



45
24

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**ELEMENTOS BASICOS PARA LA EVALUACION Y
CONTROL DE PROPIEDADES REOLOGICO-TIXOTROPICAS
EN FLUIDOS DE PERFORACION**

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A N:

**JOSE MIGUEL ROMERO MUÑOZ
HERMINIO JAIME TORRES GONZALEZ**

**DIRECTOR DE TESIS,
QUIM. ROSA DE JESUS HERNANDEZ ALVAREZ**

MEXICO, D. F.

1990

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

INTRODUCCION

Capitulo I

" GENERALIDADES" -----	4
------------------------	---

Capitulo II

" PARAMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO

REOLOGICO - TIXOTROPICO " -----	14
Viscosidad aparente -----	14
Viscosidad plástica -----	15
Punto cedente -----	15
Gelatinosidad -----	17

Capitulo III

"EVALUACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICO- TIXOTROPICAS MEDIANTE EL USO DE LOS

VISCOSIMETROS STORMER Y FANN-35" -----	21
Viscosímetro Stormer -----	27
- Calibración del instrumento -----	28
- Obtención de la viscosidad aparente -----	28
Viscosímetro Fann-35 -----	31
- Rango de operación -----	31
- Desarrollo matemático -----	35
- Calibración del instrumento -----	41
- Obtención de las propiedades reológico- tixotrópicas -----	48

Capitulo IV

"FACTORES QUE FAVORECEN O ALTERAN EL COMPORTAMIENTO

REOLOGICO-TIXOTROPICO Y MEDIOS DE CONTROL -----	51
Factores físicos que alteran el comportamiento	
reológico-tixotrópico -----	52
- Presión y temperatura -----	52
- Sólidos inherentes al fluido y procedentes de la formación -----	53
Medios físicos para su control -----	54
Medios fisicoquímicos para su control -----	56
Factores fisicoquímicos que alteran el comportamiento	
reológico-tixotrópico -----	58
- Contaminación por sales -----	58
- Contaminación por cemento -----	60
- Contaminación por gases -----	61
- Contaminación bacteriana -----	64
Medios para el desarrollo y control de propiedades	
reológico-tixotrópicas -----	66
- Agentes viscosificantes y gelantes -----	67
- Agentes floculantes -----	71
- Agentes reductores de viscosidad -----	71
- Agentes Defloculantes -----	77
- Agentes humectantes -----	77
- Agentes mojantes -----	78
- Agentes emulsificantes -----	78
- Agentes lubricantes -----	78
- Agentes desespumantes -----	79

Capitulo V

"CONCLUSIONES" ----- 80

BIBLIOGRAFIA ----- 83

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

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

Una de las funciones principales de los sistemas hidráulicos empleados en la perforación de la corteza terrestre consiste en mantener la limpieza del agujero a través de la remoción, transporte y acarreo de los sólidos procedentes de la formación a la superficie, para lo cual sus propiedades reológico-tixotrópicas deberán desarrollarse y controlarse con la finalidad de que se realicen con éxito las operaciones referentes a la perforación.

Motivo por el cual, éste trabajo tiene como objetivo introducir al alumno de Ingeniería Petrolera en el conocimiento y evaluación de éstos parámetros.

C A P I T U L O I

G E N E R A L I D A D E S

GENERALIDADES

Un fluido en general es una sustancia líquida ó gaseosa que se deforma continuamente cuando se le sujeta a un esfuerzo cortante. La deformación al efecto cortante se ha venido estudiando a través de la reología la cual ha establecido dos tipos de deformaciones, la REVERSIBLE ó ELASTICA y la IRREVERSIBLE.

Para el caso elástico ó reversible la deformación corresponde a una energía mecánica recuperable, es decir, el trabajo empleado en deformar un cuerpo perfectamente elástico es recuperado junto con su estado original. En la deformación irreversible llamada flujo, la energía mecánica se transforma en calor, es decir, el trabajo empleado en mantener el flujo es disipado como calor por lo que no es mecánicamente recuperable.

Dependiendo de la respuesta a la acción deformante corte y esfuerzo, los fluidos se clasifican en Newtonianos y No-Newtonianos.

Se les llama fluidos newtonianos a aquellos que en su comportamiento de flujo siguen la ley de resistencia de viscosidad de Newton, la cual establece que a cualquier presión y temperatura el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte, la constante de proporcionalidad denominada viscosidad absoluta de los fluidos Newtonianos en flujo laminar se ilustra en la figura (I . 1) .

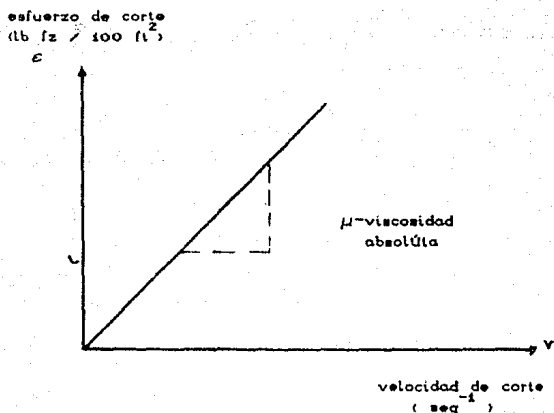


figura (I . 1)

La fuerza aplicada por unidad de área (F/A) es proporcional a la variación de la velocidad con respecto a la distancia (dv / dy) :

$$F/A = \mu \cdot dv/dy \dots\dots (1. 1)$$

Donde :

μ = viscosidad absoluta (cte. de proporcionalidad)

F/A = esfuerzo de corte (ϵ)

dv/dy = velocidad de corte (v)

Por lo tanto :

$$\epsilon = \mu \cdot v \dots\dots (1. 2)$$

En la figura (I. 2) se observa el comportamiento de la viscosidad para diferentes tipos de sustancias.

Los fluidos No-Newtonianos son todos aquellos que no muestran una relación directa sobre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, es decir son fluidos que no se comportan de acuerdo con la ley de la viscosidad de Newton, su clasificación está en función del tiempo, como es el caso de los fluidos Tixotrópicos y Reopécticos. Dentro de los fluidos de tiempo independiente se encuentran los Pseudoplásticos, Dilatantes, y Plásticos de Bingham.

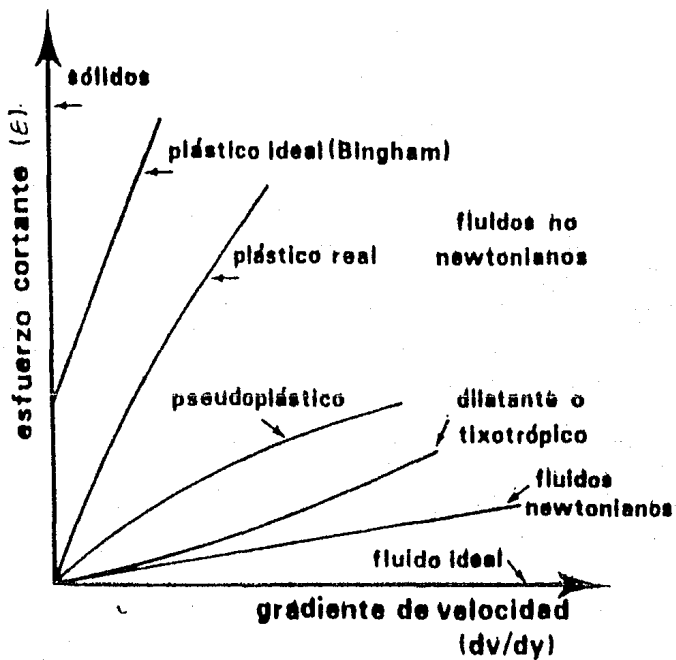


figura (1.2)

La mayor parte de los fluidos de perforación se comportan como fluidos No-Newtonianos con características definidas por los fluidos plásticos de Bingham, siendo necesario un valor finito del esfuerzo de corte para iniciar su movimiento, a éste valor se la denomina PUNTO DE CEDENCIA, el cual es propiciado en el caso de los materiales arcillosos hidratables por el desplazamiento infinito de planos paralelos, que se sobrepone formando paquetes similares al de las cartas.

Estos fluidos muestran una relación lineal entre el esfuerzo de corte representado por una línea recta que no pasa por el origen, por lo tanto, interseca el eje de los esfuerzos. La inclinación ó pendiente de la línea que parte del valor del punto de cedencia se la llama VISCOSIDAD PLÁSTICA, ver figura (I. 3) .

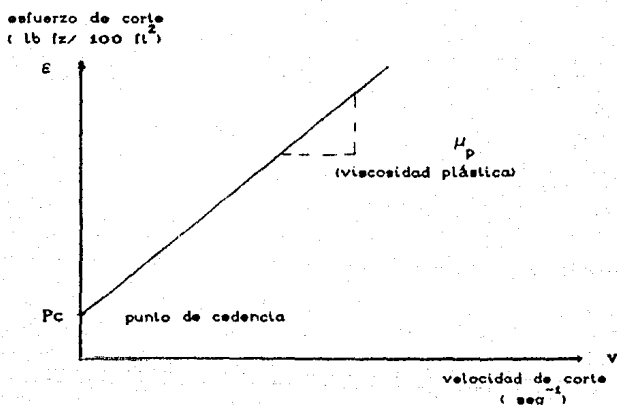


figura (I. 3)

Para que los fluidos realicen las funciones requeridas en las operaciones de perforación existen diferentes componentes que además de darles propiedades físicas y químicas definen también su clasificación :

FLUIDOS BASE AGUA .

Son aquellos que tienen como fase continua el agua, y como fase dispersa arcillas hidratables y no hidratables ó productos químicos naturales y/o sintéticos. Dentro de éstos fluidos se encuentran los fluidos base agua dulce utilizados para iniciar la perforación de formaciones de tierra, grava suelta y arena; los fluidos base agua salada son utilizados para perforar formaciones propensas a la hidratación de las arcillas y en zonas con estratos de sal ó domos salinos.

FLUIDOS BASE ACELITE .

Son el resultado de la mezcla de dos fases no miscibles, aceite , agua y un agente emulsificante que tiene la propiedad de cambiar la tensión de las interfases haciendolas miscibles. Estos sistemas son usados en pozos profundos con altas temperaturas, en formaciones con flujo de agua y gas. Se pueden distinguir dos tipos de fluidos base aceite, los lodos de emulsión directa y lodos de emulsión inversa.

FLUIDOS NEUMATICOS .

Se integran a base de aire, niebla, espuma y gas. La dispersión de gases inertes en medios acuosos da origen a espumas y nieblas, cuya estabilidad depende del empleo de agentes tensoactivos. Estos sistemas se emplean generalmente en pozos con bajas presiones y formaciones estables ,con la ventaja de obtener altas velocidades de penetración durante la perforación, ver la siguiente tabla .

CLASIFICACION DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION		
BASE AGUA	BASE ACEITE	NEUMATICOS
Lodos iniciales	Lodos de emulsion directa	Aire seco
Lodos bentoníticos		Niebla
Lodos tratados con fosfato		
Lodos gel-químicos	Espuma	
Lodos tratados con lignitos y lignosulfonatos		
Lodos cálcicos : - con adición de cal - con adición de yeso		Lodos de emulsion inversa
Lodos de polímeros de bajo contenido de sólidos no dispersos		
Lodos salados : - de baja salinidad - salados saturados - salados de aplicación especial	Lodos aereados	

La TIXOTROPIA es la propiedad de los fluidos de perforación que al permanecer en reposo permiten que sus partículas cargadas positiva y negativamente se orienten formando arreglos geométricos que originan la formación de una matriz ó estructura gel de consistencia variable, la cual requiere de un esfuerzo finito para recuperar sus condiciones de fluidez originales.

