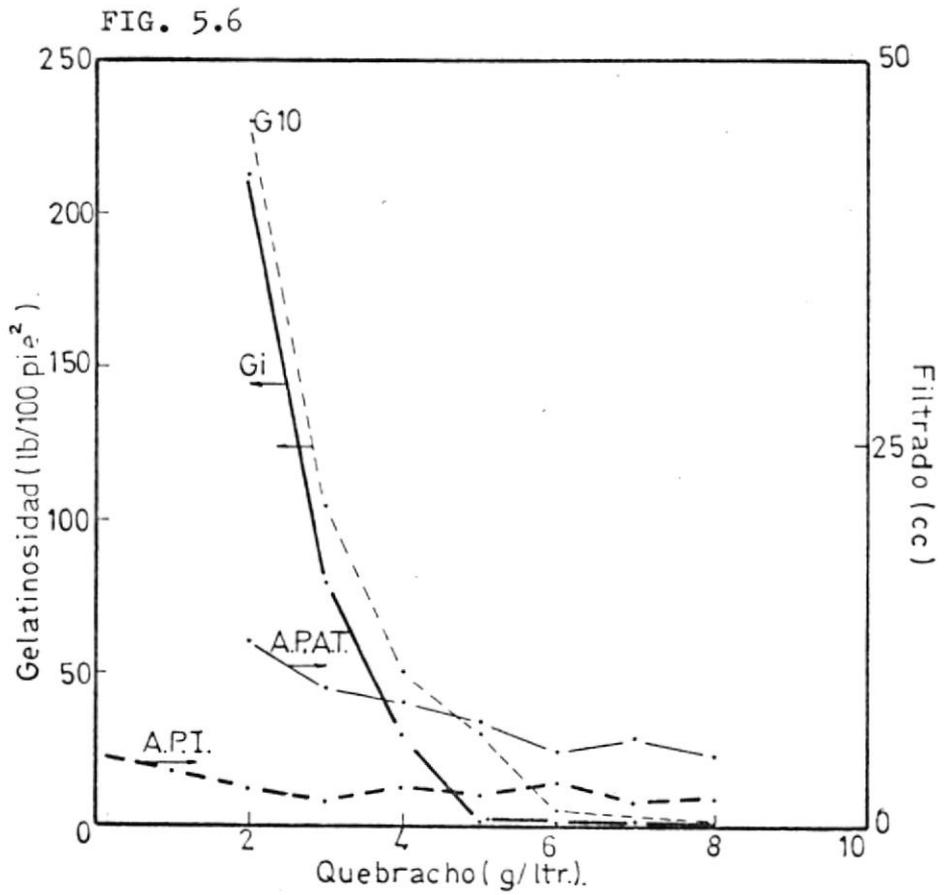


FIG. 5.5

LODO CALCICO.



LODO CALCICO

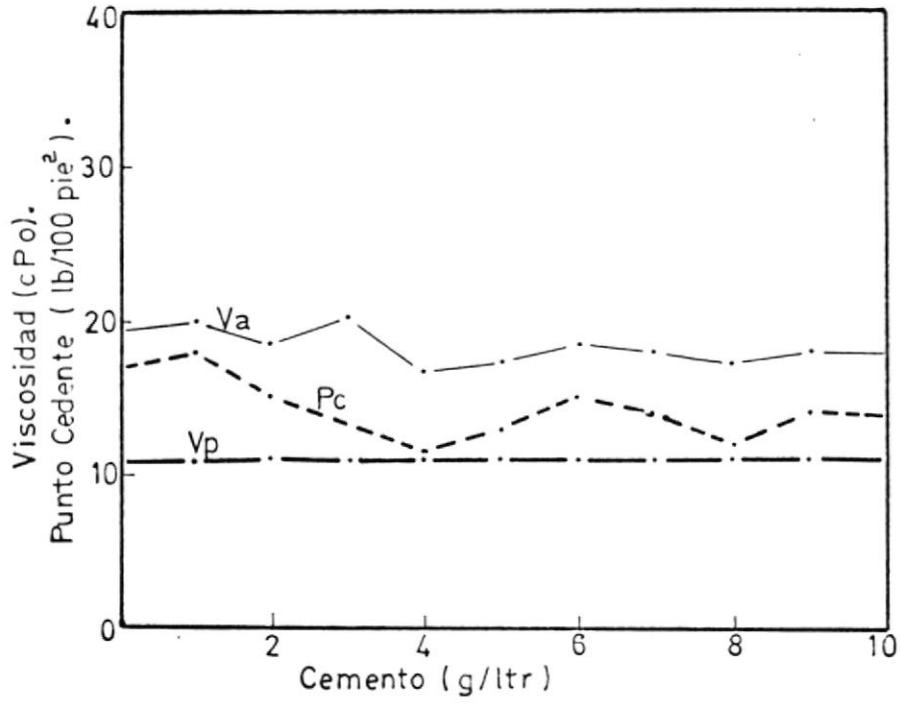


FIG. 5.7

LODO CALCICO.

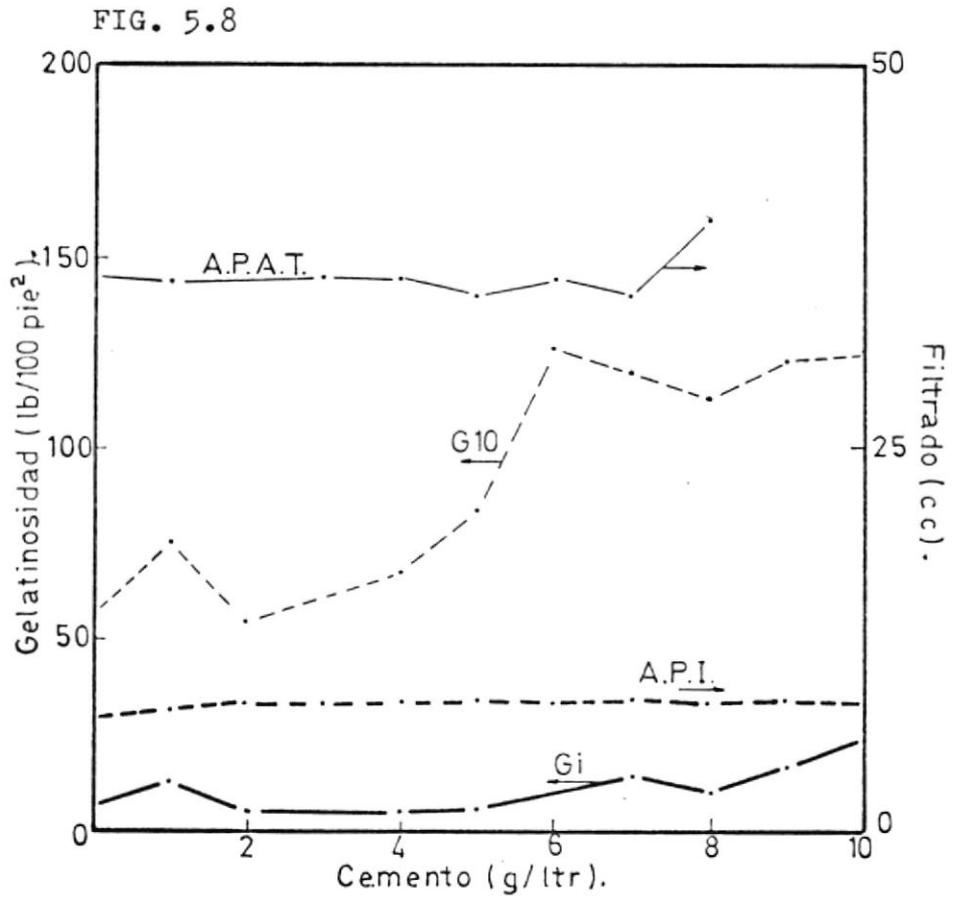


FIG. 5.8

LODO BASE YESO

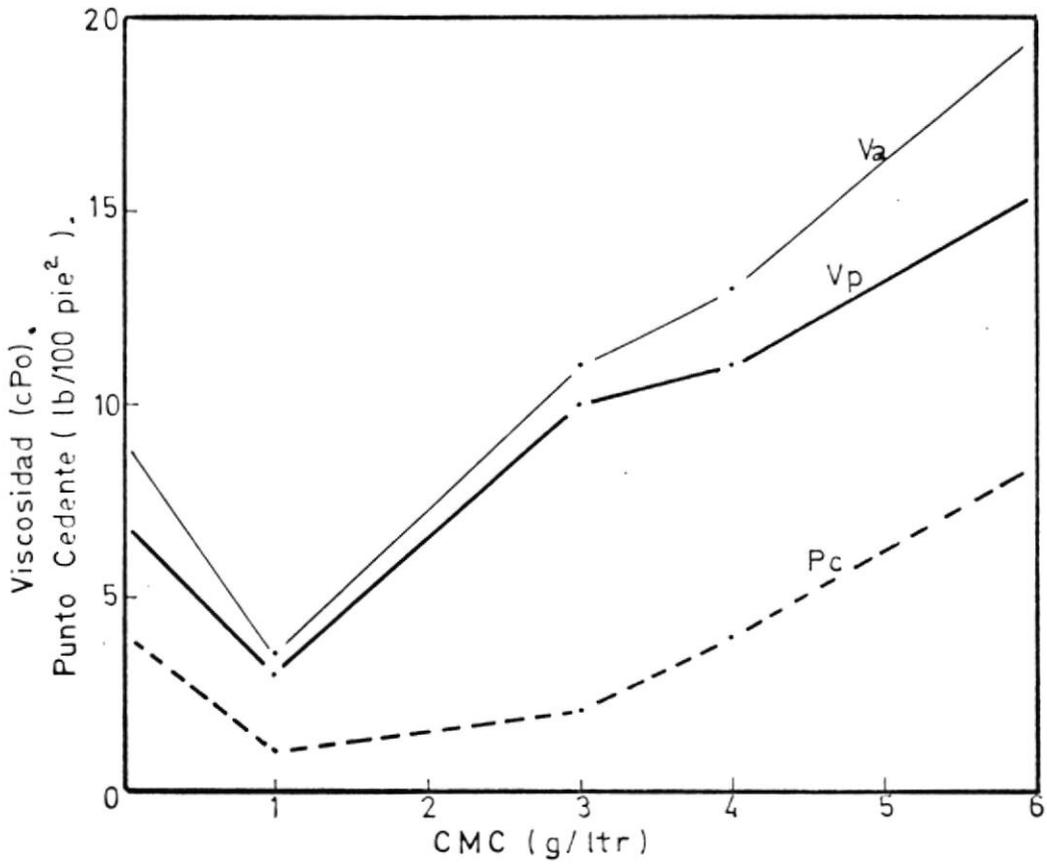
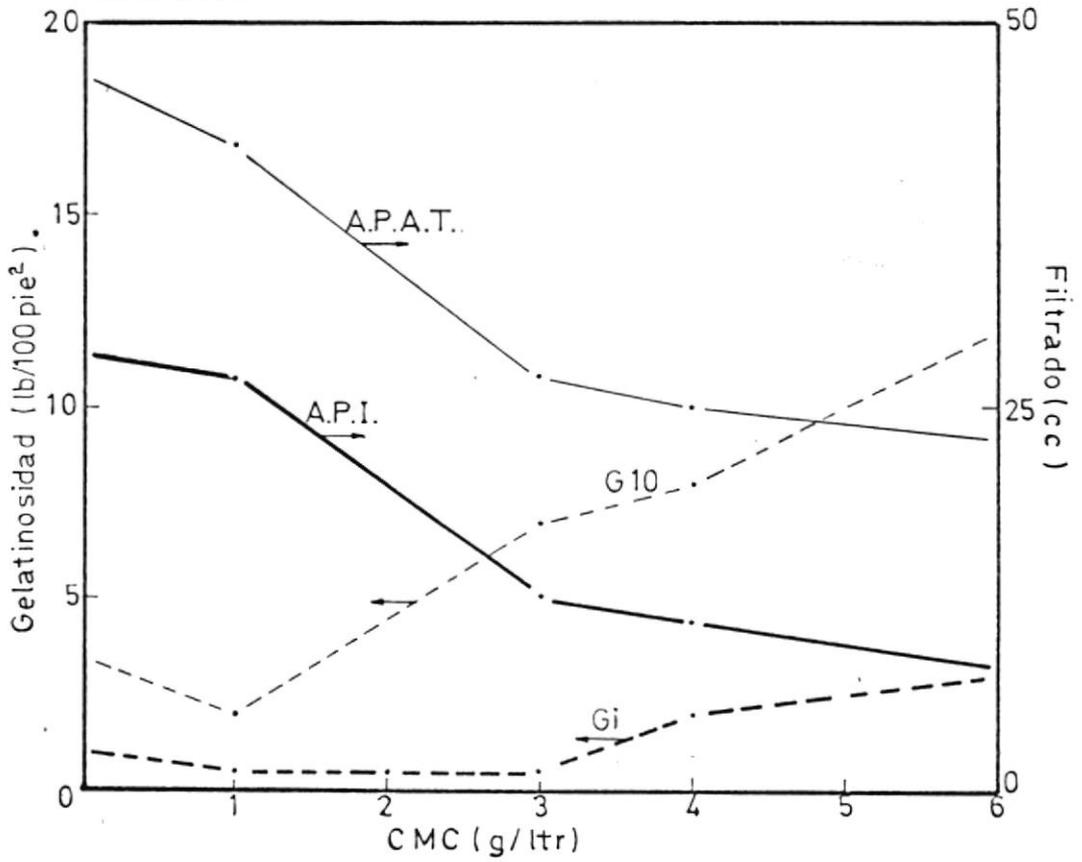


FIG. 5.9

LODO BASE YESO.

FIG. 5.10



LODO BASE YESO

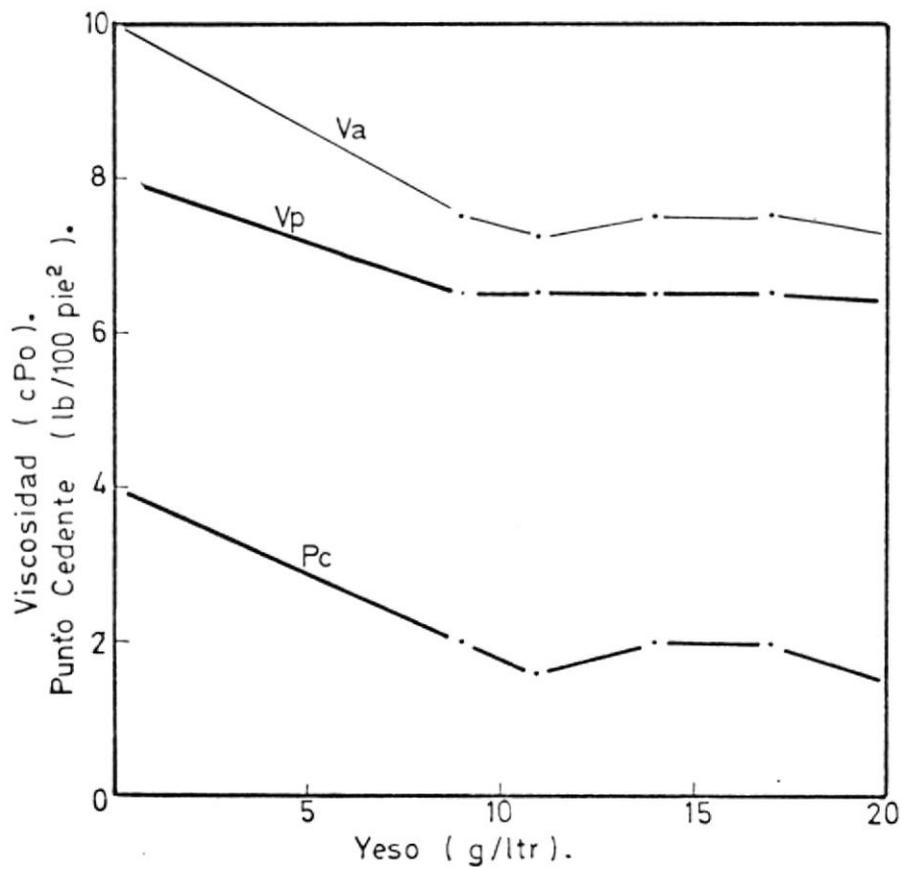


FIG. 5.11

LODO BASE YESO.