El comportamiento viscoelástico de los fluidos de perforación obedece al desarrollo de propiedades reológico-tixotrópico que además de dar origen al punto de cedencia genera GELATINOSIDAD, parámetro tixotrópico que se mide en función de las fuerzas de atracción, es decir se incrementa mientras el fluido se encuentra en reposo y disminuye cuando se somete a valores constantes de velocidad de corte.

La deformación que sufren los fluidos de perforación será viscoelástica y tenderá a estados originales bajo la acción de otras fuerzas que conducen a los siguientes tipos de flujo :

FLUJO LAMINAR .

Es aquél que se mueve en forma de capas ó láminas deslizando suavemente unas sobre otras en forma paralela y en dirección del flujo.

FLUJO TRANSITORIO .

Ocurre después de que las condiciones de flujo se modifiquen y antes de que exista un nuevo tipo de flujo.

FLUJO TURBULENTO .

Se presenta cuando se forman pequeños remolinos a través del fluido.

FLUJO TAPON .

Es aquél en el cual el fluido se mueve a lo largo de un tubo en forma de tapón ó pistón.

C A P I T U L O I I

PARAMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO

REOLOGICO - TIXOTROPICO

C A P I T U L O I I

PARAMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO

REOLOGICO - TIXOTROPICO

El comportamiento reológico-tixotrópico se define a través de los siguientes parámetros, viscosidad aparente (V_A), viscosidad plástica (V_p), punto de cedencia (P_c) y gelatinosidad.

VISCOSIDAD APARENTE .

La viscosidad es una propiedad que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento. Cuando los fluidos de perforación circulan por diferentes partes del sistema tienden a mostrar cambios en sus propiedades viscosas dando como resultado un aspecto físico diferente al inicial. Este nuevo valor de viscosidad es una medida cualitativa conocida como viscosidad aparente, su valor se expresa en centipoises (cp) .

La viscosidad aparente es una propiedad exhibida únicamente por los líquidos, su valor representa la variación de las propiedades de flujo y es posible estimarlo a través del embudo marsh y de viscosímetros rotacionales.

VISCOSIDAD ELASTICA .

Se define como la viscosidad que presentan los fluidos plásticos debido a la presencia de partículas sólidas en la fase continua, su valor se expresa en centipoises (cp). Físicamente representa la resistencia del flujo a fluir causada por fricción mecánica dentro del fluido. La fricción mecánica es debida a la acción recíproca de partículas sólidas y líquidas en el lodo.

La viscosidad plástica está gobernada por la viscosidad de la fase líquida y el tamaño, forma y número de partículas, es decir, el valor observado será una indicación cualitativa del contenido de sólidos en el fluido de perforación.

Por ejemplo, si los sólidos perforados que contiene un lodo de 1.8 gr/cm^3 , son iguales a los existentes en un lodo de 1.4 gr/cm^3 , el primero tendrá una viscosidad plástica más alta debido a una mayor concentración de partículas sólidas de barita. La viscosidad plástica en el lodo puede cambiar si el número y naturaleza de los sólidos cambia.

PUNTO CEDENTE.

Se define como el momento en el cual un fluido plástico de Bingham inicia su desplazamiento debido a la transferencia de una fuerza, su valor se expresa en $\text{lb fza} / 100 \text{ ft}^2$. Físicamente el punto cedente, es una medida de las fuerzas electroquímicas de atracción del lodo en condiciones de flujo. Estas fuerzas electroquímicas son debido a cargas en la

superficie de las partículas reactivas y a la presencia de electrolitos en la fase líquida.

En el campo el valor del punto de cedencia da una indicación de las fuerzas de atracción entre los sólidos y por lo tanto de la desviación del comportamiento No-Newtoniano del lodo. Se usa más que la viscosidad plástica para indicar el comportamiento del lodo, su valor es un factor dominante que afecta las pérdidas de presión en el sistema circulatorio, la densidad de circulación equivalente y la capacidad de acarreo del fluido de perforación.

Como algunas de las otras propiedades físicas del lodo el punto cedente depende también de la naturaleza, y número de sólidos contenidos en el lodo.

La relación de la viscosidad plástica y el punto cedente son características de los fluidos plásticos de Bingham, comportamiento que siguen los fluidos de perforación, ver figura (II. 1) .

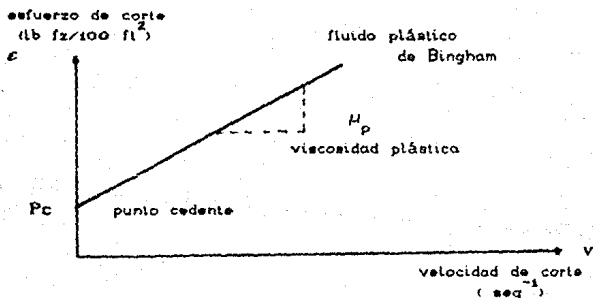


figura (II. 1)

Matemáticamente esta relación se puede expresar con la siguiente ecuación :

$$\epsilon = F_c + v \cdot V_p \quad \dots\dots(2.1)$$

Donde :

ϵ = esfuerzo de corte (lb fza / 100 ft²)

F_c = punto cedente (lb fza / 100 ft²)

V_p = viscosidad plástica (cp)

v = velocidad de corte (seg⁻¹)

GELATINOSIDAD.

Según lo tratado en relación a la tixotropía, para iniciar el movimiento del fluido de perforación hay que realizar un determinado esfuerzo para romper las fuerzas de cohesión del fluido debidas a la presencia de colóides hidratables, el valor obtenido para lograrlo es lo que conocemos como gelatinosidad, se mide en lb fza / 100 ft².

La gelatinosidad, esfuerzo gel, es la medida de las fuerzas de atracción de los colóides hidratables y no hidratables presentes en el fluido de perforación en condiciones estáticas después de 10 segundos y 10 minutos de

reposo. Este intervalo nos permite observar su comportamiento y apreciar la velocidad de gelatinización, que es una medida de la velocidad con que se forma la gelatinosidad en un líquido en reposo. Las fuerzas de atracción difieren del valor del punto de cedencia, son dependientes del tiempo y se rompen después de que se ha iniciado.

Los esfuerzos gel son cualitativamente clasificados en forma progresiva basados en un rango de esfuerzo de; 10 segundos y 10 minutos y en la diferencia existente de éstos valores en el tiempo transcurrido. Esto nos permite distinguir tres tipos de gelatinosidad atendiendo a la velocidad de gelatinización y a su consistencia, figura (II. 2).

1) Gel consistente. La presentan fluidos de perforación con alta fuerza de gelatinosidad y alta velocidad de gelatinización, curva (1).

2) Gel semiconsistente. La presentan fluidos de perforación con alta fuerza de gelatinosidad y velocidad de gelatinización lenta, curva (2).

3) Gel frágil. La presentan fluidos de perforación con baja fuerza de gelatinosidad y alta velocidad de gelatinización, curva (3).

En la siguiente figura podemos ver los tres tipos de gelatinosidad.

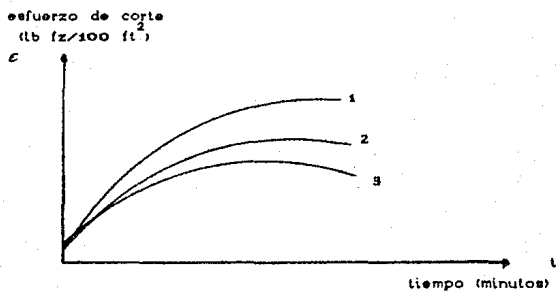


figura (II. 2)

El esfuerzo gel es necesario para ayudar a mantener los sólidos en suspensión procedentes de la formación y los inherentes a los sistemas durante las paradas por conexiones ó viajes de tubería. A continuación se muestra la curva de un fluido con estructura gel, figura (II. 3).

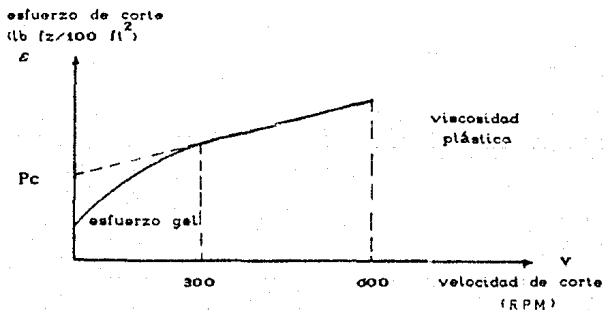


figura (II. 3)

C A P I T U L O I I I

EVALUACION DE PROPIEDADES REOLOGICO - TIXOTROPICAS

MEDIANTE EL USO DE LOS VISCOSIMETROS

STORMER Y FANN - 35

C A P I T U L O I I I

EVALUACION DE LAS PROPIEDADES REOLOGICO - TIXOTROPICAS MEDIANTE EL USO DE LOS VISCOSIMETROS STORMER Y FANN - 35

Para la evaluación de las propiedades de flujo de los fluidos de perforación se cuenta con equipo especializado que nos permite obtener análisis cualitativos y cuantitativos. En general, el análisis cualitativo es una proporción relativa que nos lleva a obtener valores aparentes, para tales casos se ha venido empleando el viscosímetro Stormer y el embudo Marsh los cuales nos permiten estimar variaciones en las propiedades de flujo al obtener un valor de la viscosidad aparente del fluido ver figuras III. 1 y III. 2 .

El análisis cuantitativo se refiere a las medidas absolutas que nos permiten definir el comportamiento reológico-tixotrópico de los fluidos mediante lecturas directas en el viscosímetro rotacional Fann-35 que definen a la viscosidad aparente, viscosidad plástica, punto de cedencia y gelatinosidad.

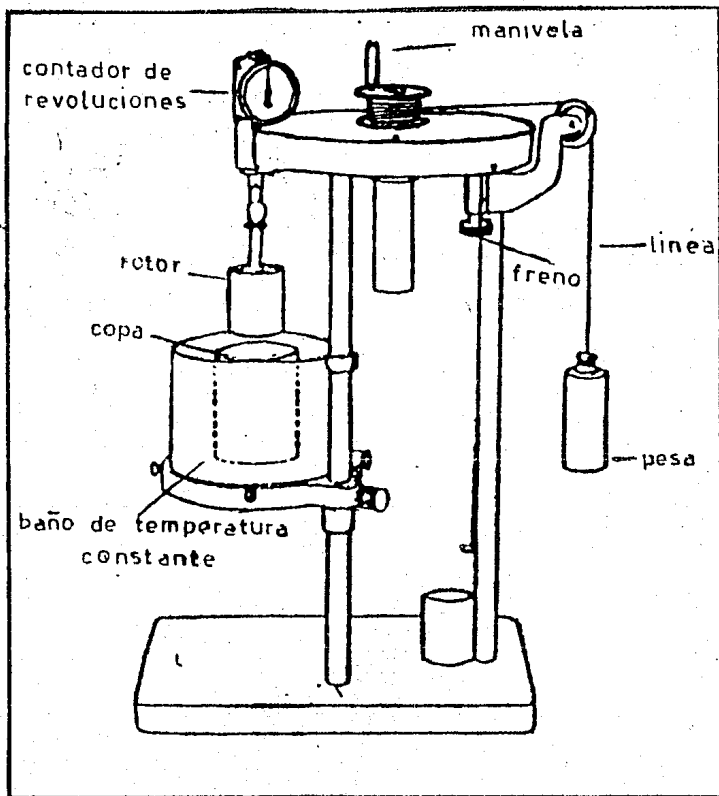
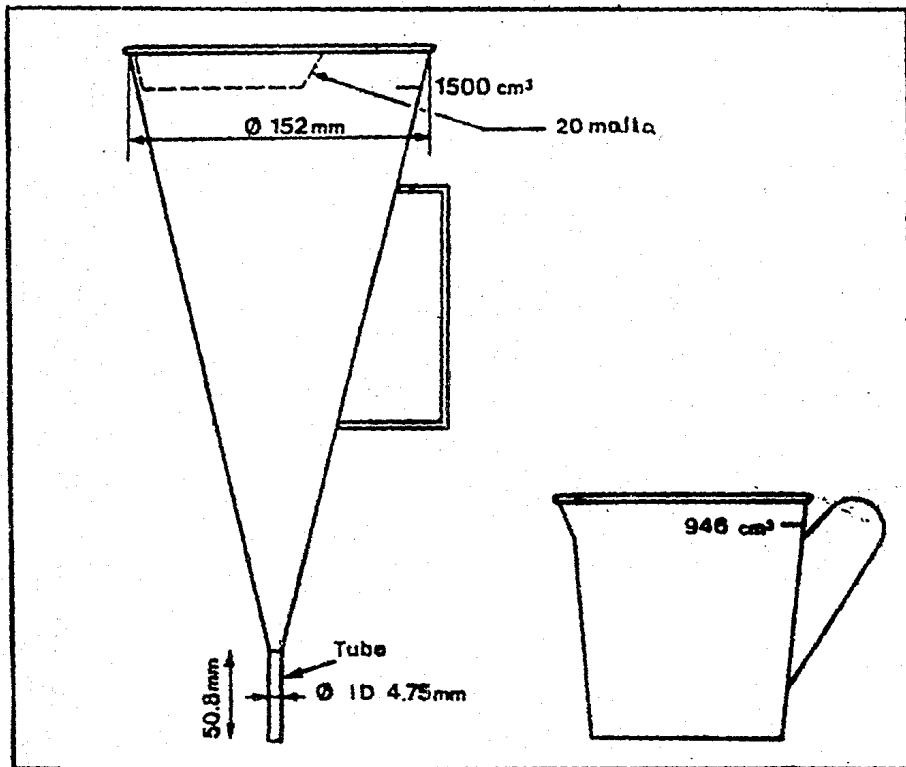


figura (III.1)

figura (III. 2)



Los viscosímetros rotacionales constan de dos cilindros coaxiales, uno fijo y otro móvil con una determinada velocidad angular. En éstos viscosímetros la muestra del fluido de perforación se encuentra en el espacio anular entre los dos cilindros, y es sujeta a la acción del corte, el esfuerzo realizado es medido como una función del torque impuesto sobre el cilindro estacionario.

La velocidad de corte (γ) en un viscosímetro rotacional es determinada en base a la velocidad de rotación del cilindro móvil y a la geometría del sistema; así, el esfuerzo de corte (τ) es determinado en función del torque medido. La relación existente entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte es la misma, es decir, tienen la misma relación funcional.

$$\tau = f(\gamma)$$

El estudio de las propiedades de flujo de los fluidos en los viscosímetros rotacionales, está basado en las siguientes suposiciones :

a) El flujo es estacionario, laminar, isotérmico e incompresible.

b) Las líneas de flujo son circulares sobre el plano horizontal, y perpendiculares a los ejes de rotación.

c) No existe desplazamiento entre los cilindros y el fluido, por lo que la velocidad del fluido en las paredes del bulbo es cero y en la manga del rotor es la velocidad que tenga ésta.

d) No existen efectos de frontera, ni esfuerzos normales.

e) El comportamiento del fluido no depende del tiempo.

Bajo las condiciones anteriores, se tiene una muestra de fluido entre los dos cilindros tal como se muestra en la figura III. 3, la fuerza responsable de que el fluido gire en lugar de que se acelere linealmente es debida a la acción del torque (T) aplicado en cualquier punto situado en el espacio anular del bulbo y la manga del rotor.

De tal manera :

$$\text{Torque} = \text{Area} * \text{Radio} * \text{Esfuerzo de corte}$$

Matemáticamente :

$$T = (2 \pi r h e) * (r) * (\tau) \quad \text{--- (3.1)}$$

Despejando el esfuerzo de corte :

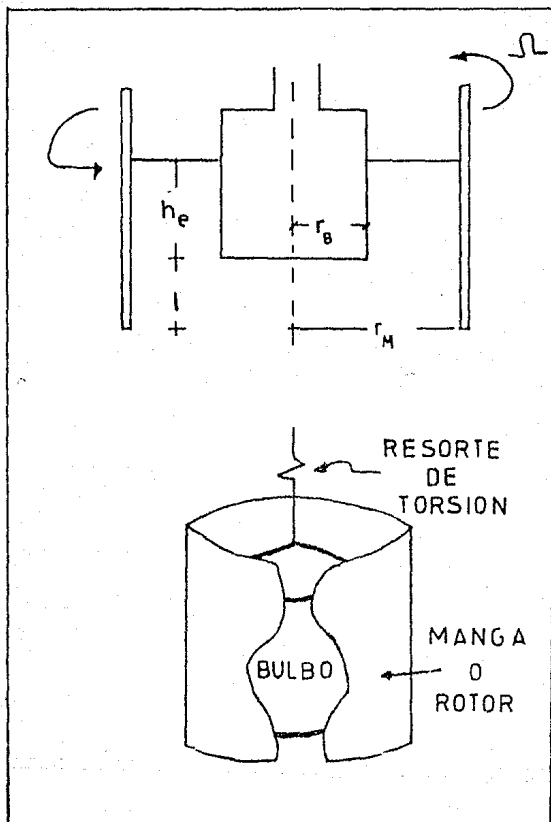


figura (III. 3)

donde : h_e = altura efectiva del bulbo.

La ecuación 3.2 indica que el esfuerzo de corte es directamente proporcional al torque medido, e inversamente proporcional a las dimensiones del viscosímetro.

VISCOSIMETRO STORMER

Con éste instrumento se mide la viscosidad aparente de un fluido de perforación bajo condiciones de agitación, teniendo valores de viscosidad que nos servirán como marco de referencia para conocer las variaciones en las propiedades de flujo del fluido en el pozo.

El principio en el que se basa éste dispositivo es el esfuerzo de corte necesario para hacer girar un rotor en el fluido de prueba.

El viscosímetro consta principalmente de un rotor ó cilindro que gira dentro de una copa llena de fluido que se va a analizar. El rotor se hace girar por medio de un par de engranes accionados por pesas suspendidas a través de una

cuerda, la velocidad de rotación ó revoluciones del rotor se lee en un contador de revoluciones, y el tiempo con un cronómetro.

Por ensaye y error se adicionan pesas a la cuerda hasta que el rotor alcance 600 rpm. El peso agregado en gramos se utiliza para obtener la viscosidad aparente del fluido por medio de una gráfica especial, figura III. 4. El valor obtenido es la viscosidad aparente del fluido en centipoises, determinado a 600 rpm en el viscosímetro Stormer.

CALIBRACION DEL INSTRUMENTO.

Debe hacerse periódicamente empleando soluciones de viscosidad conocida a las temperaturas de operación, generalmente se hace la calibración con mezclas de glicerina y agua químicamente puras.

OBTENCION DE LA VISCOSIDAD APARENTE

PROCEDIMIENTO.

- Se atornilla el rotor en su lugar y se llena la copa con el fluido de prueba hasta $1/4$ de pulgada ó $1/2$ centímetro del borde superior. Si el fluido contiene material obturante ó recortes de la formación hágalo pasar por una malla del número 10 antes de vaciarlo a la copa.

- Coloque la copa en el viscosímetro. Si se realizan cálculos para diferentes temperaturas es necesario que la copa

CURVA DE CALIBRACION PARA EL VISCOSIMETRO STORMER

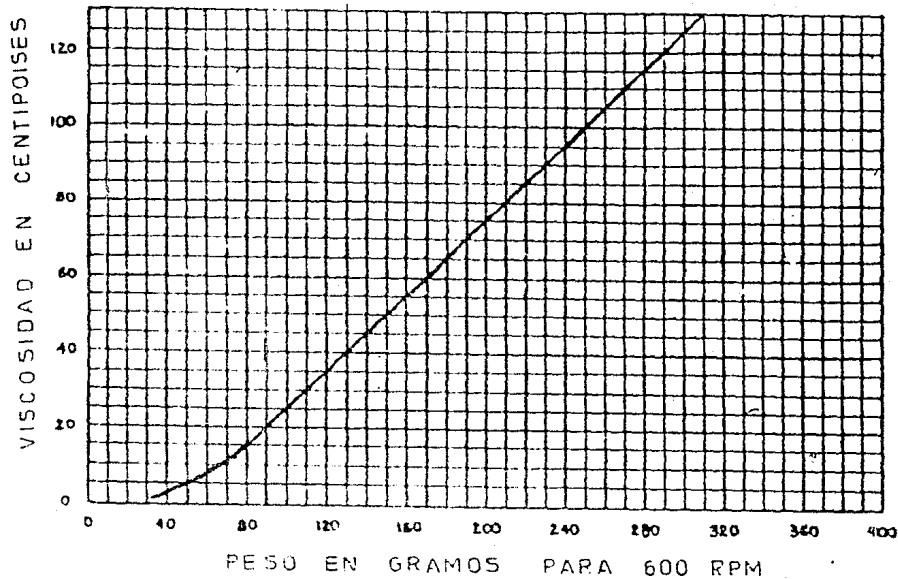


figura (III. 4)

se coloque en baño de agua para tener así una temperatura constante y estabilizada.

- Quitar el freno del rotor y agitar el fluido de prueba haciendo girar rápidamente el rotor.

- Accionar el freno y sobreponer pesas en la cuerda ó línea calculando que el rotor gire a 600 rpm , 60 revoluciones en 6 segundos ó 100 en 10 segundos dependiendo de las graduaciones del indicador de revoluciones.

- Quite el freno, deje que el rotor dé unas 20 ó 30 revoluciones para que se establezca la velocidad del rotor, mida con un cronómetro los segundos requeridos para que la aguja del contador de revoluciones dé una vuelta completa.

- Si la aguja del contador da una vuelta completa en un tiempo menor del correspondiente a 600 rpm , es que colocamos pesas de más en la línea, en éste caso se retiran algunas antes de seguir a delante. Si el tiempo para obtener la lectura a 600 rpm es mayor, se colocan más pesas en la línea y se repite el paso anterior.

- Mediante ensaye y error se obtiene la lectura a 600 rpm al tiempo correspondiente.

- El número de gramos que representa la fuerza impulsora determinados en el paso anterior se usan para obtener la viscosidad del fluido en centipoises de la tabla ó gráfica de calibración del viscosímetro.

El viscosímetro Fann utiliza un motor de 115 volts de 60 ó 50 Hz para ser accionado y transmitir el movimiento rotacional mediante una flecha vertical que se acopla a un juego de engranes de precisión que a su vez transmiten el movimiento al rotor a diferentes velocidades, 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm. El rotor es hueco y aloja a la flecha que acopla al bulbo a la escala graduada ó dial, y al resorte de torsión tipo helicoidal, ver figura III.5 . El movimiento rotacional en el lodo que se encuentra en el espacio anular entre el rotor y el bulbo produce un esfuerzo que se mide como una función del torque impuesto sobre el bulbo.

Este tipo de viscosímetros puede modificar el rango de operación en dos formas :

1) MODIFICANDO LA GEOMETRIA INTERNA.

La medición de las propiedades reológicas con éste tipo de instrumentos depende de las dimensiones, longitud y diámetro del bulbo, y de la separación entre la manga del rotor y el bulbo, por tal razón los fabricantes de éstos equipos ofrecen cuatro bulbos y tres rotores de diferentes dimensiones los cuales pueden ser combinados entre sí para obtener diferentes rangos de medición, en las tablas I y II se muestran las dimensiones y combinaciones posibles para éste tipo de viscosímetros.