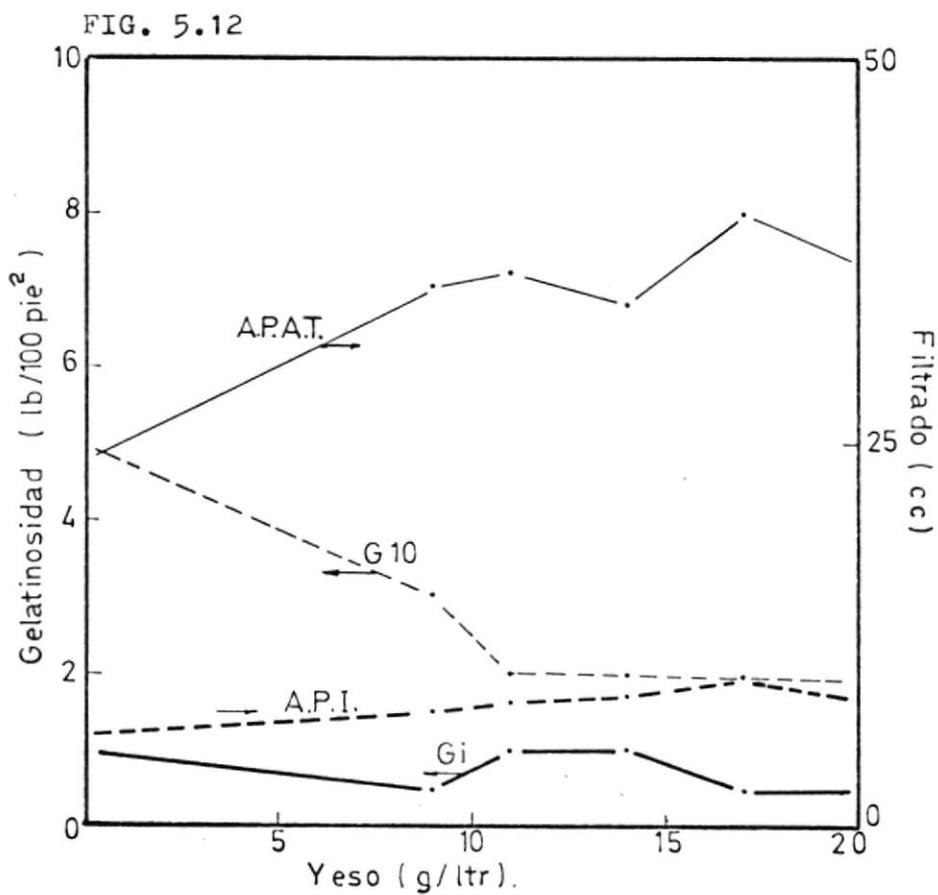


FIG. 5.12

LODO BASE YESO

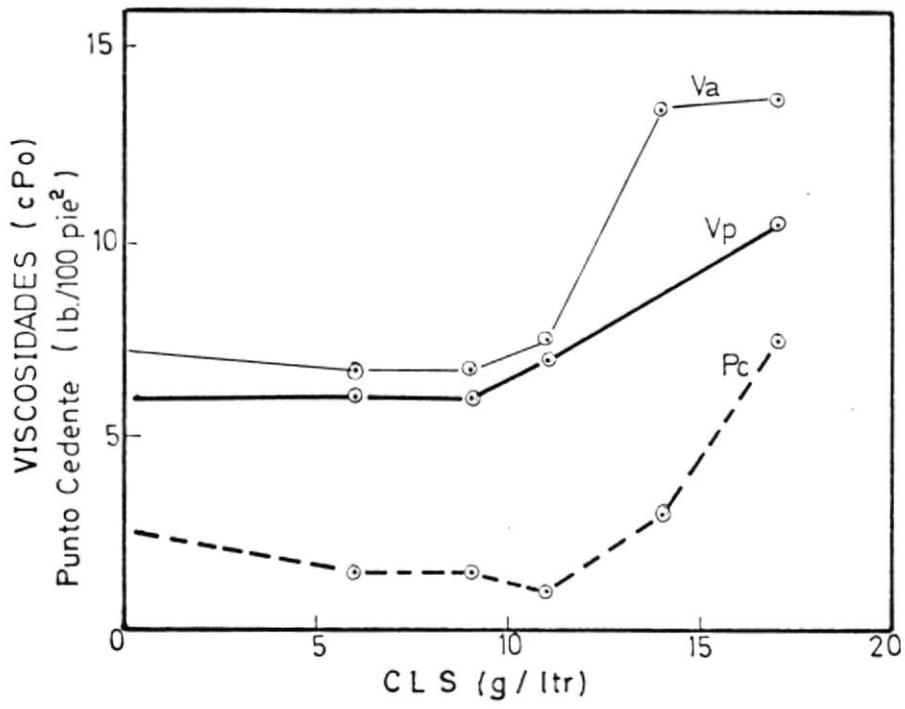
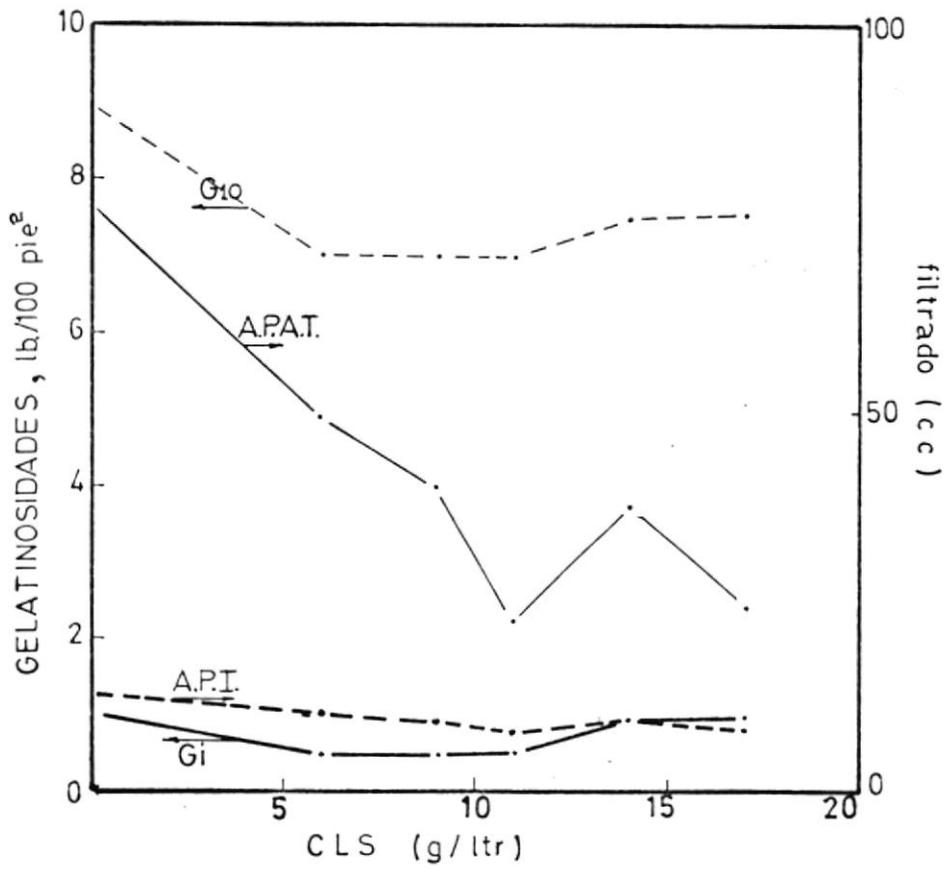


FIG. 5.13

LODO BASE YESO

FIG. 5.14



LODO SALADO

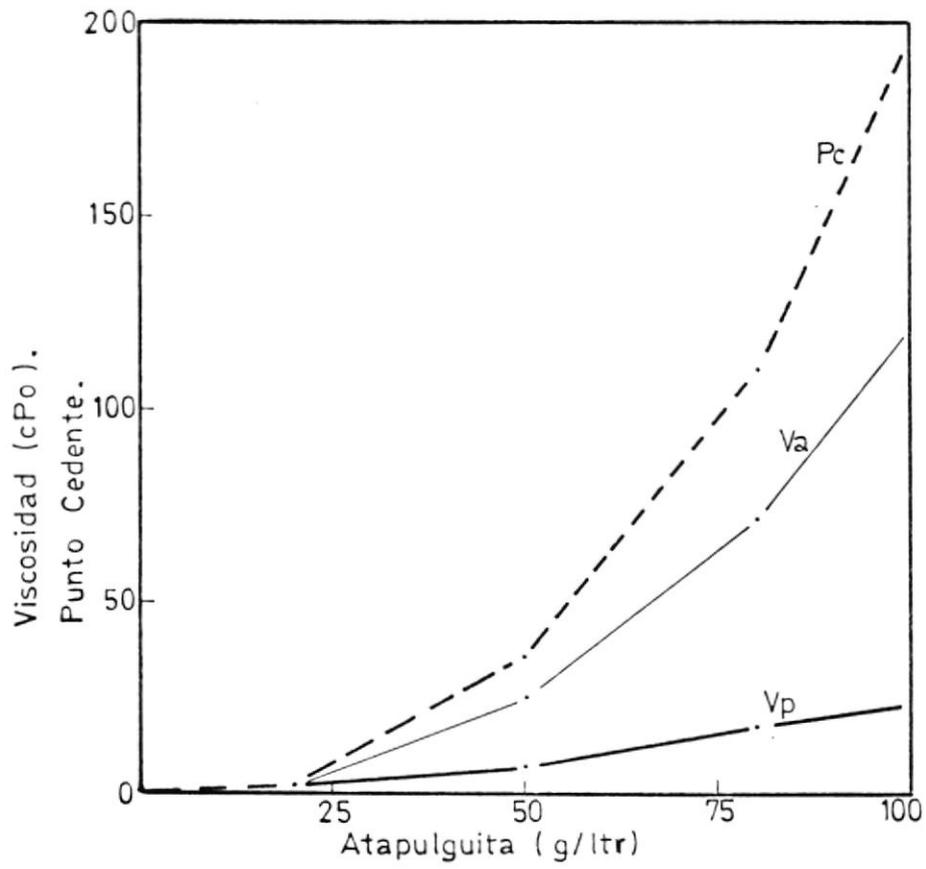


FIG. 5.15

LODO SALADO

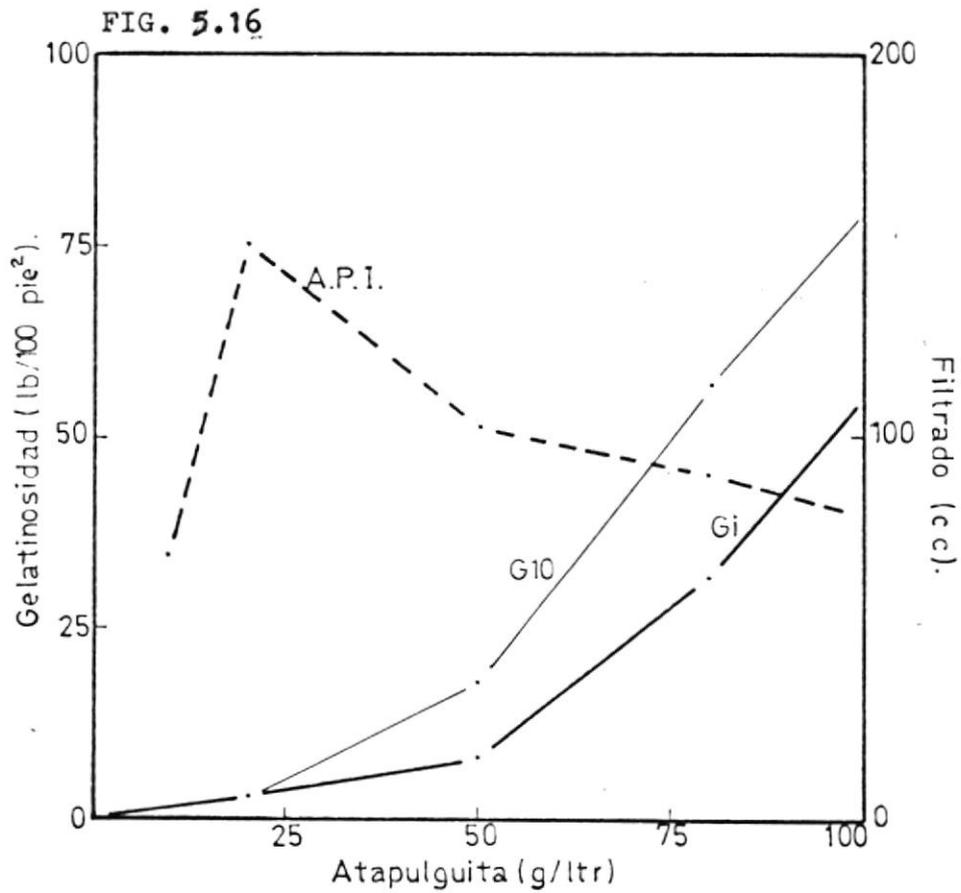


FIG. 5.16

LODO SALADO

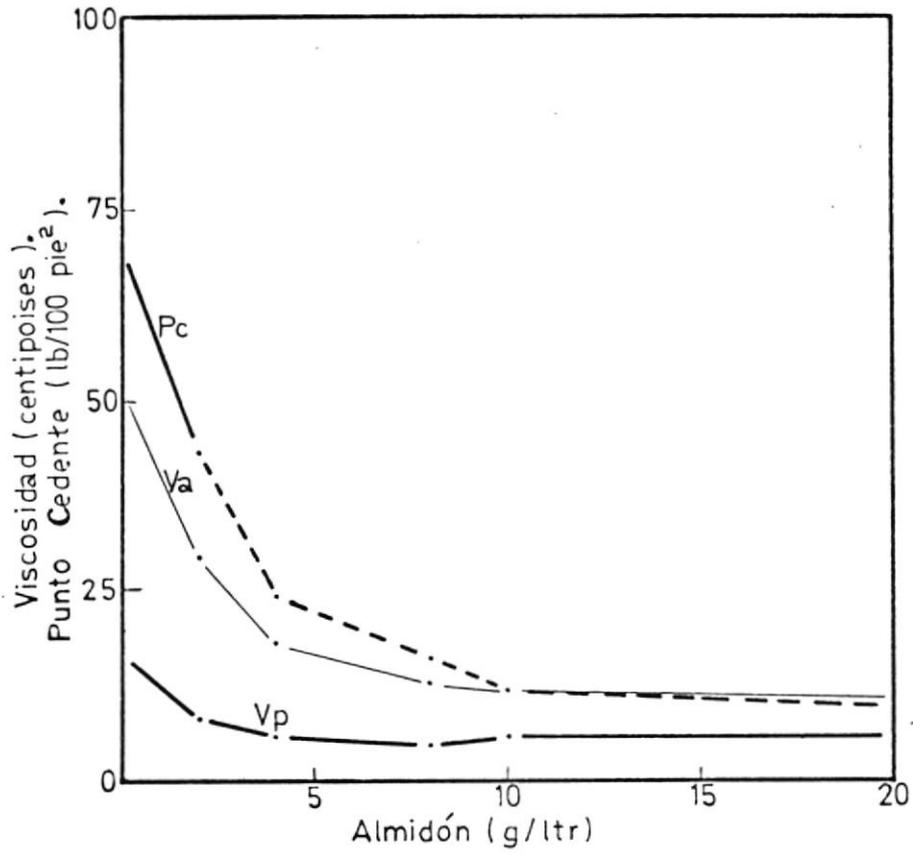


FIG. 5.17

LODO SALADO

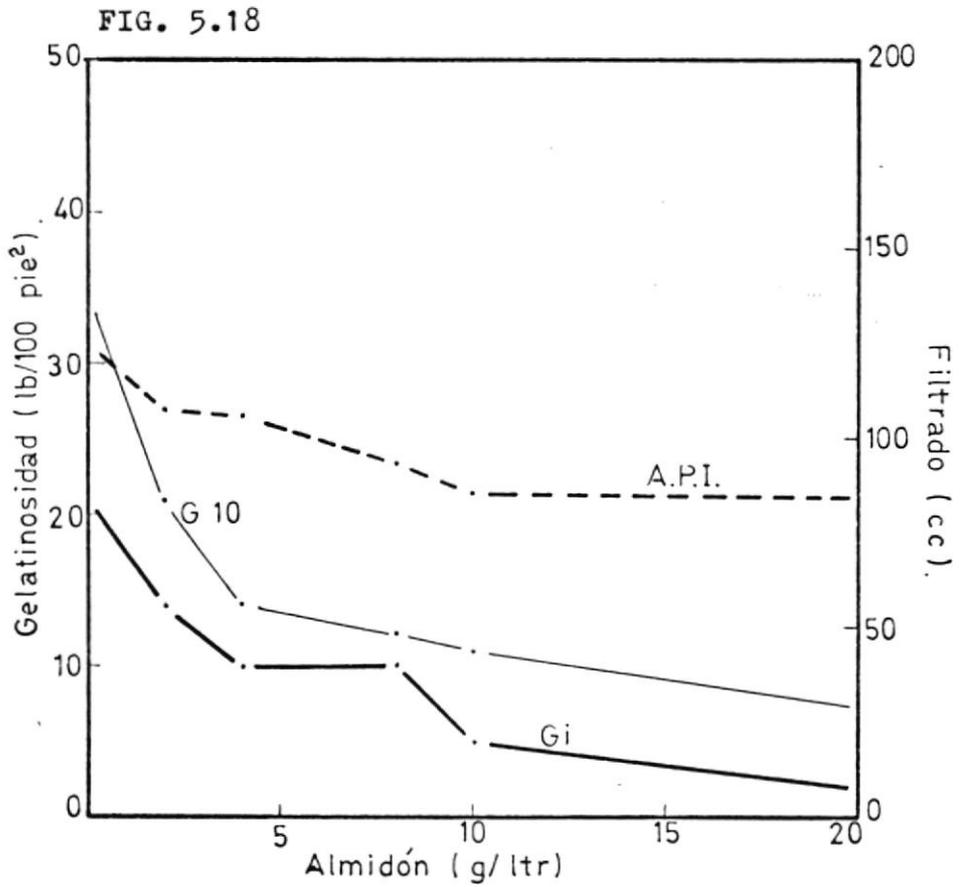


FIG. 5.18

LODO SALADO

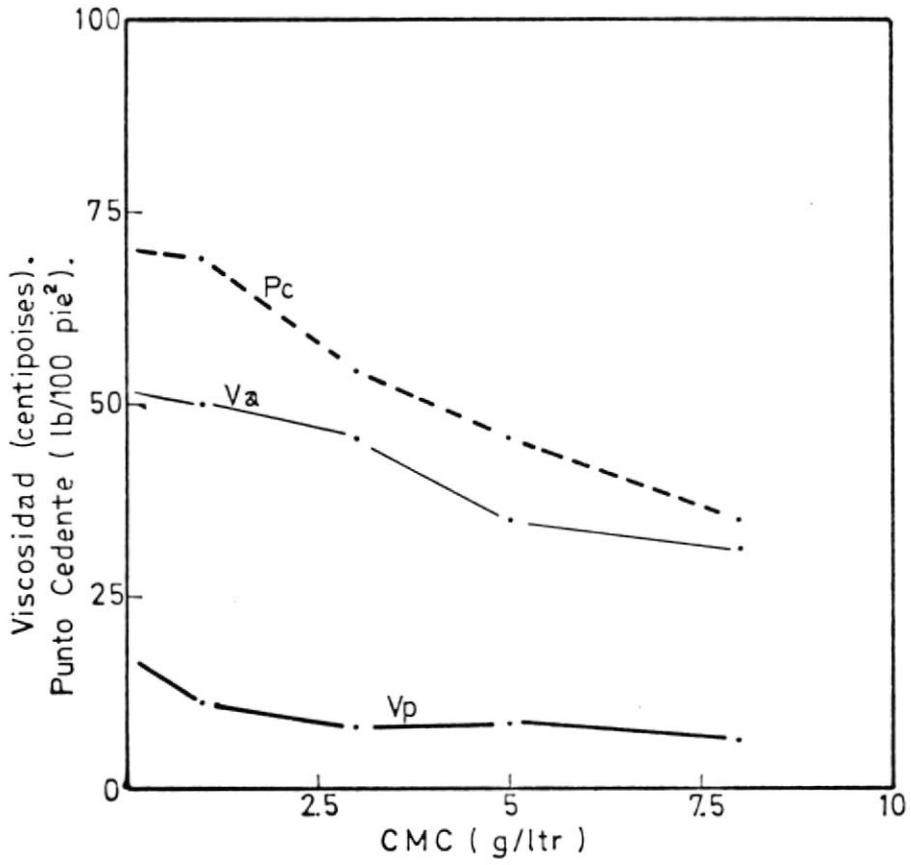


FIG. 5.19

LODO SALADO

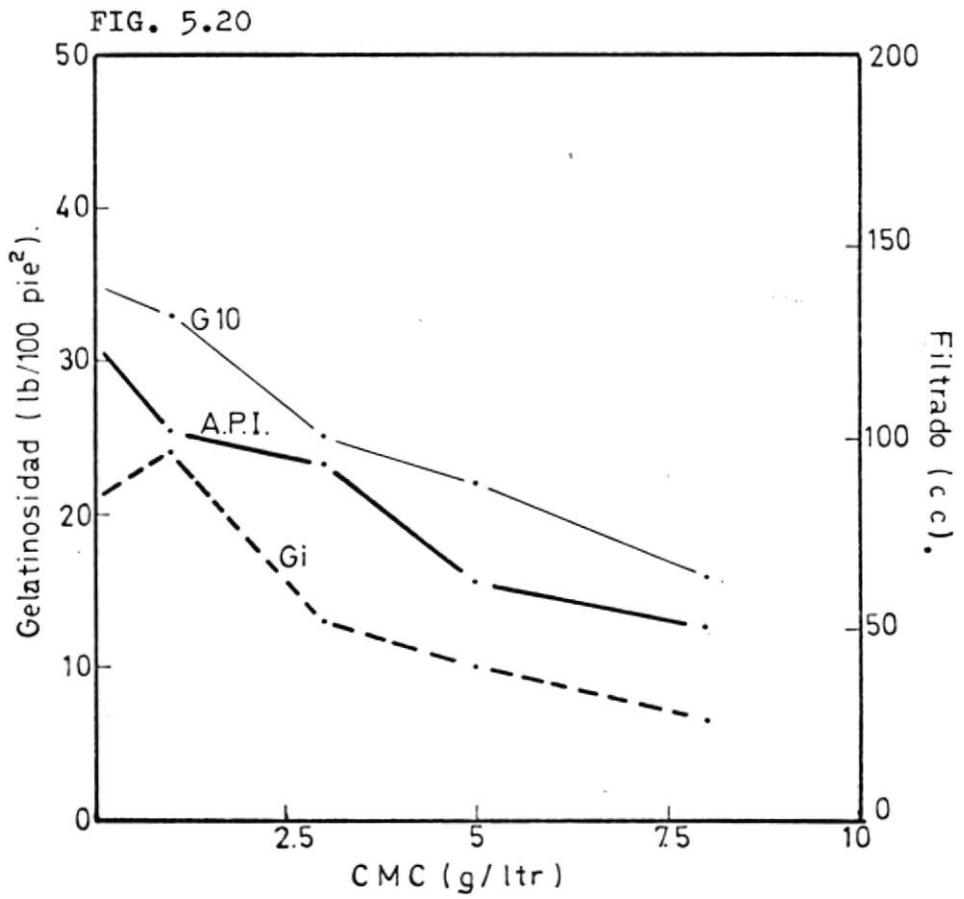


FIG. 5.20

LODO CALCICO EMULSIONADO

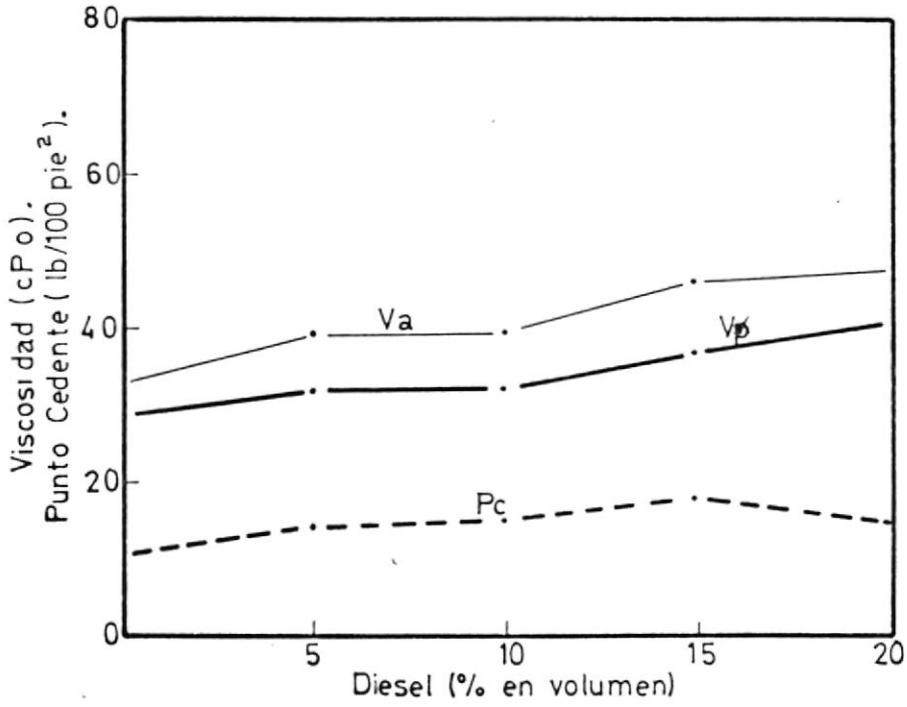


FIG. 5.21

LODO CALCICO EMULSIONADO

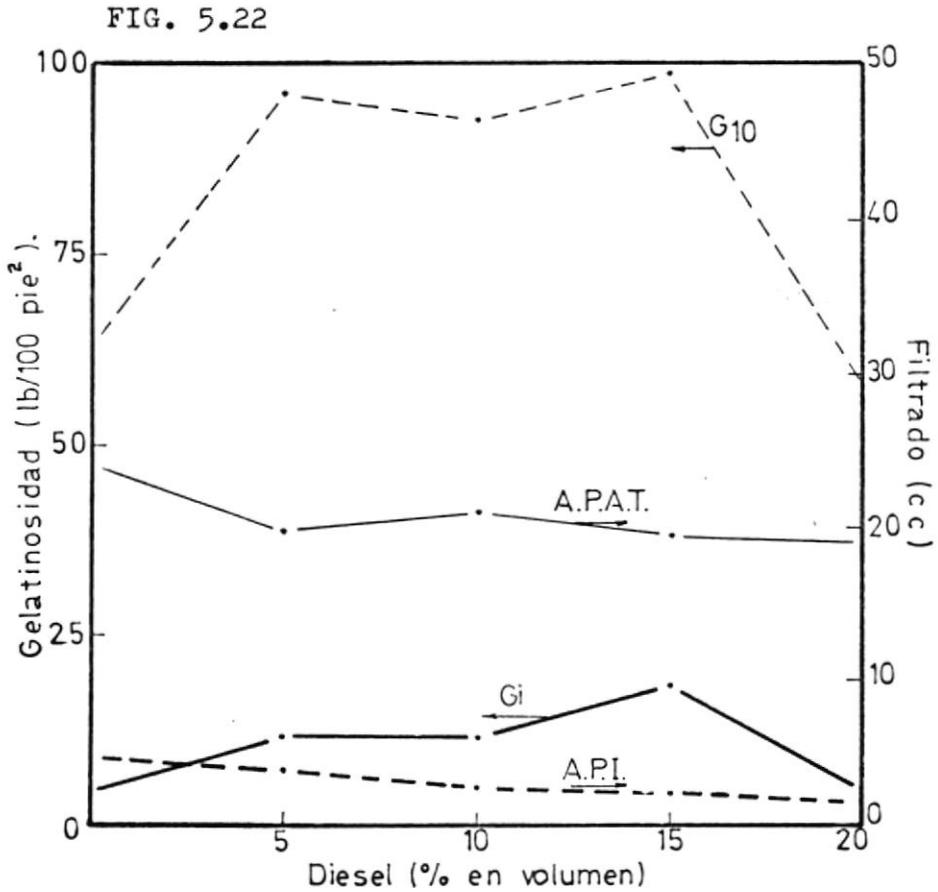