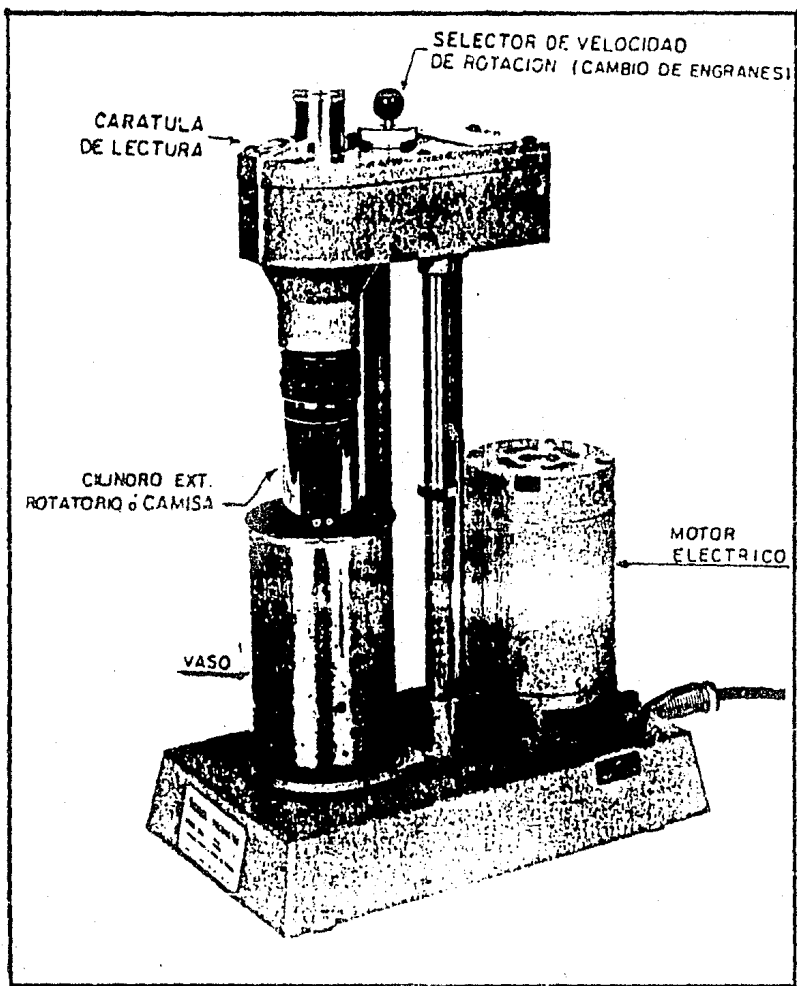


figura (III. 5)

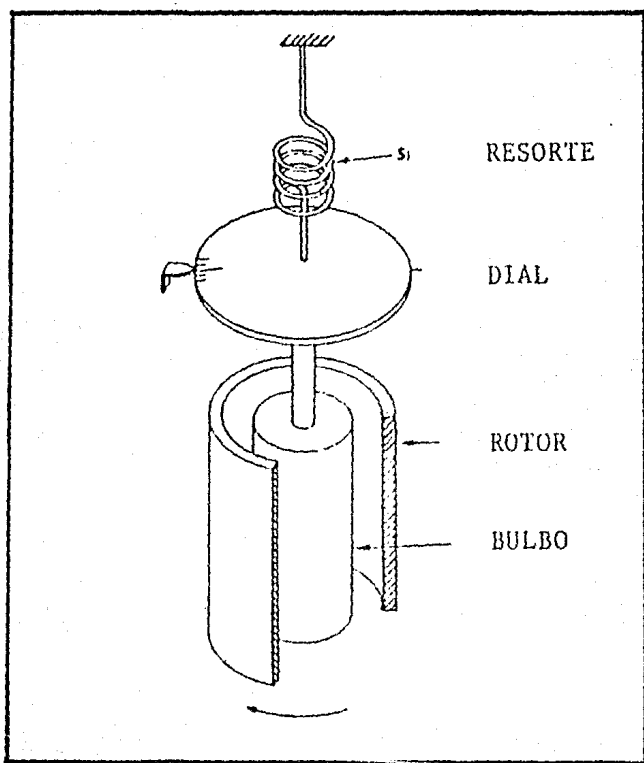


figura (III. 5)

CONCEPTO	RADIO (mm)	LONGITUD (mm)
B ₁	17.25	38
B ₂	12.23	38
B ₃	8.63	38
B ₄	8.63	19
R ₁	18.41	
R ₂	17.58	
R ₃	25.86	

T A B L A I I

COMBINACION	VELOCIDAD DE CORTE seg ⁻¹ /revolucion	SEPARACION BULBO-ROTOR (mm)	FACTOR C
R ₁ -B ₁	1.7034	1.17	1.00
R ₁ -B ₂	0.3772	6.13	8.91
R ₁ -B ₃	0.2684	9.79	25.39
R ₁ -B ₄	0.2684	9.79	50.78
R ₂ -B ₁	5.4106	0.344	0.31
R ₂ -B ₂	0.4086	5.313	8.22
R ₂ -B ₃	0.2758	8.967	24.70
R ₂ -B ₄	0.2758	8.967	49.41
R ₃ -B ₁	0.3772	8.622	4.51
R ₃ -B ₂	0.2705	13.591	12.43
R ₃ -B ₃	0.2357	17.245	28.90
R ₃ -B ₄	0.2357	17.245	57.81

2) CAMBIANDO EL RESORTE.

El esfuerzo de corte en éste tipo de viscosímetros es medido a través de un resorte, el cual tiene una constante K definida. Ahora bien, si aumentamos ó disminuimos el valor de ésa constante mediante la inserción de resortes con K diferentes, estaremos en posibilidad de aumentar ó disminuir

el rango de fuerzas medidas, para el mismo arreglo geométrico, y con esto estaremos modificando el rango de medición de la viscosidad. Los fabricantes de éste tipo de viscosímetros tienen disponibles ocho resortes con diferente constante cada uno, ver tabla III y IV.

T A B L A I I I

N. DEL RESORTE	FACTOR f	K *, dinas/cm/grado deflexión
F 0.2	0.2	77.2
F 0.5	0.5	193.0
F 1	1.0	386.0
F 2	2.0	772.0
F 3	3.0	1158.0
F 4	4.0	1544.0
F 5	5.0	1930.0
F 10	10.0	3860.0

* Valores obtenidos con la combinación R₁-B₁.

T A B L A I V

VELOCIDAD DEL ROTOR (R P M)	FACTOR DE VELOCIDAD (S)
0.9	333.3
1.8	166.6
3.0	100.0
6.0	50.0
30.0	10.0
60.0	5.0
90.0	3.33
100.0	3.00
180.0	1.067
200.0	1.5
300.0	1.0
600.0	0.5

Las diferentes combinaciones de bulbo-rotor-resorte que se encuentran disponibles con los fabricantes de éste tipo de viscosímetros, permiten abarcar la medición de un rango amplio de viscosidades absolutas. A continuación se dará la ecuación y los factores a utilizar para cada combinación bulbo-rotor-resorte :

$$\mu = S \cdot \phi \cdot f \cdot C$$

Donde :

μ = viscosidad en cp .

S = factor de velocidad, tabla IV .

ϕ = lectura del dial, grados de deflexión.

f = factor del resorte, tabla III .

C = factor rotor-bulbo, tabla II .

Una característica de éste tipo de viscosímetros es que mediante la combinación R1-B1 y el resorte F1 se tiene la geometría indicada para que la lectura a 300 rpm dé la viscosidad en centipoises.

Con los datos proporcionados por el viscosímetro es posible obtener las relaciones reológico-tixotrópicas para un fluido Bingham, viscosidad plástica, viscosidad aparente, punto de cedencia y gelatinosidad, a continuación se muestra el desarrollo matemático :

Sea : r_i = radio del cilindro interior.
 r_o = radio del cilindro exterior.
 h = altura del cilindro inmerso.
 T = torque que actúa en el interior del cilindro.
 Ω = velocidad angular del rotor.
 N = velocidad de rotación en rpm .

Por definición :

$$\Omega = \frac{(2\pi \cdot N)}{60}$$

El esfuerzo cortante en el interior de la pared del cilindro está dado por la ecuación (3.2) :

$$\tau = \frac{T}{(2\pi r_i^2 h)} \quad \text{----(3.2)}$$

La velocidad de corte en el interior de la pared del cilindro :

$$v_v = \frac{2\Omega}{1 - (r_i/r_o)^2}$$

$$\gamma_l = \frac{4 \pi \cdot N}{60 \left[1 - \left(r_l / r_o \right)^2 \right]} \quad \text{----(3.3)}$$

El valor del torque impuesto al resorte se obtiene con la lectura del dial y de su constante K , la cual es proporcionada por el fabricante.

$$T = K \cdot \theta$$

donde :

θ = es la lectura en la escala del viscosímetro .

K = es la constante del resorte.

Tomando en cuenta los siguientes valores y sustituyendolos en la ecuación 3.2 :

$$r_l = 17.25 \text{ mm}$$

$$r_o = 18.42 \text{ mm}$$

$$h = 38 \text{ mm}$$

$$K = 3.87 \times 10^{-5} \text{ (N \cdot m / grado de deflexión)}$$

$$\epsilon_l = \frac{K \cdot \theta}{2 \pi \cdot r_l^2 \cdot h}$$

$$\epsilon_l = 0.51 \theta$$

donde el esfuerzo de corte está dado en pascales.

Si se quiere en $\text{lb} / 100 \text{ft}^2$:

$$i = \frac{K}{2 \pi \cdot r_l^2 \cdot h}$$

por lo tanto :

$$e = \theta$$

sustituyendo las dimensiones del viscosímetro Fann-35 en la ecuación 3.3 :

$$v_l = 1.7 \text{ N}$$

DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD APARENTE .

Se determina a una velocidad de corte de 1020 seg^{-1} que corresponde a una velocidad de rotación de 600 rpm en el viscosímetro.

$$\mu_a = \frac{e}{v} = \frac{0.51 \theta_{600}}{1020}$$

expresada en centipoises :

$$\mu_a = 0.5 \theta_{600}$$

$$= \frac{\theta_{600}}{2} \quad \text{---(3.4)}$$

DETERMINACION DE LA VISCOSIDAD PLASTICA .

Será obtenida para un esfuerzo de corte ϵ_{1020} con una velocidad de corte de 1020 seg^{-1} , y un esfuerzo de corte ϵ_{510} a una velocidad de corte de 510 seg^{-1} , éstas velocidades se obtienen a 600 y 300 rpm respectivamente.

$$\begin{aligned}\mu_p &= \frac{\epsilon_{1020} - \epsilon_{510}}{1020 - 510} \\ &= \frac{0.51 (\theta_{600} - \theta_{300})}{1020 - 510}\end{aligned}$$

expresada en centipoises :

$$\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300} \quad \text{----- (3.5)}$$

DETERMINACION DEL PUNTO CEDENTE .

Utilizando la gráfica III. 6 . a , tenemos :

$$P_c = \epsilon_{1020} - 2 (\epsilon_{1020} - \epsilon_{510})$$

expresado en $\text{lb} / 100 \text{ ft}^2$:

$$P_c = \theta_{600} - 2 (\theta_{600} - \theta_{300}) \quad \text{----- (3.6)}$$

$$= \theta_{300} - 2 \mu_p = 2 (\mu_a - \mu_p)$$

El fluido que circula a través de la sarata de perforación se mueve a diferentes velocidades de corte. El modelo de Bingham es aplicable si el fluido se mueve en flujo laminar a velocidades mayores de 510 seg^{-1} ; pero para menores velocidades éste modelo ya no representa el comportamiento del fluido real por lo que es necesario emplear otros modelos como el modelo de la ley de potencias representado por :

$$\tau = k \cdot v^n \quad \text{----- (3.7)}$$

donde :

n = índice de comportamiento de flujo .

k = índice de consistencia .

Para fluidos pseudoplásticos el valor de n varía entre cero y uno, mientras que para fluidos dilatantes n es mayor que uno, y entre mayor sea la diferencia con respecto a la unidad mayor será el grado de comportamiento No-Newtoniano.

k está relacionado con la consistencia del fluido y entre mayor sea éste valor más espeso ó más viscoso será el fluido.

En el caso particular en que n sea igual a uno la ecuación 3.7 representará a un fluido Newtoniano en donde k es la viscosidad absoluta del fluido.

Tomando logaritmos en la ecuación 3.7 tenemos :

$$\log \tau = \log k + n \log v$$

En la figura III. 6 se muestran las propiedades reológicas de un fluido de perforación de acuerdo a los modelos de Bingham y el de ley de potencias obtenidos por medio del viscosímetro Fann-35.

Los valores de n y k pueden ser calculados de la siguiente forma :

$$n = 3.32 \log (\theta_{600} / \theta_{300}) \text{ ----(3.8)}$$

$$k = \frac{\theta_{300}}{510^n} \text{ -----(3.9)}$$

CALIBRACION DEL INSTRUMENTO

Existen dos formas de calibrar el viscosímetro :

- 1) Mediante un calibrador mecánico .
- 2) Mediante un fluido de viscosidad conocida .

1) CALIBRACION MECANICA .

Este calibrador consta de tres partes : un brazo, un cilindro y pesas de diferentes valores, figura III. 7 .

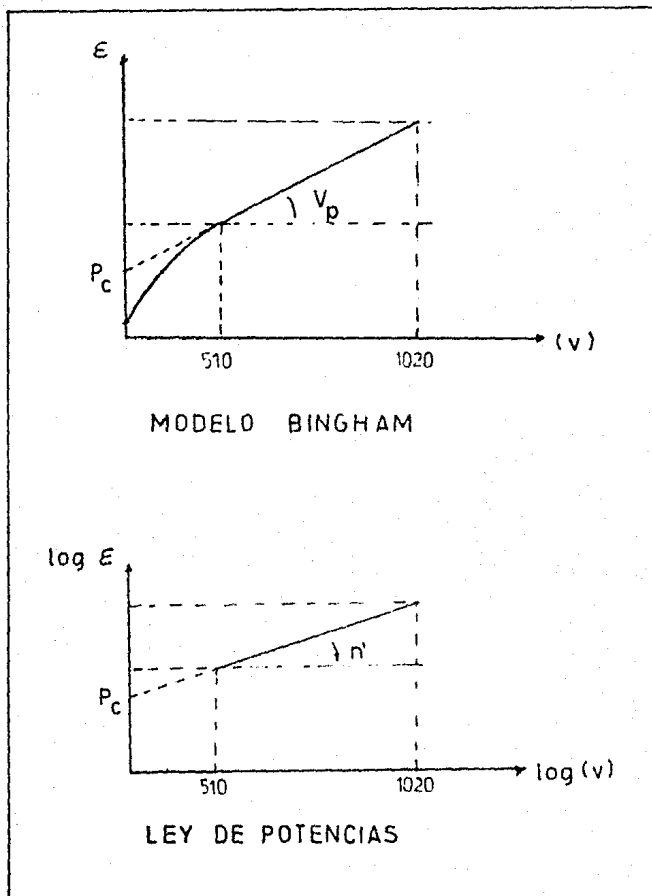


figura (III. 6)

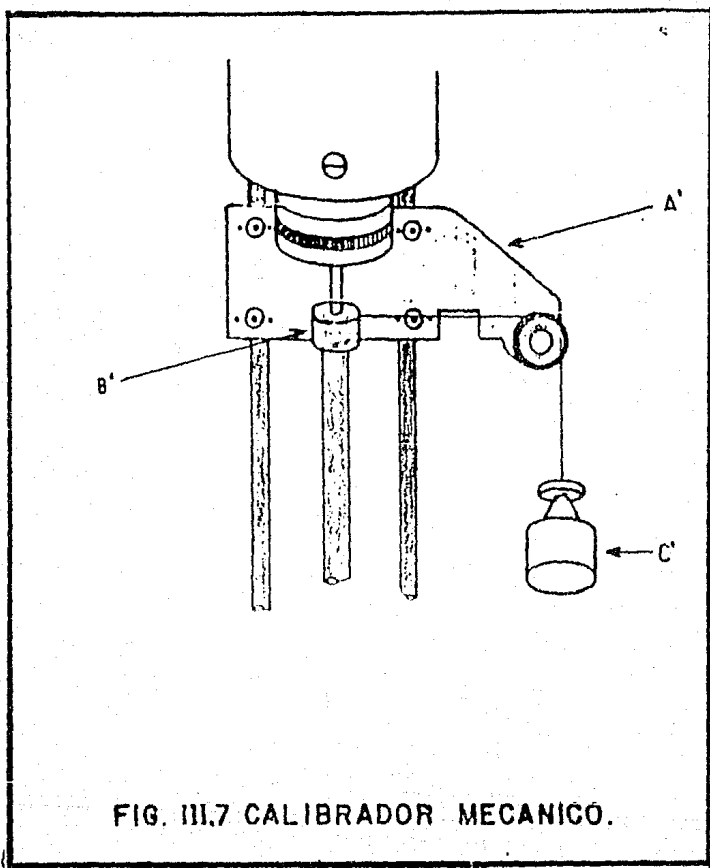


FIG. III.7 CALIBRADOR MECANICO.

a) Brazo del calibrador de torsión (A') , está formado por una placa en donde se encuentran cuatro seguros alineados de dos en dos y una polea colocada sobre el vástago.

b) Cilindro metálico (B') , tiene un radio de un centímetro, una perforación en el centro y una muesca en la periferia que actúa como retén.

c) Pesas (C') , se utilizan pesas según el rango de la escala, éstas se sujetan con un hilo el cual lleva una cuña que sirve como sujetador al cilindro mecánico.

Procedimiento mecánico .- se quita el bulbo de la flecha del dial del viscosímetro, en su lugar se coloca el cilindro metálico, se asegura el brazo del calibrador en las barras del viscosímetro, mismas por donde se corre el elevador, se sujeta el extremo del hilo de una pesa en la muesca del cilindro dejandola colgar, de tal forma que el hilo pase sobre la polea y la fuerza aplicada sea normal al eje del cilindro y actúe el radio del cilindro como brazo de palanca. De ésta manera se registra la lectura del dial utilizando las diferentes pesas. Un resorte en buenas condiciones es aquél en el que la constante de calibración varía ± 1 divisiones aplicando las distintas fuerzas con respecto a la deflexión calculada, utilizando la siguiente fórmula :

$$\theta = \frac{G \times 2.54}{f}$$

donde :

θ = lectura de la escala, grados de deflexión .

G = peso en gramos de las diferentes pesas ,

f = factor del resorte , adimensional .

2) CALIBRACION MEDIANTE UN FLUIDO DE VISCOSIDAD CONOCIDA.

Este tipo de calibración es más confiable debido a que se considera la geometría del viscosímetro, como es el espacio anular que existe entre la manga y bulbo, área del bulbo y además se toma en cuenta la velocidad con que gira el rotor del equipo. Para revisar ésta velocidad se emplea una lámpara estroboscópica ó un fototacómetro u otro medidor de velocidad.

El procedimiento que se sigue es utilizar un fluido de viscosidad conocida, generalmente un fluido de aceite de silicón, por ejemplo el Dow-corning 200/100 , y se siguen los puntos enumerados para la operación del viscosímetro, además se registra la temperatura a la que se efectúa la medición. Los pasos que se siguen para ejecutar la calibración del resorte helicoidal se mencionan en seguida, ver figura III. 8.

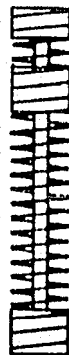
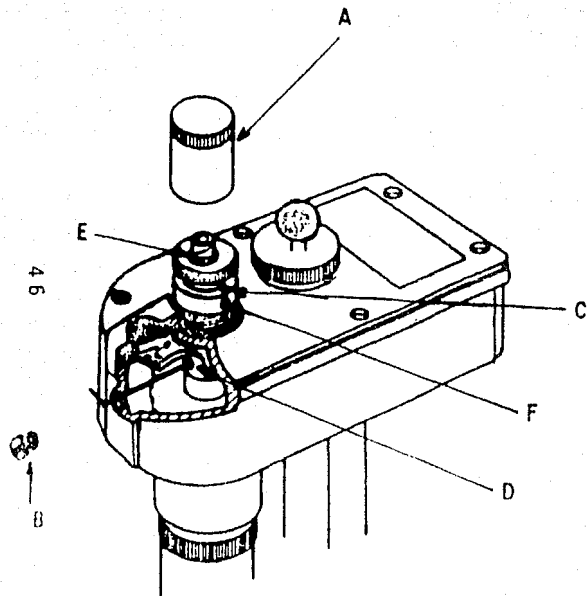
() Quite el cubrepolvo (A) que protege el resorte helicoidal de calibración (E) .

ii) Afloje el prisionero allen (C) que sujeta a la parte superior del resorte helicoidal de calibración.

iii) El resorte helicoidal de calibración está formado por tres arillos de aluminio, una flecha unida a un arillo de aluminio y un número de espiras (30). Los arillos se localizan, uno en la parte inferior unido a la flecha y otro en la parte superior que sirven para sujetar las espiras del resorte. El arillo que se encuentra en medio del resorte es el que sirve para ajustar la calibración del resorte, dándole mayor ó menor número de espiras activas al resorte.

Cuando la lectura que nos dió el viscosímetro es menor a la especificada para el aceite, se tiene que aumentar el número de espiras al resorte; para ésto, se le da vuelta en sentido contrario a las manecillas del reloj al arillo de aluminio, lo que sea necesario. Hecho lo anterior se fija el resorte con el prisionero allen (C) y se vuelven a tomar lecturas. Si la lectura no ha sido la especificada se ajusta de nuevo el resorte hasta cumplir con la especificación.

Cuando la lectura que nos dió del viscosímetro por calibrar es mayor a la especificada para el aceite, se tiene que disminuir el número de espiras al resorte; para eso se le da vuelta en sentido de las manecillas del reloj al arillo de aluminio, lo que sea necesario hasta que cumpla con la lectura especificada.



ARILLO DE ALUMINIO FIJO

ARILLO DE ALUMINIO PARA
AJUSTAR LA CALIBRACION

ARILLO DE ALUMINIO CON FLECHA

DETALLE DE RESORTE DE
CALIBRACION.

FIG. III.8 AJUSTE DE CALIBRACION Y REEMPLAZO DEL RESORTE (E).

Hecho lo anterior y si el resorte de calibración no se ajusta, se procede a reemplazarlo por uno nuevo; para esto se llevan a cabo los siguientes pasos :

- i) Se quita el cubrepolvo (A), que protege al resorte de calibración.
- ii) Se afloja el prisionero allen (C).
- iii) Se afloja el prisionero allen (D) quitando previamente el tornillo (B) .
- iv) Se saca el resorte, cuidando que no se deformen sus espiras y se mete el resorte nuevo.
- v) Se aprieta el prisionero allen (D) y el tornillo (B) .
- vi) Se aprieta el prisionero allen (C).
- vii) Se pone el cubrepolvo (A).

OBTENCION DE LAS PROPIEDADES ROLOGICO-TIXOTROPICAS

PROCEDIMIENTO.