FIG. 5.22

LODO ROJO EMULSIONADO

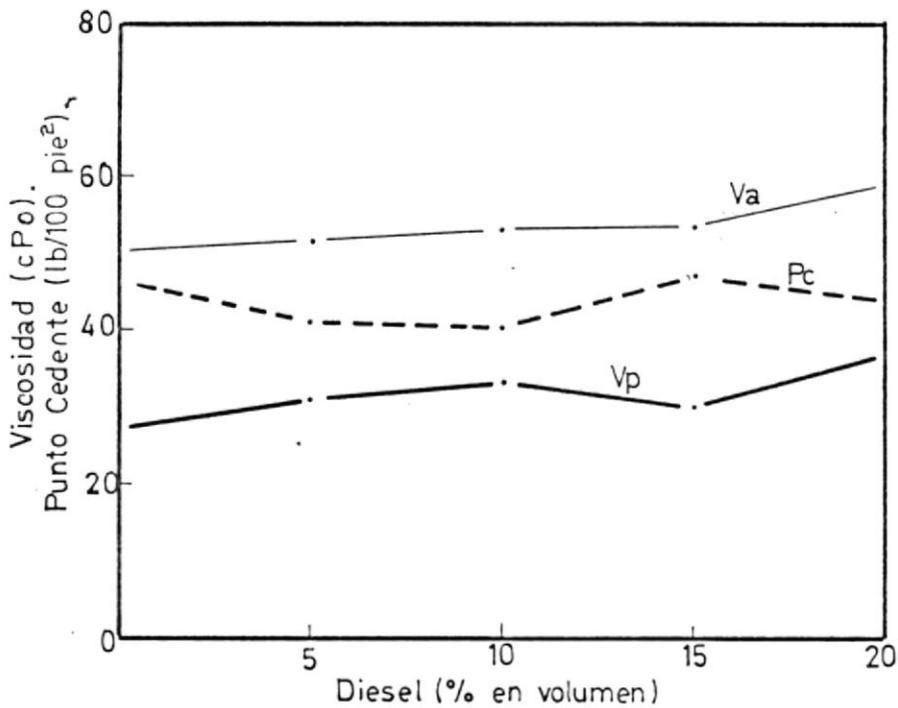


FIG. 5.23

LODO ROJO EMULSIONADO

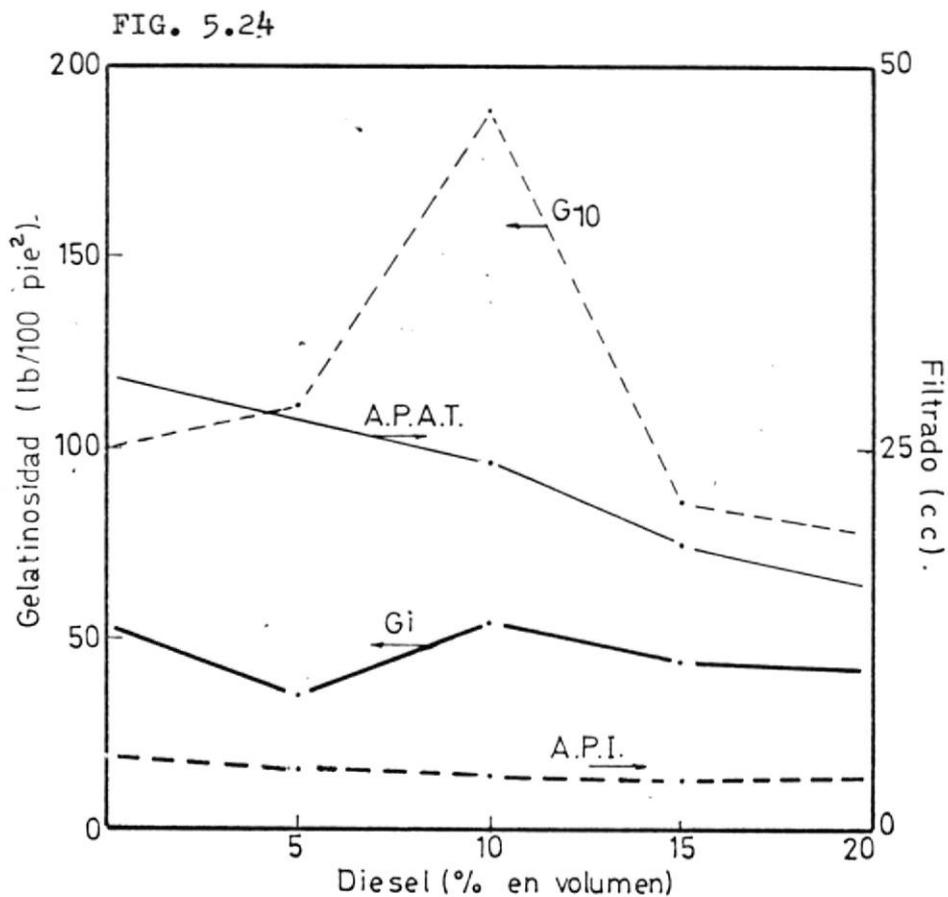


FIG. 5.24

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

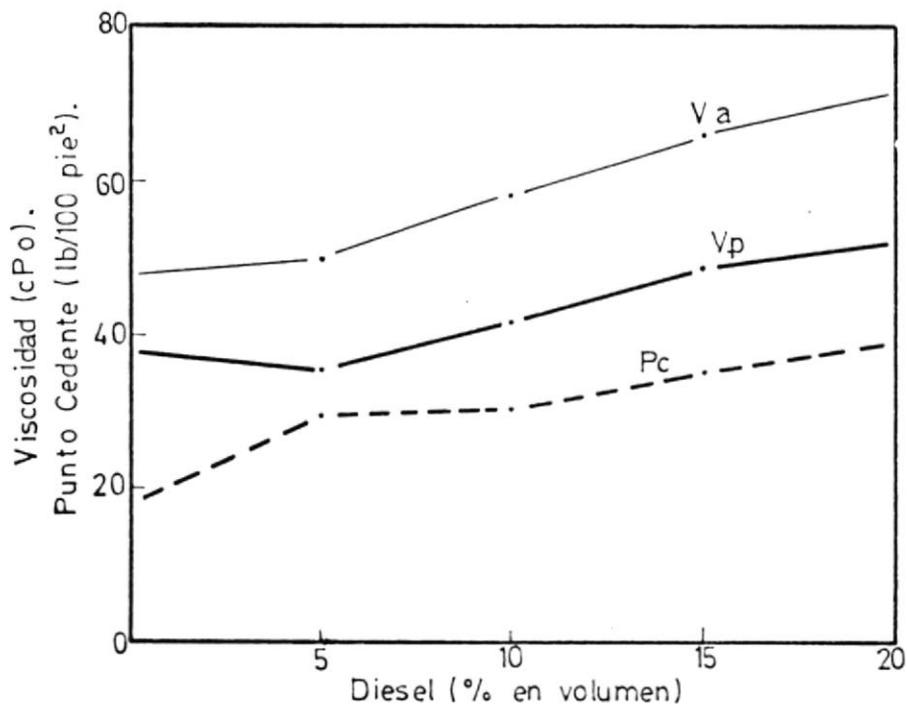


FIG. 5.25

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

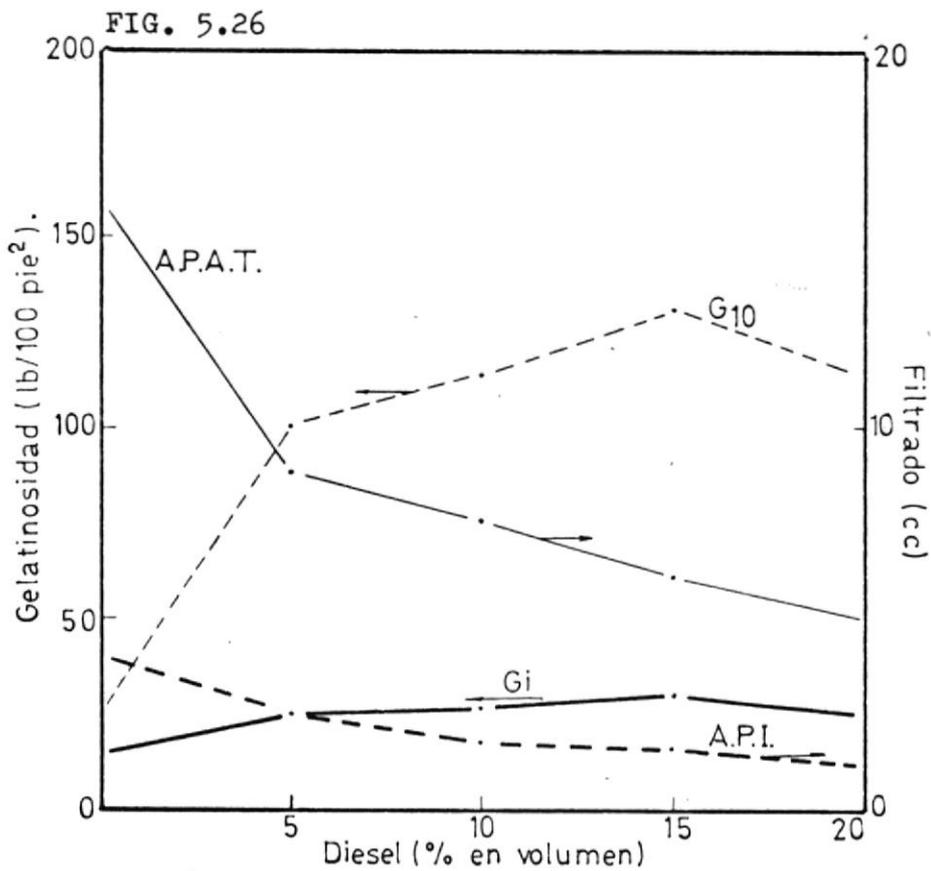


FIG. 5.26

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

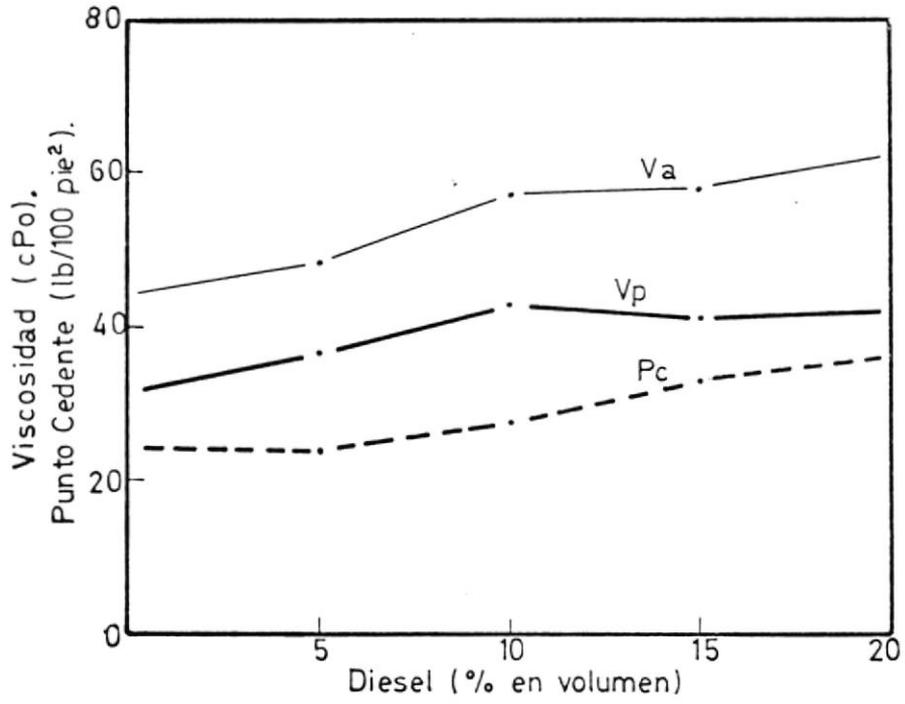


FIG. 5.27

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