- Agregue 350 ml de la muestra al vaso metálico del equipo, coloquelo en el soporte del viscosímetro y levántelo hasta que el rotor quede sumergido en el lodo hasta la marca grabada en dicho rotor.
- Con el rotor girando a 600 rpm esperar un minuto hasta que se estabilice la escala que marca el valor del esfuerzo de corte y anotar la correspondiente lectura θ_{600} .
- Cambiar la velocidad a 300 rpm esperar un minuto y anotar la lectura θ_{300} .
- Regresar a la velocidad de 600 rpm y agitar por espacio de 10 a 15 segundos, cambiar a velocidad de 3 rpm y parar el instrumento por espacio de 10 segundos.
- Al término de los 10 segundos hacer girar el rotor con la velocidad de 3 rpm y observar la máxima deflexión en la escala, la cual representará directamente el esfuerzo gel a 10 segundos en $\text{lb} / 100 \text{ft}^2$.
- Cambiar la velocidad a 600 rpm y agitar por espacio de 10 a 15 segundos, cambiar a velocidad de 3 rpm y parar el instrumento por espacio de 10 minutos.
- Al término de 10 minutos girar el rotor a la velocidad de 3 rpm y observar la máxima deflexión en la escala representando directamente el esfuerzo gel a 10 minutos en $\text{lb}/100 \text{ft}^2$.
- La viscosidad plástica se calcula mediante la ecuación (3.3) .

- La viscosidad aparente con la ecuación (3.4) .
- El punto cedente con la ecuación (3.6) .

Las viscosidades se reportan en centipoises y el punto cedente y la gelatinosidad en $lb / 100 ft^2$.

Para calcular las propiedades reológico-tixotrópicas a diferentes temperaturas el procedimiento es el mismo que el descrito anteriormente con la única variante de que en lugar de utilizar el vaso metálico para almacenar el lodo, se utiliza una termocopa para así proporcionarnos las temperaturas de prueba deseadas.

C A P I T U L O I V

FACTORES QUE FAVORECEN O ALTERAN EL COMPORTAMIENTO

REOLOGICO - TIXOTROPICO Y MEDIOS DE CONTROL

C A P I T U L O I V

FACTORES QUE FAVORECEN O ALTERAN EL COMPORTAMIENTO REOLOGICO - TIXOTROPICO Y MEDIOS DE CONTROL

Debido a que del comportamiento reológico-tixotrópico depende la limpieza del agujero es necesario conocer los factores físicos y/o fisicoquímicos que lo afectan para poder contrarrestar sus efectos negativos.

FACTORES FISICOS :

- a) Presión y temperatura.
- b) Sólidos inherentes al fluido y procedentes de la formación.

FACTORES FISICOQUIMICOS :

- a) Sales.
- b) Cemento.
- c) Gases.
- d) Bacterias.

FACTORES FISICOS.

a) PRESION Y TEMPERATURA.

La alta presión y temperatura que se encuentran en la perforación profunda afectan notablemente las propiedades reológico-tixotrópicas y filtrantes en diferentes grados dependiendo de la naturaleza de los materiales viscosificantes y gelantes. En el caso de los fluidos base aceite éste fenómeno se manifiesta con una disminución considerable de la viscosidad.

Estos efectos se manifiestan en la forma siguiente:

i) Las altas temperaturas producen un decremento en la viscosidad e incremento en la pérdida de agua, lo cual se presenta en las secciones del fondo del agujero.

ii) A presión y temperatura constantes la tixotropía es reversible.

iii) La variación de presión y temperatura provoca cambios de flujo en el medio fluyente, sin embargo el esfuerzo cortante y la velocidad de corte se mantendrán constantes en régimen de flujo laminar.

iv) Las altas temperaturas dan como resultado altas gelatinosidades y reducen la efectividad de los aditivos químicos empleados en el desarrollo y control de propiedades reológico-tixotrópicas.

Entre más bajo sea el contenido de sólidos perforados más fácil será mantener las propiedades reológico tixotrópicas a altas temperaturas.

b) SÓLIDOS INHERENTES AL FLUIDO Y PROCEDENTES DE LA FORMACION.

Los sólidos inherentes al sistema y procedentes de la formación en presencia de alta presión y temperatura tienden a formar suspensiones coloidales que afectan notablemente las propiedades reológico-tixotrópicas ocasionando una reducción considerable en el ritmo de penetración y aumentando el riesgo de pegaduras de tubería, por lo cual se hace necesario su control a través de medios físicos y fisicoquímicos que se describen a continuación :

I) MEDIOS FISICOS :

- I. 1. Vibradores.
- I. 2. Desarenadores.
- I. 3. Desarcilladores.
- I. 4. Centrifuga.

II) MEDIOS FISICOQUIMICOS :

- II. 1. Inhibición iónica.
- II. 2. Inhibición por encapsulamiento.
- II. 3. Inhibición a base de aceite.
- II. 4. Tanques de asentamiento y floculado.

I MEDIOS FISICOS :

I. 1. Vibradores.

Artificio mecánico común para eliminar los sólidos perforados. Teóricamente el vibrador remueve los recortes del lodo antes de que sean recirculados y desintegrados por la hidratación ó eroción. Sin embargo ésto es imposible de lograr debido a las fuerzas de desintegración que operan en el sistema de lodo; la acción del vibrador es sólomente una operación de eliminación de fragmentos no colidales.

La vigorosa construcción, simplicidad y seguridad de operación hacen a los vibradores convencionales herramientas para auxiliar la eliminación de sólidos perforados. Actualmente se ha desarrollado otro tipo de vibrador con más eficiencia que los convencionales, éste vibrador tiene doble malla y elimina cantidades más grandes de sólidos y partículas más pequeñas, por lo tanto se elimina más superficie reactiva, lo cual dá como resultado una reducción en la dilución y en el tratamiento químico del fluido de perforación.

I. 2. Desarenadores.

Los desarenadores son hidrociclones cónicos con varios tamaños de conos, usados generalmente para la eliminación de sólidos ó partículas menores a 74 micras. La eliminación se efectúa introduciendo al lodo por la boquilla de alimentación,

la rotación de la mezcla desarrolla una fuerza centrífuga que separa a las partículas más gruesas descargandolas al fondo del desarenador. El lodo limpio y diluido es descargado por la parte alta del cono.

I. 3. Desarcilladores.

Un desarcillador es un banco de conos clasificadores de diámetro pequeño operado a alta presión y alta fuerza centrífuga, mayor que en los desarenadores. La centrifugación permite al desarcillador eliminar efectivamente más del 93 % de sólidos de tamaños de 20 a 40 micras y pueden ser de más ayuda en el mantenimiento de un lodo de bajo contenido de sólidos.

I. 4. Centrifuga.

La centrifuga de decantación de diversas marcas en el mercado es ampliamente usada para recuperar barita en forma económica mientras se eliminan los sólidos perforados de un lodo densificado base agua. Además, la centrifuga a comprobado ser práctica y económica para desarcillar lodos emulsionados de baja densidad y lodos con polímeros.

II MEDIOS FISICOQUIMICOS :

II. 1. Inhibición iónica.

El método preventivo más común para el control de sólidos es la represión electrolítica de hidratación. Los lodos de agua salada y de yeso son ejemplos de sistemas inhibidos que dependen grandemente de los electrolitos para reducir la hidratación y desintegración final de los sólidos. Aún los lodos inhibidos no pueden detener la desintegración eventual de dichos recortes. La dispersión final en lodos base agua dulce será más grande que en los lodos inhibidos.

II. 2. Inhibición por encapsulamiento.

Se basa en la protección contra la desintegración de los recortes por medio de una película formada alrededor de los mismos. Este encapsulamiento permite partículas más grandes en la superficie que son removidas fácilmente por los medios físicos.

II. 3. Inhibición a base de aceite.

Se ha empleado en la prevención de la dispersión e hidratación de lutitas inhibiendo su desintegración a través de la fase continua del aceite. Su acción se refuerza mediante la dispersión de partículas a base de salmueras

monovalentes ó divalentes cercanas a la saturación, de no inhibirse la hidratación se tendrán problemas de derrumbes, fracturamientos ó hinchamiento de las formaciones ocasionando dificultades en las operaciones de perforación llegando en casos extremos a la pérdida del pozo.

II. 4. Tanques de asentamiento y floculado.

Los sólidos del lodo en el rango de 3 a 20 micras son eliminados generalmente por floculación, éstos flóculos aglomerados son asentados en las presas.

La eficiencia del material floculante depende en gran parte de la concentración de sólidos en el fluido y del método de agragar el floculante; los polímeros resultan ser menos económicos conforme aumenta la concentración de sólidos en el lodo.

FACTORES FÍSICOQUÍMICOS.

a) Contaminación por sales.

Las sales solubles comúnmente encontradas durante la perforación, terminación ó reparación de un pozo, causantes de contaminación se pueden dividir en dos grupos; monovalentes y divalentes.

La sal monovalente generalmente encontrada es el cloruro de sodio Na Cl , en una proporción mucho menor se llega a encontrar cloruro de potasio K Cl . Las sales divalentes más comunes es el sulfato de calcio Ca S O_4 , el cual se encuentra en el cemento y en la anhidrita, otras sales divalentes son; el cloruro de calcio Ca Cl_2 , sulfato de magnesio Mg S O_4 y el cloruro de magnesio Mg Cl_2 .

El cloruro de sodio ó sal común se encuentra en domos salinos, rocas con camas de sal, formaciones evaporíticas, flujos de agua salada y agua salobre. La contaminación de un lodo por sal causa un aumento en la viscosidad aparente, punto cedente, gelatinosidad, filtrado y una disminución del pH, por lo que hay que hacer una adecuada selección del fluido para que resista ésta contaminación, debido a que en sistemas tradicionales a base de bentonita en presencia de sal tienden a flocularse incrementando la pérdida de fluido y consecuentemente un desequilibrio en sus propiedades reológicas y tixotrópicas, por lo que es conveniente emplear sistemas a base de salmueras saturadas ó sistemas emulsionados que

contengan salmueras.

El sulfato de calcio causa formación de agregados y floculación en un lodo bentonítico base agua manifestándose un incremento de las propiedades reológico-tixotrópicas por lo que es necesario el empleo de un lodo cálcico para anular la contaminación.

Si se desea conservar el lodo después de que a ocurrido la contaminación será necesario eliminar los iones que causaron la agregación y floculación esto puede hacerse agregando carbonato de sodio, soda Ash ó ceniza ligera. Una regla general práctica consiste en agregar una cantidad pequeña 55 gr/m³ de soda Ash por cada equivalente por millón de 48 ppm de contaminante por ejemplo, si tenemos 500 ppm de contaminante debemos agregar aproximadamente 1 kg de soda Ash por metro cúbico de lodo.

Después de que se ha agregado la soda Ash debe agregarse un dispersante para reducir la viscosidad y la gelatinosidad, si se agregan cantidades excesivas de soda Ash se presenta la precipitación de carbonato de calcio, y el sulfato de sodio tenderá a incrementar la gelatinosidad conocida como Ash gel ó gelatinosidad de ceniza la cual es alta y progresiva. Otra solución a éste problema consiste en dar tratamiento al aumento de viscosidad y filtrado y dejar que el sistema se comporte como un sistema agregado-defloculado, esto puede lograrse usando un ferro-cromolignosulfonato como dispersante, ajustando el pH con sosa cáustica y usando ya sea almidón ó

carboxi-metil-celulosa C M C para controlar el filtrado, ó grandes cantidades de lignosulfonato. Si se usan grandes cantidades de sosa es decir, si se usa un pH alto pueden resultar gelatinosidades de ceniza debido a la solubilización del sulfato de calcio por la sosa cáustica.

Un método común para perforar anhidrita y yeso consiste en pretratar el lodo con un ferro-cromolignosulfonato y sosa, ya que el primero actúa como dispersante efectivo nulificando la contaminación por el calcio.

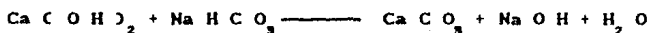
Otros iones divalentes como el cloruro de magnesio, cloruro de calcio y sulfato de magnesio presentan contaminaciones posibles en aguas de la formación, agua de mar y en rocas evaporíticas debido a que el ión magnesio tiene el mismo efecto que el ión calcio y por lo tanto debe tratarse por los mismos métodos, aclarando que el ión magnesio se precipita de una solución como hidróxido de magnesio con un pH mayor de 10; la contaminación está en función de la concentración de éstos.

b) Contaminación por cemento.

Esta contaminación de lodos se presenta durante las cementaciones forzadas ó debido a deficientes operaciones de cementación, el cemento puede contener silicato de calcio, el cual es más dañino en forma de polvo ó semifraguado que

en forma fraguada ó endurecida. Su presencia causará incremento en la viscosidad aparente, punto cedente, gelatinosidad, filtrado y pH.

Cuando se trata ésta contaminación es necesario; reducir el pH, precipitar el ión calcio y dejarlo en el sistema. Un procedimiento común para mantener el lodo dispersado-floculado es tratar el cemento con bicarbonato de sodio Na H C O_3 , el cual a la vez que precipita el calcio baja el pH.



Si la contaminación es leve se puede usar un tetrafosfato de sodio para precipitar el calcio y reducir el pH .

Por adición de un dispersante orgánico cromolignosulfonato con muy poca sosa cáustica ó sin ésta se puede reducir la viscosidad del lodo.

c) Contaminación por gases.

Uno de los problemas asociados con los fluidos de perforación es el entrampamiento de gas ó aire en el lodo. Su retención se manifiesta como gasificación del lodo ó como espuma.

La gasificación del lodo se refiere a la condición en la cual el aire ó gas entrampado se distribuye en todo el lodo; por otra parte la espuma se refiere a la condición en la cual el aire ó gas entrampado emigra rápidamente a la superficie del lodo formando burbujas, la siguiente figura ilustra los dos tipos de entrampamiento.

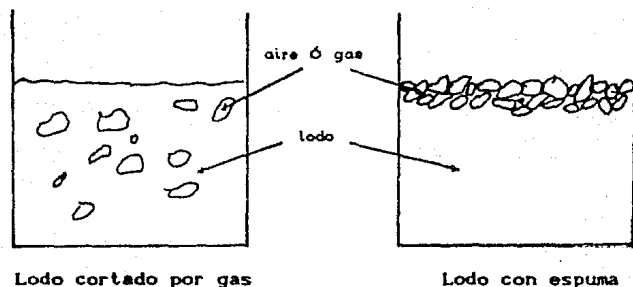


figura (IV. 1)

La contaminación de los lodos por gas ó aire incrementa las propiedades reológico-tixotrópicas en algunos casos, en otros las disminuye ocasionando la inestabilidad de la formación.

La circulación de lodos con éste problema dá por resultado una considerable reducción en la eficiencia de la bomba y en la densidad del lodo, la solución a ésta contaminación consiste en dar tratamientos para reducir el punto cedente y la gelatinosidad.

Los lodos con espuma no son en general un impedimento para perforar ya que el gas ó aire atrapado se concentra en la superficie del lodo y por lo tanto no es circulado. La espuma superficial es el resultado de un complejo fenómeno de tensión superficial, el problema ocurre con mayor frecuencia en lodos que contienen electrolitos disueltos y/o han sido tratados con lignitos, lignosulfonatos ó surfactantes separadamente ó en combinación.

Existen numerosos materiales surfactantes disponibles para el tratamiento de problemas de espuma en los lodos, en la siguiente tabla se muestran algunas aplicaciones.

PRODUCTO	COMPOSICION	APLICACION
Esterato de aluminio	Esterato de aluminio	Agua dulce Agua dura mezclado con aceite
Detergente	Detergente	Agua dulce
Desespumantes	Sulfonato orgánico	Agua salada
Alcohol octílico	Alcohol de cadena larga	Agua dulce

La cantidad requerida de los materiales necesarios para el tratamiento de un lodo siempre es muy pequeña; generalmente de 4 a 20 litros son más que suficientes para tratar un sistema entero de lodo; un sobretratamiento al lodo con un desespumante puede resultar en un proceso reversible.

Los contaminantes gaseosos más comunes y dañinos al fluido de perforación son el dióxido de carbono $C O_2$, oxígeno O_2 y el sulfuro de hidrógeno $H_2 S$. Generalmente el $H_2 S$ proviene de formaciones productoras de gas ó del mismo lodo debido a la degradación de los lignosulfonatos cuando son expuestos a temperaturas mayores ó iguales a $160^{\circ}C$ por grandes periodos de tiempo, así mismo por la reducción bacteriana de sulfatos y sulfuros.

d) Contaminación bacteriana.

El desarrollo ó crecimiento de bacterias oxido-reductoras producto del metabolismo de almidones, celulosas, polizacáridos y dextrinas degradan las propiedades reológico-tixotrópicas y pueden originar que el lodo llegue a ser corrosivo, lo mismo puede suceder en el caso del $H_2 S$ y $C O_2$.

A continuación se muestra una tabla en la que se dan los

medios para el control de los contaminantes mencionados.

ELEMENTOS CONTAMINANTES Y MEDIOS PARA SU CONTROL

AGENTE CONTAMINANTE	FUENTE	TRATAMIENTO TIPICO
Oxígeno	Aereación	Eliminar causas mecánicas de aereación sumergiendo más las pistolas en las presas, bajando mas las descargas de los embudos. Reducir la gel del lodo, mantener un pH de 10 ó más alto según sea el caso , usar un inhibidor amínico y dispersantes orgánicos que actúen como secuestradores de oxígeno.
Sulfuro de hidrogeno (ácido sulfhídrico) (H_2S)	Actividad bacteriana	Agregar un biocida y mantener un pH alto
	Degradación por temperatura	Cambiar el sistema de lodo a surfactante ó base aceite.
	Formación	En lodos de bajo o alto contenido de sólidos mantener un pH alto ó usar inhibidor para formar sales divalentes .
Dióxido de Carbono (CO_2)	Actividad Bacteriana	Agregar un preservativo al lodo.
	Formación	Aumentar la densidad del lodo para prevenir la entrada de gas, mantenga un pH alto, usar inhibidor formador de sales divalentes .

MEDIOS PARA EL DESARROLLO Y CONTROL DE PROPIEDADES

REOLOGICO-TIXOTROPICAS

Para el mantenimiento y control de las propiedades reológico-tixotrópicas de las suspensiones de arcilla en agua se han venido empleando los siguientes reactivos químicos :

A) AGENTES VISCOSIFICANTES Y GELANTES

- Ø Bentonita.
- ω Atapulguita.
- ωω Asbestos.
- (v) Polímeros.

B) AGENTES FLOCULANTES

- Ø Polímeros sintéticos.

C) AGENTES REDUCTORES DE VISCOSIDAD

- Ø Dispersantes inorgánicos.
 - Fosfatos.
- ω Dispersantes orgánicos.
 - Taninos.
 - Lignitos.
 - Lignosulfonatos.

D) AGENTES DEFLOCULANTES

- E) AGENTES HUMECTANTES
- F) AGENTES MOJANTES
- G) AGENTES EMULSIFICANTES
- H) AGENTES LUBRICANTES
- I) AGENTES DESESPUMANTES

A) AGENTES VISCOSIFICANTES Y GELANTES

Ⓛ Bentonita.

Material arcilloso perteniente al grupo de la montmorillonita, desarrolla propiedades reológicas y tixotrópicas al hidratarse en agua dulce, también puede prehidratarse en agua dulce y agregarse al agua de mar ó a lodos con baja salinidad para el control de viscosidad y filtración.

ⓁⓁ Atapulguita.

La atapulguita es un silicato hidromagnesio-aluminio, es usado como material viscosificante para lodos que presentan salinidades menores de 200,000 ppm. La viscosidad desarrollada por éste producto se debe a la unión de sus partículas con estructura en forma de agujas.

ⓁⓁⓁ Asbestos.

Los asbestos son silicatos de calcio-magnesio que trabajan

tanto en lodos base agua dulce como en lodos de baja salinidad dan viscosidad de la misma manera que lo hace la atapulguita debido a la estructura de sus fibras. Su uso está limitado por aspectos de salud en su manejo.

(v) Polímeros.

Los polímeros son usados para controlar diferentes propiedades del fluido de perforación, así mismo sirven para dar viscosidad al fluido. Dentro de los polímeros más usuales se encuentran el carboximetil celulosa C M C , hidroximetil etil celulosa H E C .

El C M C puede usarse en todos los tipos de lodo base agua además puede suspender sólidos en lodos pesados con lo cual disminuye la cantidad de arcilla necesaria, es resistente a contaminaciones bajas de calcio y sal, puede usarse en lodos de pH alto y bajo. Su limitación es a temperaturas arriba de 100 °C a la cual comienza a degradarse. Así mismo al aumentar la concentración de sal disminuye su efectividad por ser menos dispersable.

Debido a que la viscosidad, gelatinosidad y filtrado en un sistema de arcilla dependen de la naturaleza, tamaño, forma y número de partículas hidrófilas e hidrófobas dispersas se hace necesario definir los siguientes conceptos y efectos para que halla un adecuado control de los equilibrios de arcilla con los sistemas formados.

DISPERSION. Propiedad fisicoquímica que mantiene separadas e hidratadas las partículas coloidales responsables del desarrollo de propiedades reológico-tixotrópicas.

AGREGACION. Mecanismo mediante el cual se incrementa el tamaño de partículas coloidales que alteran el comportamiento reológico-tixotrópico debido a la formación de grupos conocidos como agregados, éste mecanismo se controlará mediante una adecuada selección de agentes dispersantes.

FLOCULACION. Fenómeno propiciado por las fuerzas de atracción de las partículas coloidales hidrófilas e hidrófobas que favorecen la formación de grupos ó paquetes que tienden a incrementar de ésta manera las propiedades reológico y tixotrópicas, éste fenómeno se controla mediante agentes que reduzcan las fuerzas de atracción.

DEFLOCULACION. Fenómeno por medio del cual se evita el empaquetamiento de partículas dispersas tanto hidratables como no hidratables, así como también el incremento de la viscosidad.

EFFECTOS :

DISPERSADO-DEFLOCULADO.

En éste tipo de equilibrio la mayoría de las partículas de arcilla del tamaño más pequeño se encuentran con las fuerzas atractivas entre las placas parcialmente neutralizadas, la viscosidad plástica será la más alta de los cuatro estados, y

el lodo se moverá con mayor facilidad; el punto cedente será bajo si hay suficiente dispersante en el lodo, ya que entre más bajo sea el punto cedente menos esfuerzo a moverse tendrá el lodo; el filtrado será el mínimo de los cuatro estados debido a lo pequeño del tamaño de las partículas; la gelatinosidad será baja pero progresiva, baja a cero minutos y alta a diez lo cual es benéfico.

DISPERSADO-FLOCULADO.

En ésta condición las partículas han sido atraídas formando grupos reduciendo así el volumen de arcilla por lo tanto, la viscosidad plástica será menor que en un sistema dispersado-defloculado; el punto cedente será más alto debido al incremento de las fuerzas de atracción; la gelatinosidad será alta y progresiva debido a la gran fuerza entre las partículas; el sistema exhibirá un pobre control de filtrado debido a la gran cantidad de partículas que darán un enjarre suave y grueso.

AGREGADO-FLOCULADO.

La adición de iones divalentes ó polivalentes causa paquetes ó montones de placas en grupos reduciendo así el volumen de arcilla, por lo tanto la viscosidad plástica será más baja que en un sistema dispersado-floculado; el punto cedente será alto debido al incremento de fuerzas entre las partículas; el sistema tendrá pobre control de filtración debido al agrupamiento y amontonamiento de las partículas de arcilla; la gelatinosidad es generalmente alta y no

progresiva.

AGREGADO-DEFLOCULADO.

En un sistema de este tipo el volumen de arcilla es bajo debido al amontonamiento de las partículas de arcilla, por lo tanto la viscosidad plástica es baja; las fuerzas entre las partículas se reducen ocasionando que el punto cedente sea bajo; la gel será baja y no progresiva; el filtrado será alto a menos que se agreguen grandes cantidades de un agente de control de filtración.

B) AGENTES FLOCULANTES.