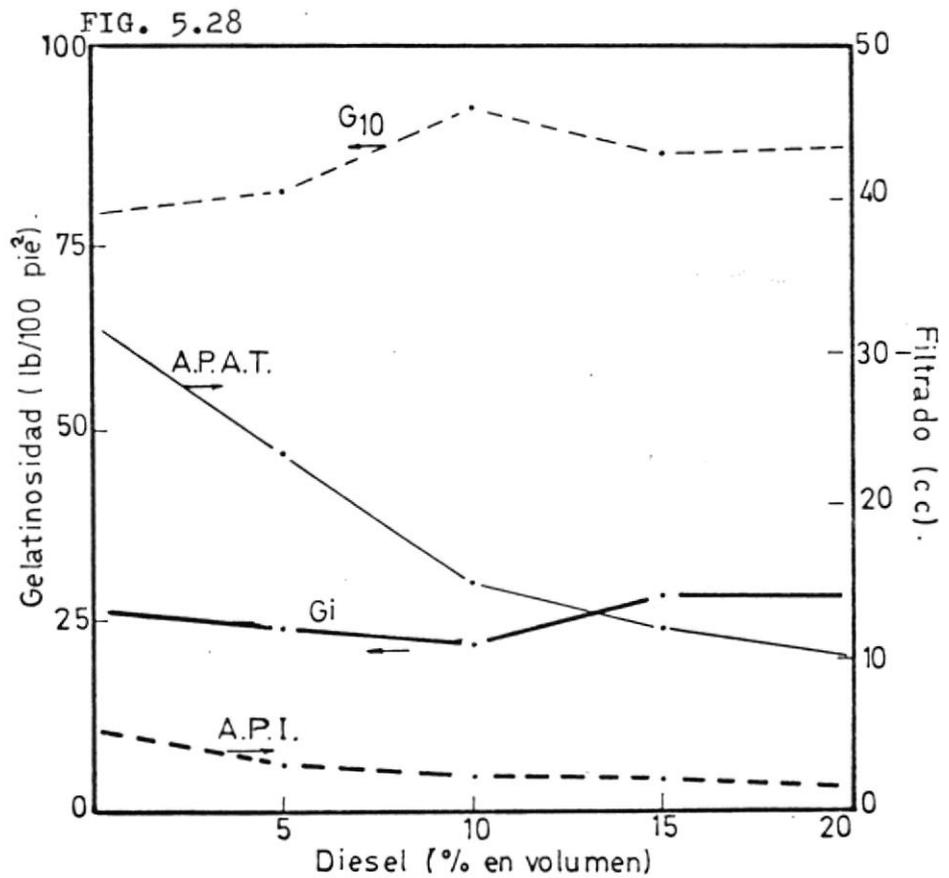


FIG. 5.28

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

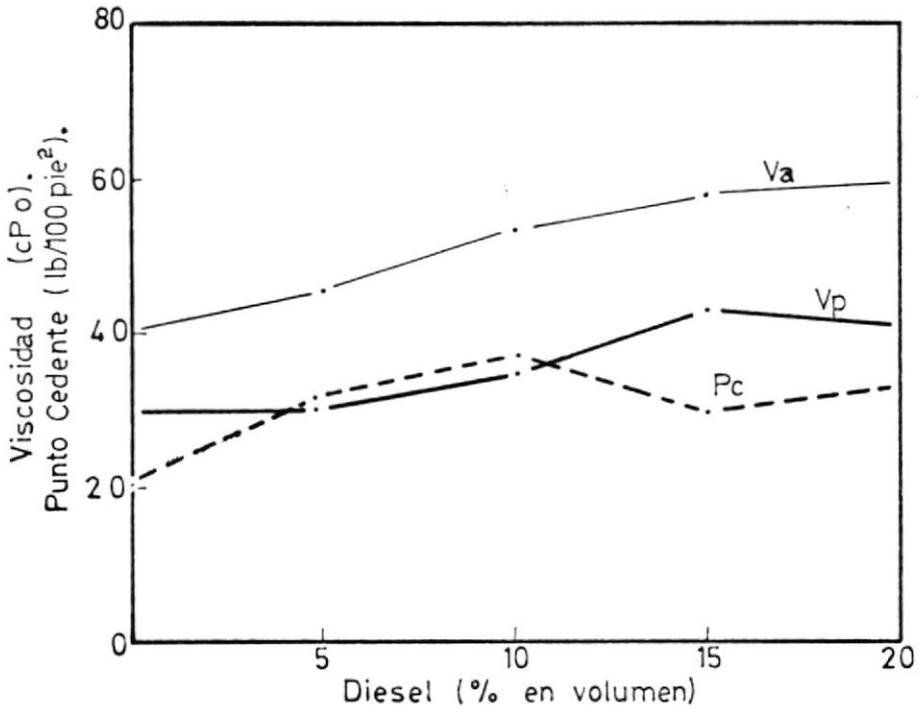


FIG. 5.29

SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO

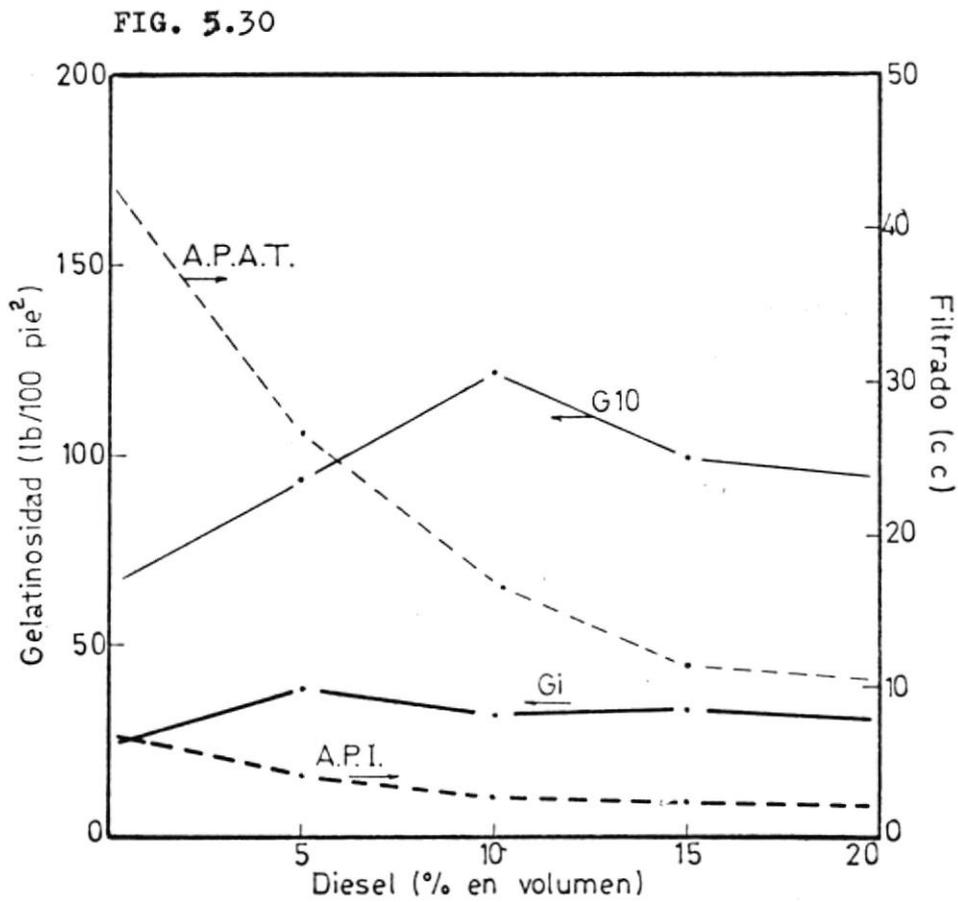


FIG. 5.30

CONTAMINACION CON CLORURO DE SODIO

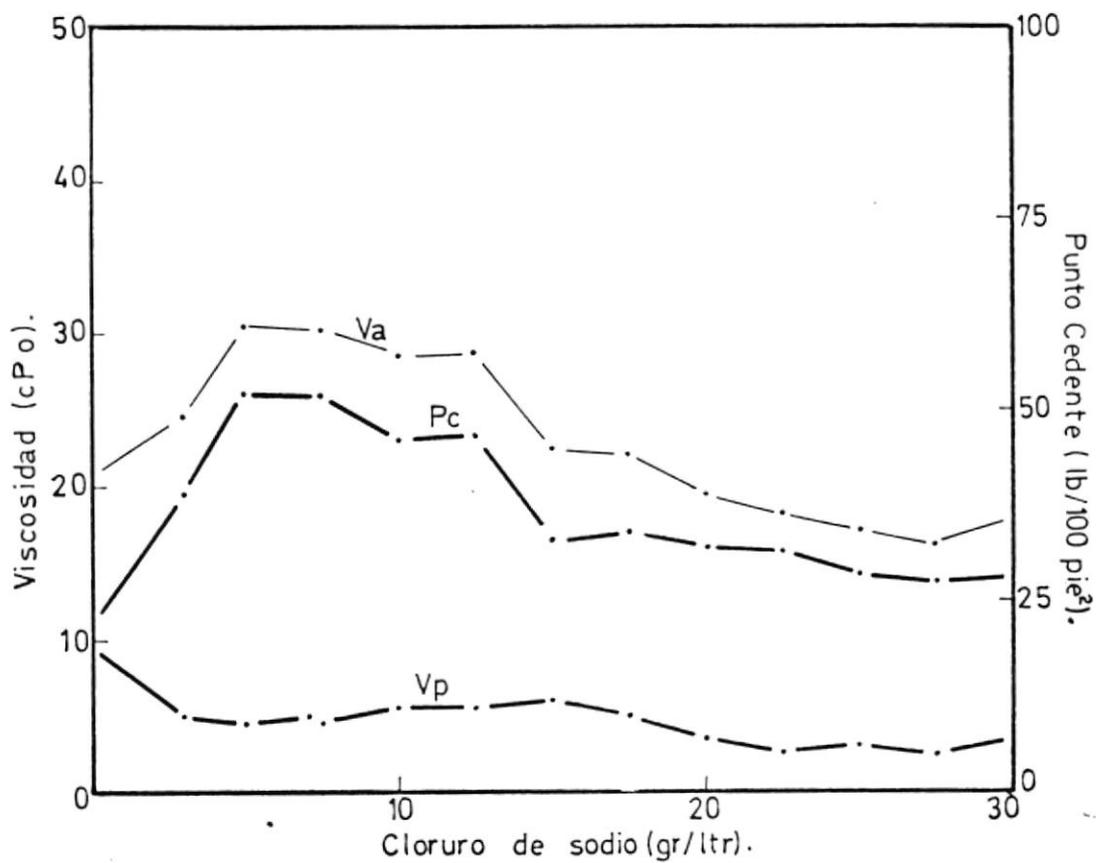
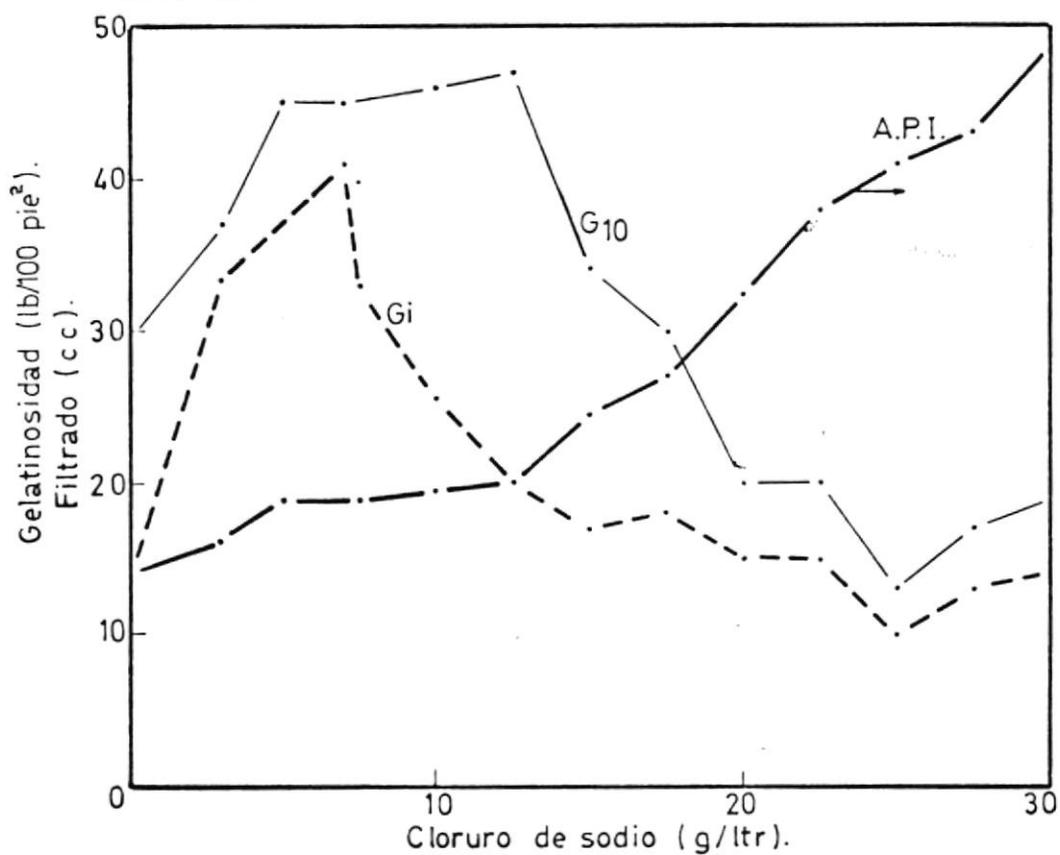


FIG. 6.1

CONTAMINACION CON CLORURO DE SODIO

FIG. 6.2



CONTAMINACION CON HIDROXIDO DE SODIO

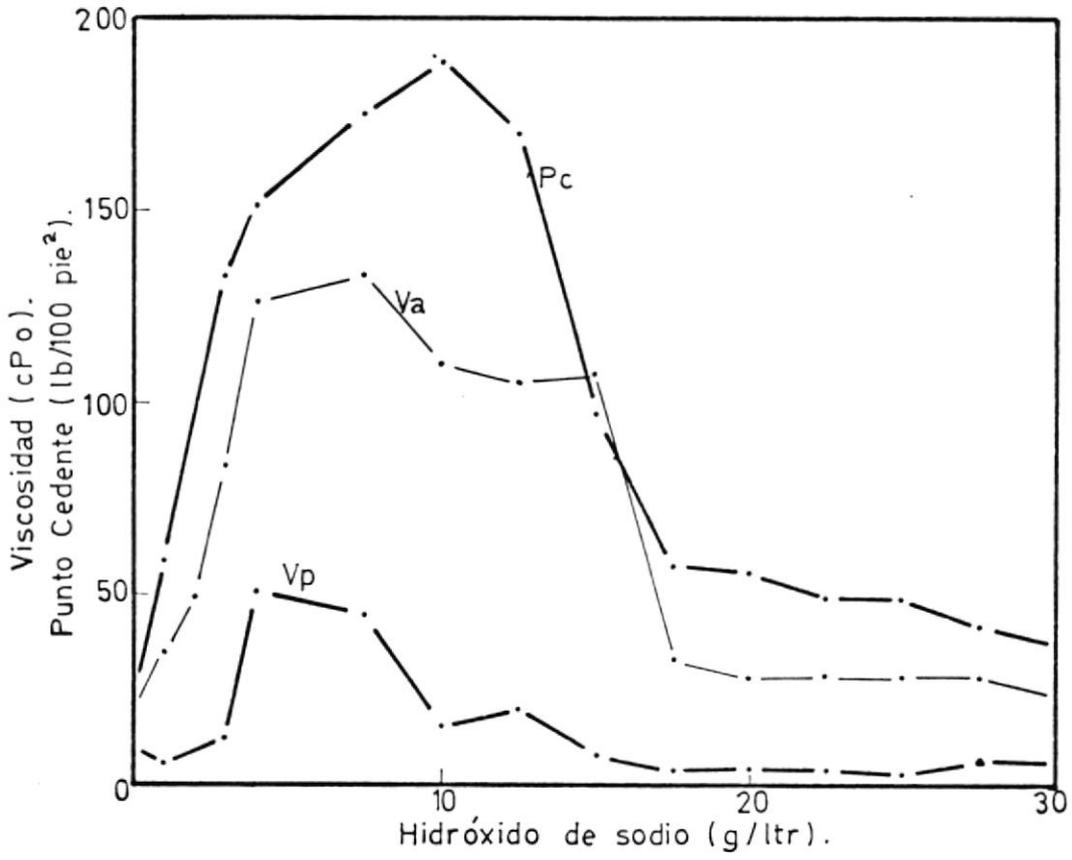
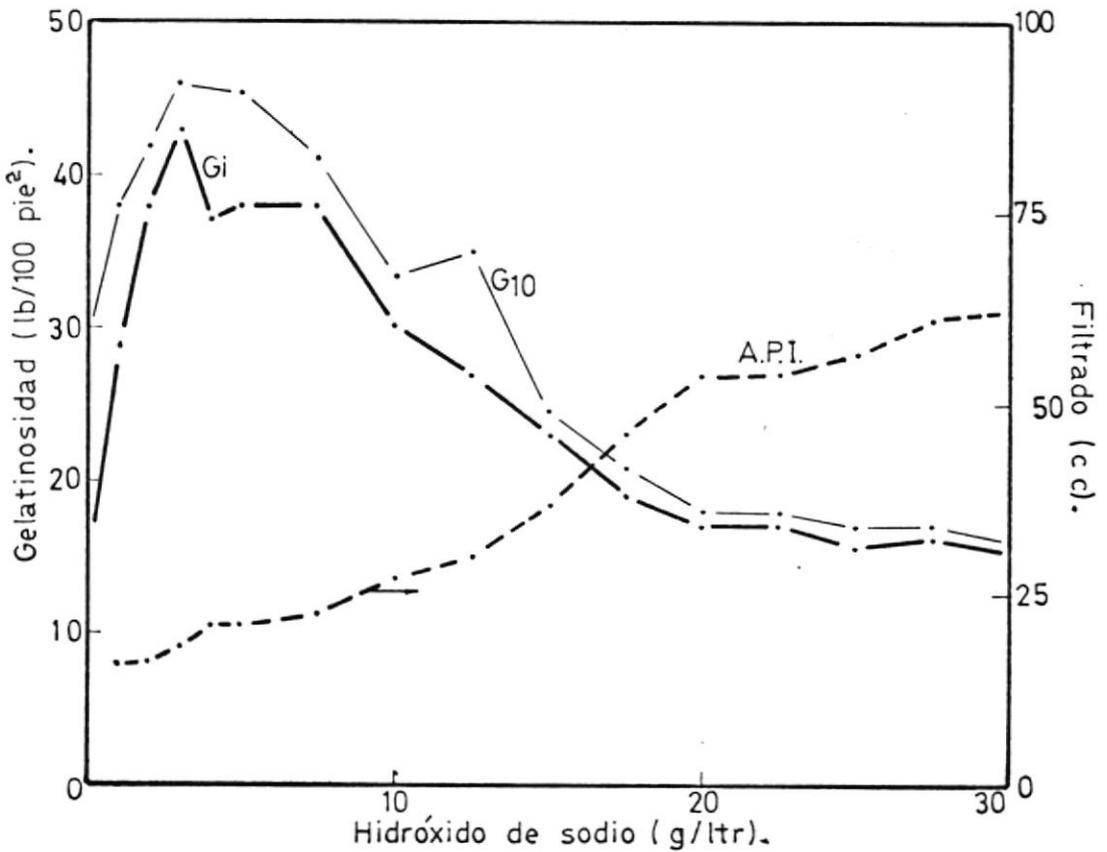


FIG. 6.3

CONTAMINACION CON HIDROXIDO DE SODIO

FIG. 6.4



CONTAMINACION CON SULFATO DE SODIO

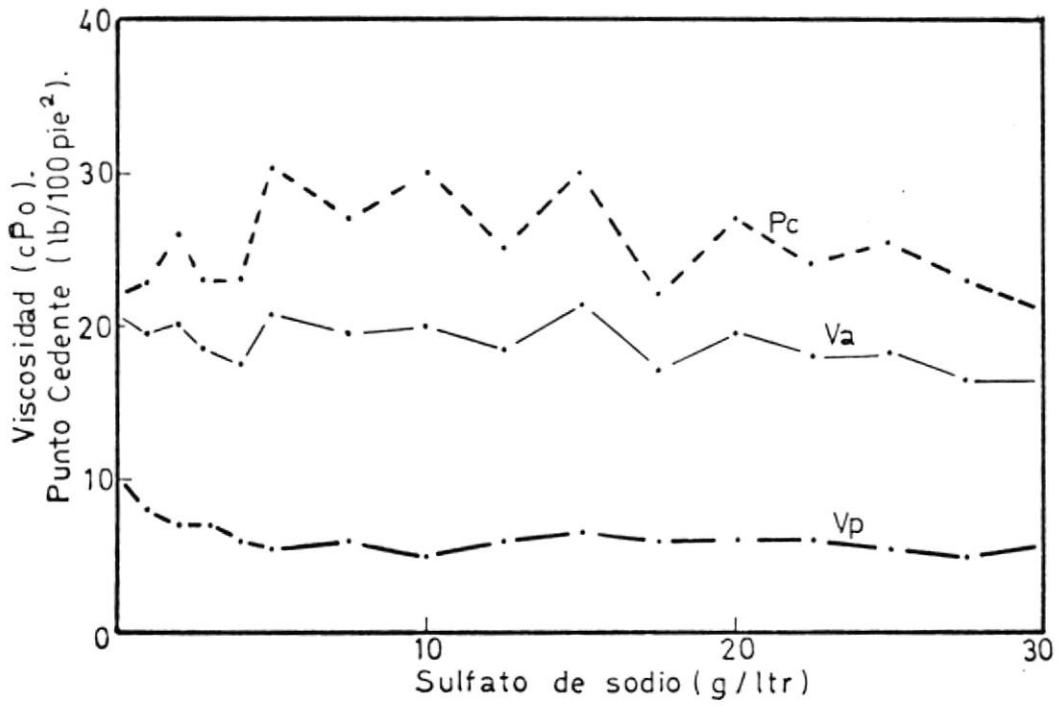


FIG. 6.5

CONTAMINACION CON SULFATO DE SODIO

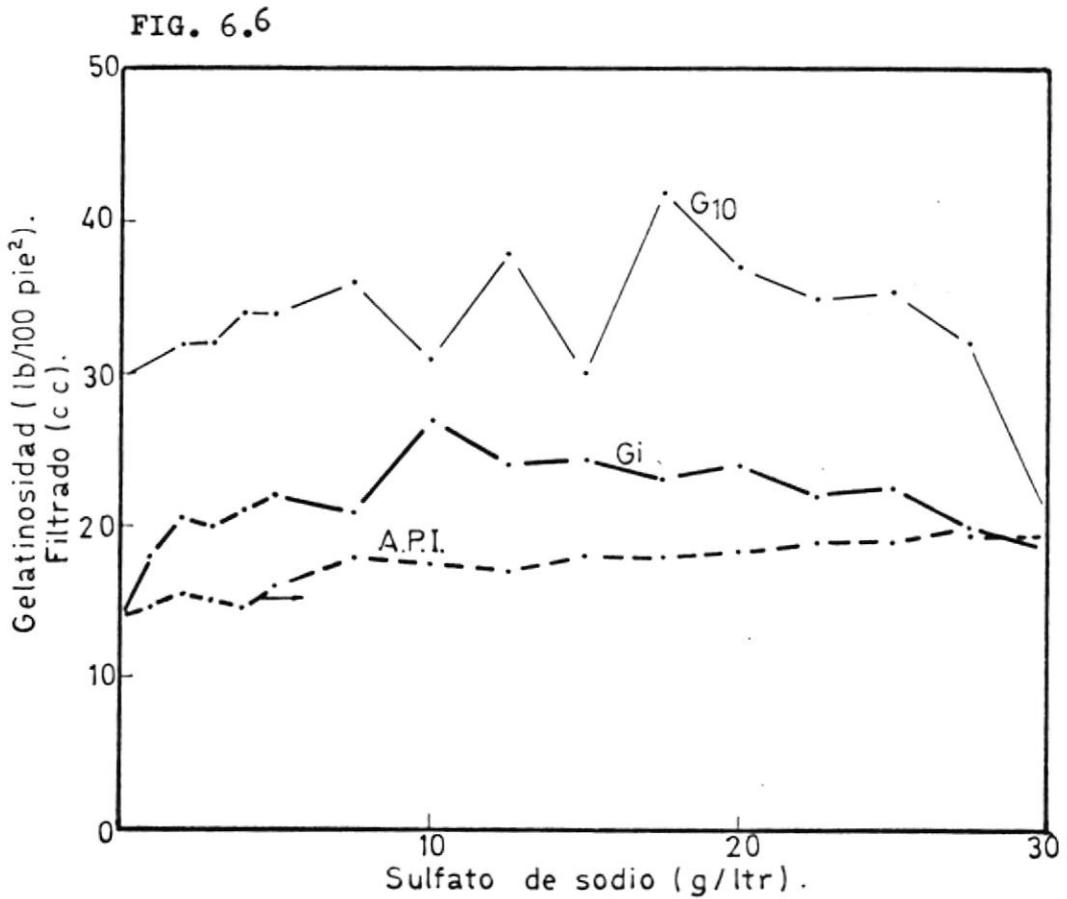


FIG. 6.6

CONTAMINACION CON CARBONATO DE SODIO

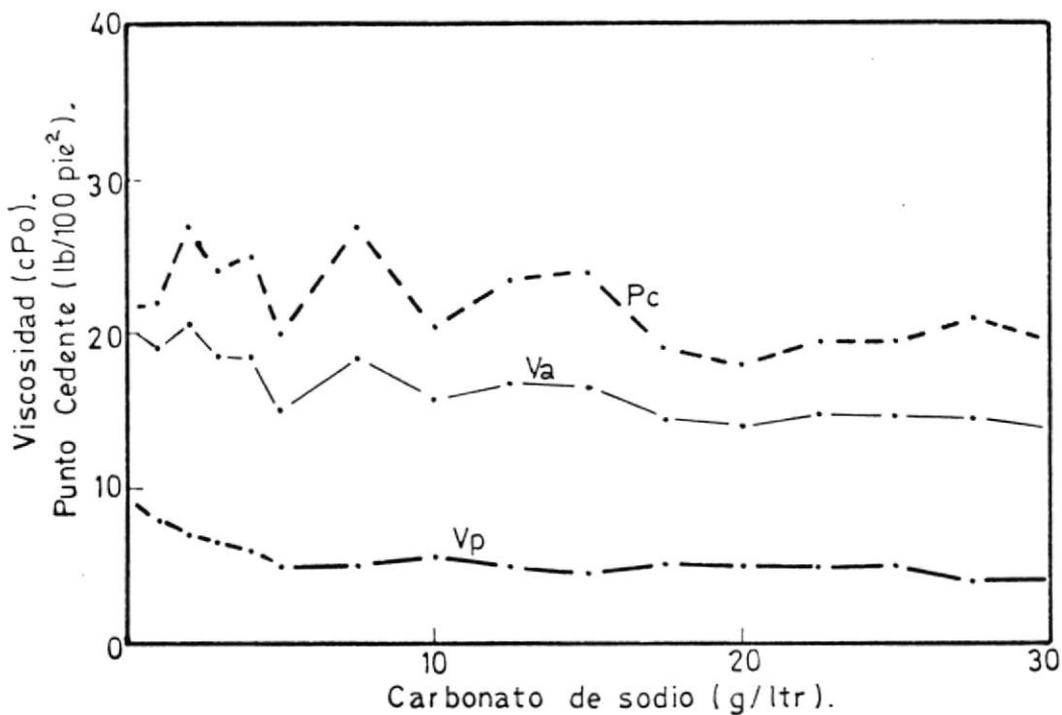


FIG. 6.7

CONTAMINACION CON CARBONATO DE SODIO

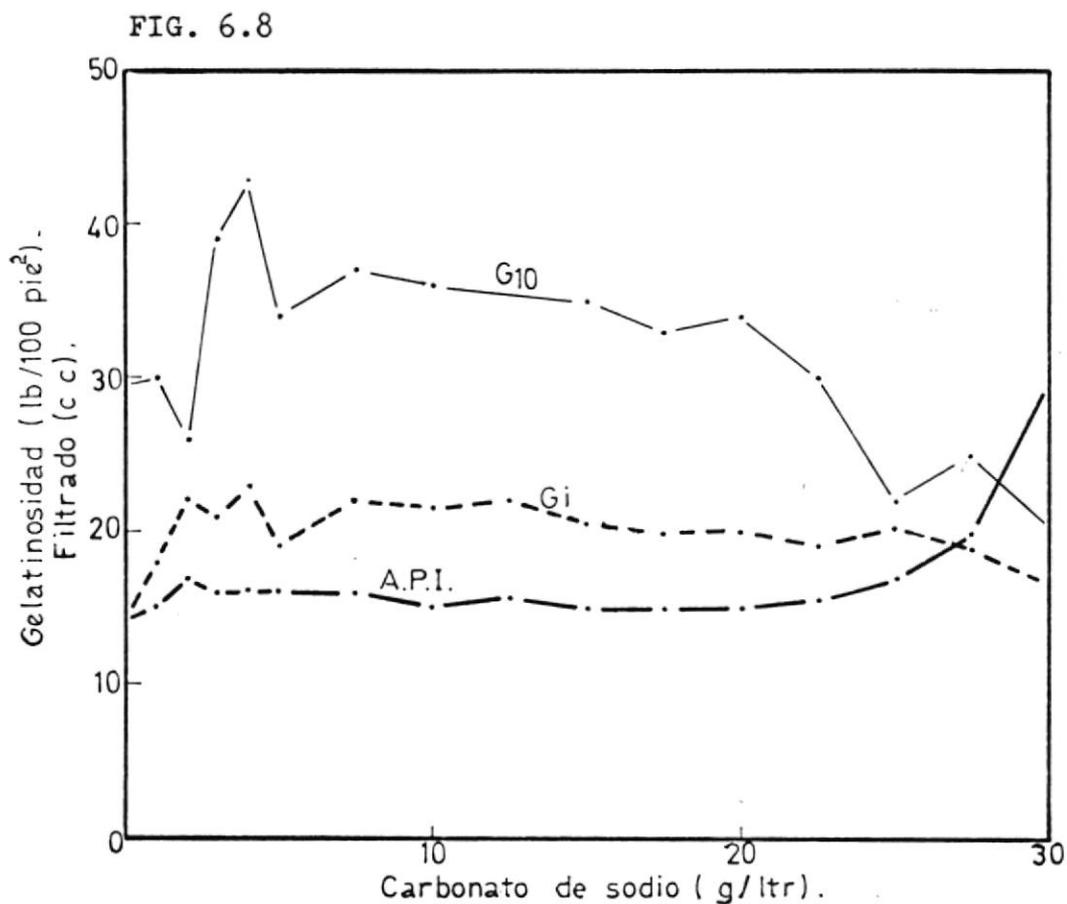


FIG. 6.8

CONTAMINACION CON CLORURO DE CALCIO

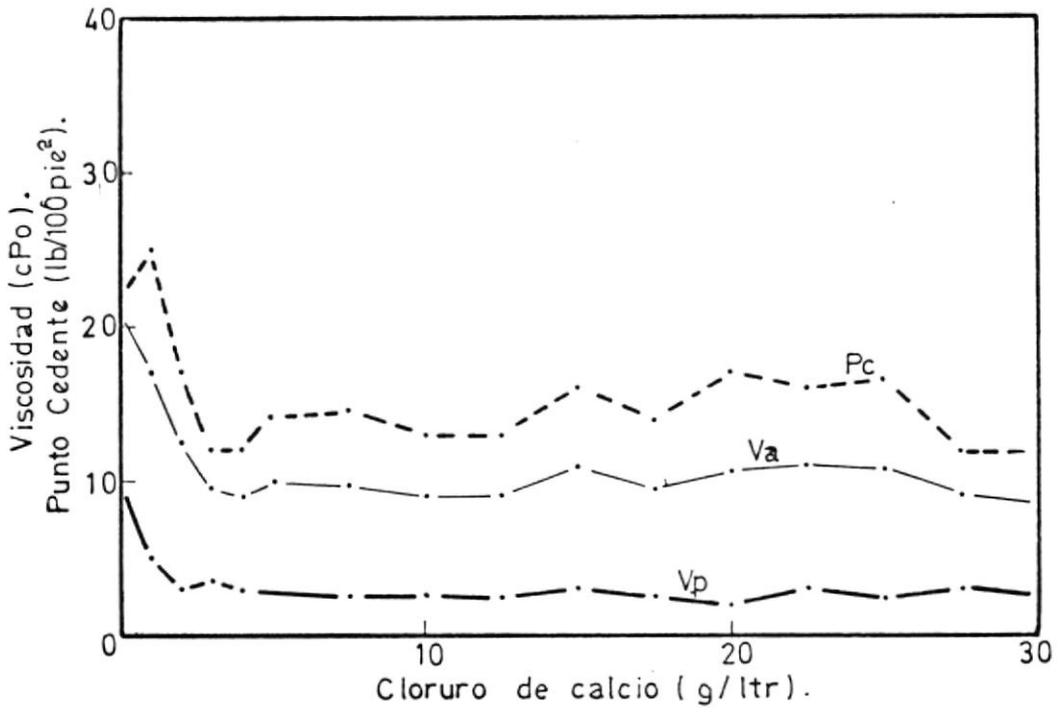
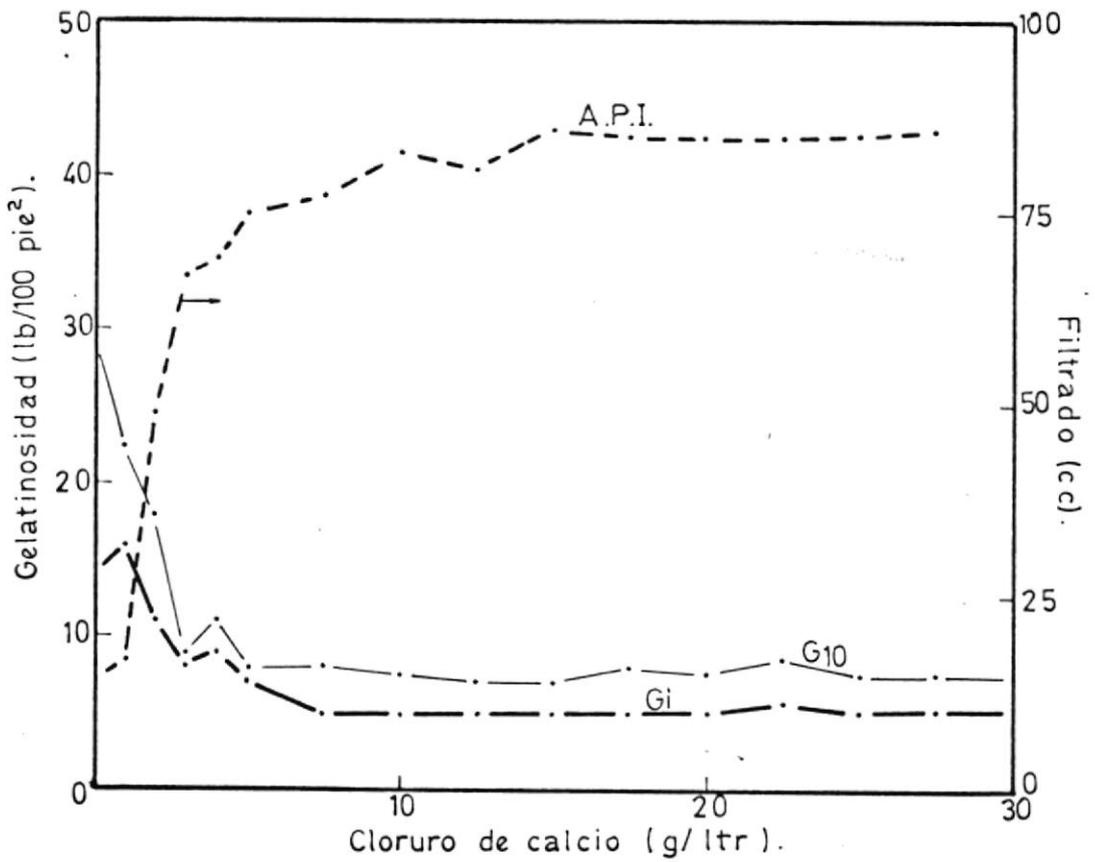


FIG. 6.9

CONTAMINACION CON CLORURO DE CALCIO

FIG. 6.10



CONTAMINACION CON HIDROXIDO DE CALCIO

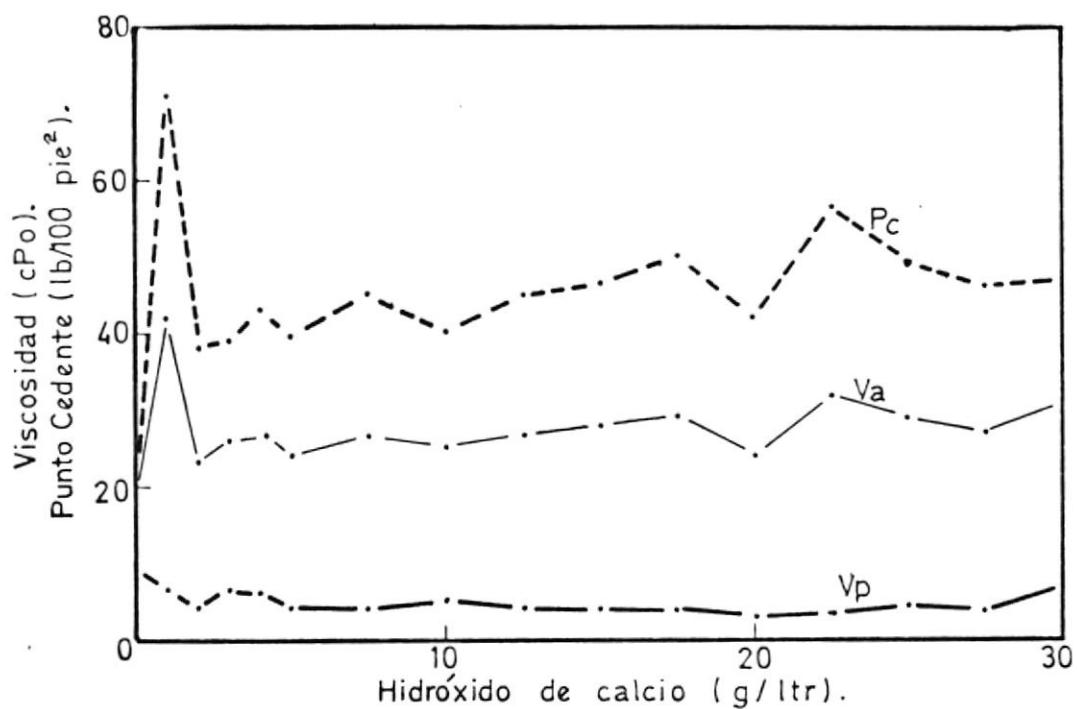


FIG. 6.11

CONTAMINACION CON HIDROXIDO DE CALCIO

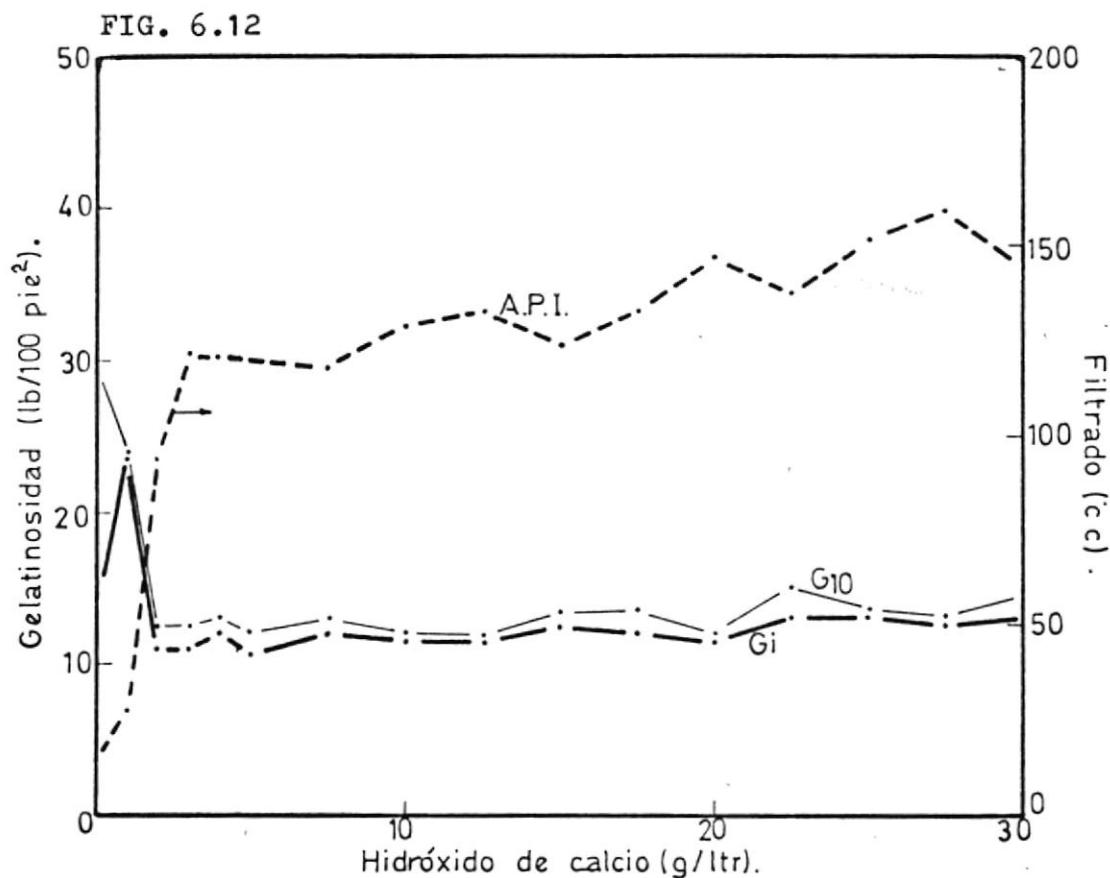


FIG. 6.12

CONTAMINACION CON SULFATO DE CALCIO

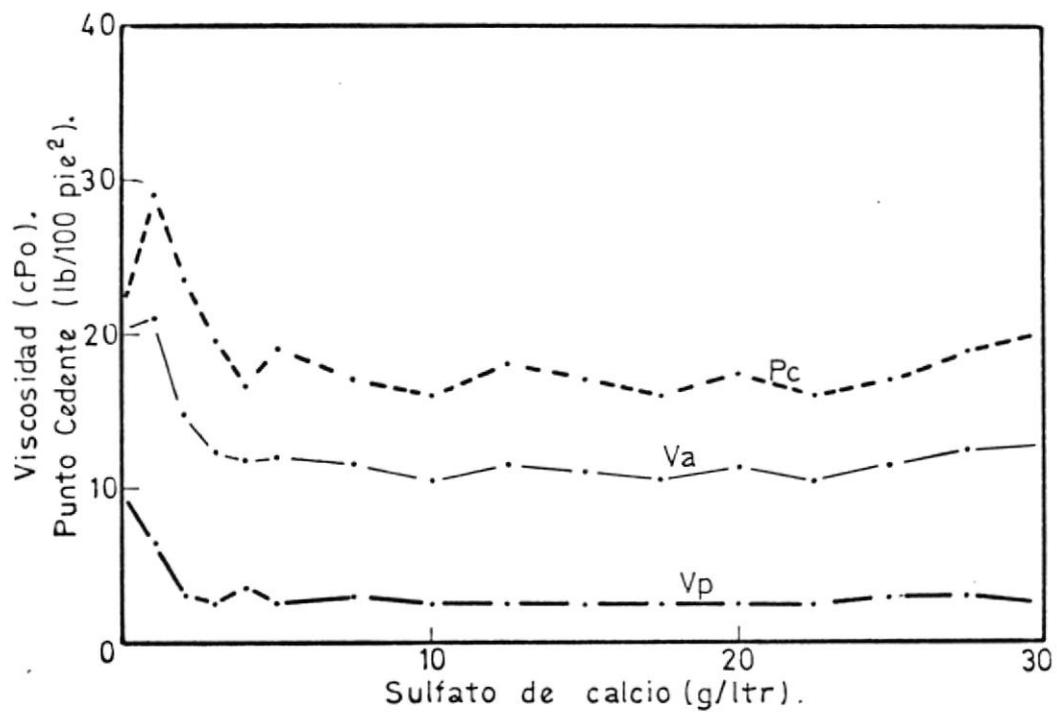
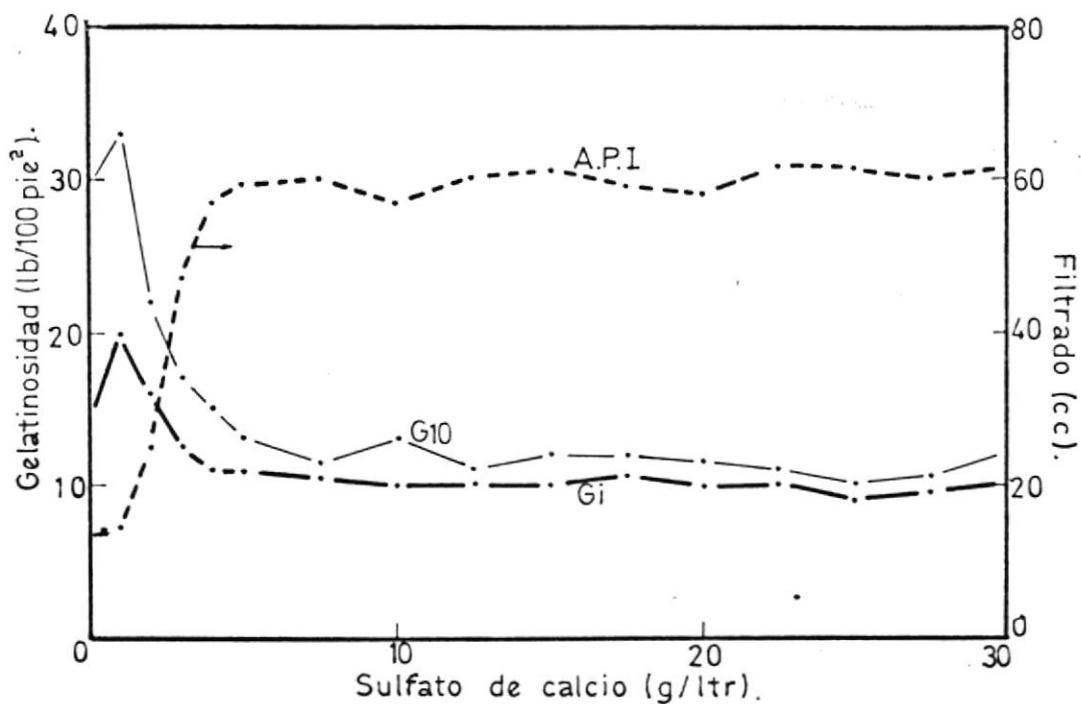


Fig. 6.13

CONTAMINACION CON SULFATO DE CALCIO .

Fig. 6.14



SECCION TABLAS

TABLA 5.1 LODO CALCICO.

CONCENTRACIONES (g/ltr)	ENJARRE (mm)	pH		ALCALINIDAD (cc H ₂ SO ₄ N/50)	
		LODO	FILTRADO	LODO	FILTRADO
SOSA					
0.00	3.1	11.30	10.70	-	0.1
0.09	2.0	11.60	11.40	2.6	0.3
0.21	1.9	11.75	11.60	2.9	0.5
0.42	1.4	12.10	11.80	3.3	1.3
1.02	1.4	12.60	12.20	4.6	3.3
1.20	1.0	12.70	12.00	5.1	3.5
1.95	1.3	13.00	12.80	-	7.4
5.40	1.9	13.35	13.50	29.2	25.0
12.00	3.9	13.80	13.80	60.2	52.0
QUEBRACHO					
0.00	2.8	12.30	13.00	-	5.7
1.00	2.2	12.80	12.70	-	3.0
2.00	1.7	12.45	12.45	6.9	2.1
3.00	1.2	12.40	12.35	6.7	2.2
4.00	1.4	12.45	12.40	5.6	2.0
5.00	1.4	12.40	12.30	5.7	1.8
6.00	1.4	12.20	12.10	4.8	1.6
7.00	1.2	12.50	12.00	6.0	1.7
8.00	1.3	12.30	12.10	5.0	1.5
CEMENTO					
0.00	1.0	12.35	11.90	2.2	1.2
1.00	1.0	12.20	11.80	2.9	1.3
2.00	1.2	12.40	11.90	3.5	1.6
3.00	1.2	-	12.00	3.8	1.6
4.00	1.2	-	12.00	4.5	1.8
5.00	1.2	12.35	12.00	4.3	1.6
6.00	1.2	12.40	12.00	5.6	1.7
7.00	1.2	-	12.00	6.6	1.7
8.00	1.2	12.40	12.10	6.9	1.7
9.00	1.2	-	12.00	7.2	1.6
10.00	1.2	12.40	12.10	8.2	1.6

TABLA 5.2 LODO BASE YESO

CONCENTRACION (g/ltr)	ENJARRE (mm)	pH		ALCALINIDAD (cc H ₂ SO ₄ N/50)	
		LODO	FILTRADO	LODO	FILTRADO
CMC					
0	3.6	10.25	9.75	0.2	0.1
1	3.5	10.00	19.50	0.4	0.1
3	1.2	10.10	9.55	0.4	0.1
4	1.5	10.10	9.60	0.2	0.1
6	1.0	10.20	9.65	0.4	0.1
YESO					
0	0.8	10.00	9.40	0.3	0.0
9	1.0	9.90	9.40	0.3	0.0
11	1.0	10.00	9.50	0.3	0.05
14	1.1	10.30	9.90	0.5	0.0
17	1.2	10.00	9.60	0.4	0.0
20	1.1	10.00	9.50	0.2	0.0
CLS					
0	1.6	10.40	9.75	0.4	0.0
6	1.5	10.10	9.70	0.3	0.0
9	1.7	9.90	9.60	0.4	0.05
11	1.1	9.90	9.60	0.4	0.05
14	1.3	10.10	9.60	0.4	0.1
17	1.1	10.00	9.60	0.4	0.1

TABLA 5.3 LODO EMULSIONADO

DIESEL (% en Volumen)	CONTENIDO DE AGUA. (%)	CONTENIDO DE ACEITE. (%)	CONTENIDO DE SOLIDOS. (%)
0	78	9	22
5	75	5	20
10	70	9	21
15	66	11	23
20	65	11	24

TABLA 5.4 LODO EMULSIONADO.

VOLUMEN DE DIESEL AGREGADO (%)	ENJARRE (mm)	pH		DENSIDAD (g/cc)
		LODO	FILTRADO	
LODO CALCICO EMULSIONADO				
0	0.7	12.8	12.8	1.63
5	0.6	12.8	12.8	1.58
10	0.5	12.8	12.8	1.55
15	0.4	12.8	12.8	1.51
20	0.4	12.8	12.8	1.46
LODO ROJO EMULSIONADO				
0	0.7	12.7	12.7	1.59
5	0.6	12.7	12.7	1.54
10	0.5	12.7	12.7	1.52
15	0.5	12.7	12.7	1.48
20	0.5	12.7	12.7	1.44
SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO .- CASO 1				
0	0.6	9.1	8.9	1.60
5	0.5	8.8	8.6	1.58
10	0.3	8.9	8.4	1.54
15	0.3	8.9	8.5	1.51
20	0.3	9.0	8.5	1.48
SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO .- CASO 2				
0	0.8	9.0	8.9	1.60
5	0.5	8.6	8.8	1.58
10	0.4	8.9	8.8	1.54
15	0.4	8.7	8.8	1.51
20	0.3	8.8	8.7	1.48
SISTEMA CL-CLS EMULSIONADO .- CASO 3				
0	0.9	9.2	8.6	1.60
5	0.6	8.8	8.8	1.58
10	0.5	9.0	8.6	1.54
15	0.4	8.9	8.5	1.51
20	0.4	9.0	9.0	1.48

TABLA 5.5 LODO DE EMULSION INVERSA.

RELACION ACEITE/AGUA	60/40 *A	60/40 *D	70/30 *A	70/30 *D	80/20 *A	80/20 *D
DENSIDAD (g/cc)	1.50	1.50	1.50	1.50	2.20	2.20
VISCOSIDAD PLASTICA (cPo)		25.0	31.5	32.5	63.0	72.0
PUNTO CEDENTE (lb/100 pie ²)		112.0	7.5	14.5	31.0	31.0
VISCOSIDAD APARENTE (cPo)		81.0	35.3	39.3	78.5	87.5
GEL INICIAL (lb/100 pie ²)		25.0	7.0	8.0	17.0	16.0
GEL A 10 MINUTOS		30.0	15.0	15.0	33.0	28.0
FILTRADO A.P.I. (cc)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
FILTRADO A.P.A.T. (cc)	13.4	13.6	10.0	7.4	7.0	6.4

*A antes de rolar por 18 horas a 60 C.

*D después de rolar por 18 horas a 60 C.

TABLA 6.1 ADICION DE CLORURO DE SODIO.

Cloruro de Sodio (g/ltr).	pH		Cl ⁻ en el FILTRADO (ppm)
	LODO	FILTRADO	
0.0	9.25	9.00	700
3.0	9.00	9.05	2250
5.0	9.10	9.00	3650
7.5	9.00	8.95	5150
10.0	8.95	8.90	6600
12.5	8.75	8.85	7900
15.0	8.80	8.90	9400
17.5	8.80	8.70	11250
20.0	8.72	8.70	12850
22.5	8.78	8.80	138000
25.0	8.75	8.75	15300
27.5	8.70	8.75	17600
30.0	8.70	8.65	19600

TABLA 6.2 ADICION DE HIDROXIDO DE SODIO

Hidróxido de Sodio (g/ltr)	pH		ALCALINIDAD (cc H ₂ SO ₄ N/50)
	LODO	FILTRADO	
0.0	9.25	9.00	0.0
1.0	11.70	11.70	0.7
2.0	12.10	12.00	1.8
3.0	12.20	12.20	2.8
4.0	12.25	12.25	4.0
5.0	12.25	12.25	5.5
7.5	12.15	12.25	7.5
10.0	12.30	12.30	10.6
12.5	12.35	12.30	14.3
15.0	12.30	12.35	15.8
17.5	12.30	12.35	18.8
20.0	12.30	12.30	21.1
22.5	12.30	12.35	24.4
25.0	12.35	12.35	27.8
27.5	12.30	12.30	29.0
30.0	12.30	12.30	32.0

TABLA 6.3 ADICION DE SULFATO DE SODIO.

Sulfato de Sodio (g/ltr)	pH		ALCALINIDAD (cc H ₂ SO ₄ N/50)
	LODO	FILTRADO	
0.0	9.25	9.00	0.0
1.0	9.45	9.10	0.2
2.0	9.35	9.00	0.6
3.0	9.30	8.80	0.9
4.0	9.35	8.75	1.3
5.0	9.35	8.70	1.7
7.5	9.40	8.80	2.6
10.0	9.35	9.00	3.4
12.5	9.40	8.90	4.4
15.0	9.40	8.85	5.3
17.5	9.40	8.80	6.2
20.0	9.40	8.80	7.1
22.5	9.40	8.90	8.0
25.0	9.45	8.90	9.0
27.5	9.45	8.90	9.8
30.0	9.50	8.70	11.5

TABLA 6.4 ADICION DE CARBONATO DE SODIO.

Carbonato de Sodio (g/ltr)	pH		ALCALINIDAD (cc H ₂ SO ₄ N/50)
	LODO	FILTRADO	
0.0	9.25	9.00	0.0
1.0	10.20	10.25	0.2
2.0	10.50	10.50	0.55
3.0	10.65	10.60	0.90
4.0	10.70	10.70	1.35
5.0	10.80	10.80	1.70
7.5	10.80	10.85	2.60
10.0	10.80	10.80	3.45
12.5	10.90	10.90	4.40
15.0	10.85	10.90	5.30
17.5	10.90	10.90	6.20
20.0	10.95	10.95	7.10
22.5	10.90	10.90	8.00
25.0	10.90	10.95	9.05
27.5	11.00	11.00	9.80
30.0	11.05	11.00	11.55

TABLA 6.5 ADICION DE CLORURO DE CALCIO

Cloruro de Calcio (g/ltr)	pH		Cl ⁻ en el FILTRADO (ppm)
	LODO	FILTRADO	
0.0	9.25	9.00	0
1.0	8.10	8.10	1100
2.0	7.60	8.00	1700
3.0	7.60	8.00	2100
4.0	7.40	7.70	2700
5.0	7.50	7.70	4600
7.5	7.65	7.65	5300
10.0	7.65	7.50	5900
12.5	7.50	7.55	7100
15.0	7.40	7.30	8300
17.5	7.50	7.10	9800
20.0	7.30	7.35	11700
22.5	7.35	7.10	13100
25.0	7.40	7.35	14400
27.5	7.40	7.45	15800
30.0	7.35	7.15	17200

TABLA 6.6 ADICION DE HIDROXIDO DE CALCIO.

Hidróxido de Calcio (g/ltr)	pH		ALCALINIDAD (cc H ₂ SO ₄ N/50)
	LODO	FILTRADO	
0.0	9.25	9.00	0.0
1.0	11.75	11.80	0.6
2.0	12.10	12.25	1.3
3.0	12.20	12.30	2.1
4.0	12.35	12.40	1.9
5.0	12.40	12.40	1.8
7.5	12.40	12.40	1.8
10.0	12.40	12.35	1.8
12.5	12.45	12.40	1.9
15.0	12.45	12.50	1.9
17.5	12.45	12.50	2.0
20.0	12.50	12.45	2.2
22.5	12.50	12.50	2.0
25.0	12.50	12.50	2.1
27.5	12.50	12.50	2.3
30.0	12.50	12.50	2.2

TABLA 6.7 ADICION DE SULFATO DE CALCIO.

Sulfato de Calcio (g/ltr)	pH	
	LODO	FILTRADO
0.0	9.25	9.00
1.0	9.15	9.00
2.0	8.75	8.65
3.0	8.50	8.55
4.0	8.50	8.45
5.0	8.50	8.55
7.5	8.50	8.50
10.0	8.55	8.55
12.5	8.55	8.60
15.0	8.50	8.60
17.5	8.50	8.70
20.0	8.50	8.55
22.5	8.50	8.50
25.0	8.50	8.50
27.5	8.50	8.55
30.0	8.50	8.50

BIBLIOGRAFIA

1. The History of Drilling Mud, Sec. 100. "Drilling Mud Data Book". Baroid Division, National Lead. Houston-Texas, 1954.
2. Functions and Properties of Drilling Mud, Sec. 200. Drilling Mud Data Book". Baroid Division, National Lead Co. Houston - Texas, 1953.
3. Types of Drilling Mud, Sec. 300. "Drilling Mud Data - Book". Baroid Division, National Lead Co. Houston - Texas, 1961.
4. Chemical Treatment of Drilling Mud, Sec. 600. "Drilling Mud Data Book". Baroid Division, National Lead Co.
5. Apparatus and Procedure for the Field Testing of Drilling Muds, Sec. 900. "Drilling Mud Data Book". Baroid Division, National Lead Co.
6. "Mud Technology Handbook". Baroid Division, National - Lead Company, Houston - Texas, 1961.
7. "Principles of Drilling Mud Control", tenth Edition. - Petroleum Extension Service, University of Texas - Division of Extension.
8. "Recommended practice standard Field Procedure for Testing Drilling Fluids", API RP 29, Fourth Edition, May 1957. American Petroleum Institute, Division of Production. Dallas, Texas.

9. "Mud Engineering" Traducido por el Ing. Eduardo Rosas Navarro. Sección Química - Perforación - Poza Rica de Hgo., Ver. Mexico, 1964.
10. "Fundamentos de Perforación", Tomo 1, Cap. V. Petroleum Extension Service, La Universidad de Texas - Division de Extension. Austin - Texas.
11. "Manual de Perforación". Instituto Mexicano del Petróleo. Mexico, 1971.
12. "Normas SP-SQ-1", Petróleos Mexicanos. Mexico D.F. Secciones: 2, 4A, 5, 7, 8, 12, 13A, 16A, 27, 28, 29.
13. "Norma de calidad de Bentonitas Sódicas para Fluidos de Perforación y Terminación de Pozos Petrolíferos", - IMP - DPF - 2/67. Instituto Mexicano del Petróleo. Mexico D.F. Pgs. 8, 9, 10, 11, 12.
14. "Norma de calidad para Detergentes Empleados en Fluidos de Perforación, Terminación y Reparación de Pozos Petrolíferos", IMP DPF - 7/68. Instituto Mexicano del Petróleo. Mexico D.F. Pgs. 11, 12, 13, 17, 18, 19, 20.
15. "Norma de calidad para Almidones Pregelatinizados Extraídos de la fécula de maíz empleados en Fluidos de Perforación", IMP - DPF - 10/68. Instituto Mexicano del Petróleo. Mexico D.F. Pgs. 7, 8, 11, 12.

16. "Norma de calidad de obturantes granulares, para Fluídos de Perforación, Terminación y Reparación de Pozos Petrolíferos". IMP - DPF- 11/68. Pgs. 9, 10.
17. Rolando A. López. "Guía para las prácticas sobre Lodos de Perforación", Tercer año. Universidad del Zulia. - Maracaibo - Edo. Zulia, 1964.
18. W.F. Rogers. "Composition and Properties of Oil Well - Drilling Fluids", 3rd. edition. The Gulf Publishing - Co. Houston - Texas, 1963.
19. C. Gatlin. "Petroleum Engineering - Drilling and Well Completions". Chapter 6. Prentice - Hall, Inc. 1960.
20. Víctor L. Streeter "Mecánica de los Fluídos", Cuarta Edición, capítulo 1. Ediciones del Castillo, S.A. Madrid, 1968.
21. B.C. Craft - W.R. Holden - E.D. Graves, Jr. "Well Design: Drilling and Production". Prentice Hall, Inc. New Jersey 1962. Pgs. 16, 17, 31,32, 33.
22. F. Daniels - R.A. Alberty. "Fisico Química". Traducción de la 2a. edición en Inglés. Compañía Editorial Continental, S.A., Mexico, 1963. Pgs. 671, 672, 673, 674, 676, 677, 678.
23. J.A. Babor - J. Ibarz. "Química general moderna", 7a. Edición. Editorial Marin, S.A. Pgs. 70, 71, 72, 73.

24. L. Ch. Uren. "Ingeniería de Producción de Petróleo - Desarrollo de los Campos Petroleros", Traducción de - la 4a. Edición en Inglés. Cap. 8. Compañía Editorial Continental, S.A., Mexico 1964.
25. "Cantidades sugeridas de Reactivos para preparar un Metro cubico de Lodo Drilex". Dril de Mexico, S.A.
26. T.C. Davenport. "Viscosity in the Petroleum Industry" Physics Education, 1968. Vol. 3.
27. P. E. Chaney, W.F. Oxford, F. Chisholm "The Chemical Treatment of Drilling Fluids". World Oil, Jan - Feb. (1954).
28. "Usa Espuma en vez de Lodo".Petróleo y Petroquímica Internacional. Octubre de 1973.