Ø Polímeros sintéticos.

Los ortofosfatos $\text{Na}_3\text{P O}_4$, $\text{Na}_2\text{H P O}_4$ y $\text{Na H}_2\text{P O}_4$ son agentes floculantes que tienden a cuagular las partículas de arcilla suspendidas incrementando así la viscosidad del fluido. Los ortofosfatos han encontrado uso ilimitado en el tratamiento de fluidos contaminados por cemento ó anhidrita.

C) AGENTES REDUCTORES DE VISCOSIDAD.

Los dispersantes se usan para controlar la viscosidad aparente de un lodo sin el uso de grandes cantidades de agua para diluir. Se han usado muchos materiales como dispersantes químicos con varios grados de éxito, los de uso común se

clasifican de acuerdo a su naturaleza orgánica e inorgánica.

○ Dispersantes inorgánicos.

-Fosfatos.

Estos materiales se usan generalmente en lodos base agua y son efectivos en bajas concentraciones. El fosfato usado en el medio petrolero es el Pirofosfato Tetrasódico de fórmula $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$, éste es usado en lodos sometidos a temperaturas menores de 50°C , y de bajo contenido de sólidos no dispersos tanto pesados como ligeros.

Los fosfatos controlan el valor de cedencia, el esfuerzo gel y grados bajos de filtración especialmente en presencia de cantidades pequeñas de calcio.

Otros fosfatos de uso común :

Pirofosfato ácido de sodio	$\text{Na}_2\text{H}_2\text{O}_7$
Hexametáfosfato de sodio	$(\text{NaPO}_3)_6$
Tetrafosfato de sodio	$\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{18}$

La limitación de los polifosfatos está sujeta a su reversión a simples fosfatos en presencia de agua y a temperaturas menores de 54°C , con la consecuente pérdida de su habilidad dispersante. Cuando existe contaminación con sal digamos 5,000 ppm de cloruros los fosfatos no funcionan eficientemente como dispersantes debido al efecto floculante de la sal.

Si existe una contaminación con calcio ó magnesio se formará un complejo de polifosfato ó un ortofosfato del metal de los iones contaminantes, limitando su habilidad para dispersar pero precipitando los contaminantes. Si se llegan a usar fosfatos en exceso pueden producirse altas viscosidades después de haber obtenido en un principio bajas viscosidades.

4) Dispersantes Orgánicos.

-Taninos.

Antiguamente los lodos tratados con quebracho se conocían como lodos rojos debido al intenso color rojo que ese producto imparte al lodo. Actualmente sólo se trabajan algunos taninos cuyas marcas más conocidas son el supertan y el Q-tan, los cuales se clasifican como taninos modificados, son usados en medio alcalino de 8 a 9.5 de pH y en una concentración de 10 a 15 kg/m³. También se utilizan a profundidades someras para controlar la viscosidad y gelatinosidad del lodo a temperaturas menores de 99 °C su uso es muy recomendable ya que funcionan muy bien a altas concentraciones, el rango de pH para éste tipo de lodos es de 8.5 a 10 y se puede incrementar de 11 a 11.5 cuando se tienen concentraciones de cloruros mayores de 11,000 ppm .

Las altas concentraciones de sal los hacen inefectivos como reductores de viscosidad ya que el efecto floculante de la sal es fuerte lo que limita su solubilidad.

-Lignitos.

Los compuestos de lignina están clasificados como ácidos húmicos y están constituidos por materia vegetal descompuesta. Los lignitos constituyen un dispersante químico barato para controlar la viscosidad aparente, punto cedente, gelatinosidad y filtrado de un lodo, son valiosos principalmente cuando se tienen grandes temperaturas de fondo ya que presentan una gran resistencia a la degradación a altas temperaturas. El cromolignito más usado actualmente es el de nombre comercial Lignex se usa en una concentración aproximada de 12 kg/m^3 con un pH de 9 a 9.5, soporta temperaturas por arriba de los 200°C siendo actualmente soluble en agua.

En virtud de la naturaleza ácida de éstos productos se hace necesario en algunos casos el uso de sosa cáustica para lograr su solubilidad, en otros casos los lignitos bienen ya presolubilizados lo cual implica el uso mínimo de sosa cáustica.

El uso de lignito cáustico ó lignito con sosa cáustica y aceite en agua dulce ha probado ser un sistema complejo de lodo de bajo contenido de sólidos. Una cantidad pequeña de bentonita ó material coloidal de los recortes así como el aceite, pueden funcionar como lignito para proveer la capacidad de acarreo y el control de filtración necesarios para muchas operaciones sencillas de perforación. Esta emulsión de lignito con bajo contenido de sólidos se hace con ventaja para perforar en áreas donde pueden usarse bajas densidades y

donde la liofilización de las luitas no es un problema, con el uso de ésta emulsión se obtiene a menudo altos avances en la perforación, mayor vida de barrena y reducción de costos. Son ineficientes cuando hay temperaturas mayores de 100 °C y concentraciones de sal arriba de 50,000 ppm debido a su limitada solubilidad en presencia de sal y al fuerte efecto floculante de ésta.

Los siguientes factores son críticos en el mantenimiento de los lodos lignito-surfactante :

- El pH debe mantenerse dentro del rango fijado, si es más alto de 10 el lignito será sobresolubilizado resultando propiedades de filtración pobres. Con pH bajo de 8.5 el lignito tendrá solubilidad limitada y funcionará mal como dispersante.

- El mantenimiento deberá darse como a un lodo base agua; tiene una tolerancia limitada a los electrolitos contaminantes tales como la sal, yeso y cemento en algunos casos, toleran cantidades moderadas de sal aumentando el pH arriba del valor normal.

- Para conservar propiedades de flujo satisfactorias a temperaturas extremadamente altas el contenido de arcilla debe mantenerse bajo de 1 a 1.6 de capacidad de azul de metileno; el contenido apropiado de arcilla se mantiene por dilución ó remoción mecánica.

- No es efectivo adicionar más dispersantes para combatir la gelatinización por alta temperatura causada por excesivo contenido de arcillas.

-Lignosulfonatos.

Los lignosulfonatos son subproductos procedentes del blanqueo a base de bisulfito ó sulfato que se aplica sobre la pulpa de la madera , son reactivados con fierro, calcio ó cromo para formar las diferentes variedades comerciales de éstos materiales dispersantes.

El lignosulfonato de calcio se emplea para el control de viscosidades y gelatinosidades en lodos cálcicos , trabaja con un pH de 8 a 9.5 también se ha empleado para el control de la hidratación de partículas procedentes de lutitas perforadas.

El lignosulfonato más usual es el ferrocromolignosulfonato que trabaja en cualquier tipo de lodo base agua, lodos de yeso, cálcicos, saturados y lodos para controlar lutitas, usando pH alto ó bajo, puede utilizarse como dispersante y reductor de filtrado siendo resistente a las contaminaciones comunes y a las altas temperaturas actuando además como emulsificante al agregar aceite ó diesel al lodo sin necesidad de usar otro material.

En lodos base agua los lignitos ó cromolignitos y lignosulfonatos funcionan independientemente. Las figuras 1,

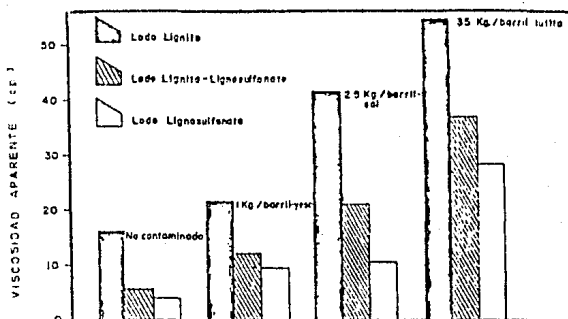
2 y 3 comparan los efectos de varios contaminantes sobre la viscosidad aparente, gelatinosidad y filtrado de un lodo lignito, lignosulfonato y cromolignosulfonato. Estos datos muestran que el lignito ó cromolignito y el sulfonato son compatibles; pero indican que no hay efecto sinérgico entre los mismos.

D) AGENTES DEFLOCULANTES.

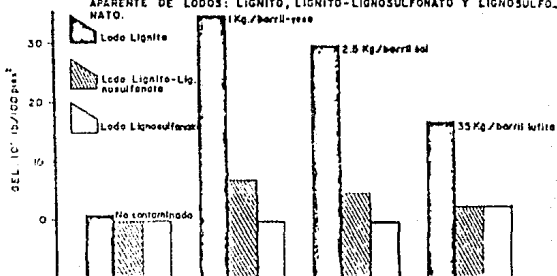
Entre las muchas formas de fosfatos de sodio, los pirofosfatos $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ y $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$, el metafosfato $(\text{NaPO}_3)_n$ y el tetrafosfato $\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$, son defloculantes que tienden a dispersar las suspensiones coloidales de arcilla a temperaturas mayores de 100°C , son efectivos para tratar fluidos de perforación que se han contaminado con anhidrita y cemento.

E) AGENTES HUMECTANTES.

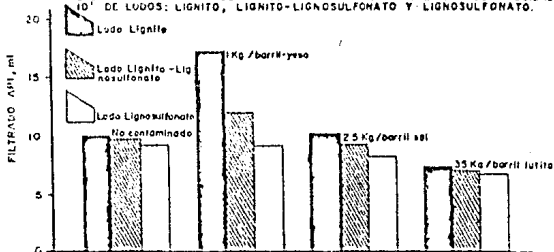
Funcionan alterando las propiedades de superficie de las fases líquida y sólida del lodo impartiendo ciertas características de mojadura; son afectados notablemente por la naturaleza de los sólidos contaminados; los humectantes como, los jabones y detergentes son surfactantes que pueden usarse como agentes mojanos, emulsificantes, lubricantes y agentes espumantes ó desespumantes.



EFFECTO COMPARATIVO DE VARIOS CONTAMINANTES SOBRE LA VISCOSIDAD APARENTE DE LODOS: LIGNITO, LIGNITO-LIGNOSULFONATO Y LIGNOSULFONATO.



EFFECTO COMPARATIVO DE VARIOS CONTAMINANTES SOBRE LA GELATINOSIDAD DE LODOS: LIGNITO, LIGNITO-LIGNOSULFONATO Y LIGNOSULFONATO.



EFFECTO COMPARATIVO DE VARIOS CONTAMINANTES SOBRE EL FILTRADO API DE LODOS: LIGNITO, LIGNITO-LIGNOSULFONATO Y LIGNOSULFONATO.

F) AGENTES MOJANTES.

Su uso común es en el tratamiento de una variedad de lodos base agua cuando la eficiencia de los tratamientos convencionales son marginados por un aumento de sólidos arcillosos y conforme aumenta la temperatura de fondo. El tratamiento con un agente mojante mejora las propiedades reológico-tixotrópicas y filtrantes de dichos lodos. Otro tipo de agente mojante son los ésteres de glicerilo, los cuales mejoran la lubricidad del lodo, reducen la torsión, aumentan la vida de la barrena y emulsifican el aceite en lodos base agua.

G) AGENTES EMULSIFICANTES.

Sirven para emulsificar el aceite en agua. Muchos de los aditivos como los dispersantes orgánicos, arcillas y almidones usados en lodos convencionales poseen propiedades de estabilización de emulsiones, debido a esto el uso de emulsificantes surfactantes está limitado a aplicaciones especiales. En lodos base agua salada emulsionados dichos surfactantes no serán estables a temperaturas mayores de 65 °C .

H) AGENTES LUBRICANTES.

Un lubricante es un material que reduce la fricción entre dos superficies sólidas que se mueven una contra otra, su eficiencia está estrechamente relacionada con las condiciones

de uso, están diseñados para ampliar las propiedades de lubricación de los lodos y mejorar las operaciones de perforación. Es necesario usarlos en condiciones adecuadas y emulsionarlos apropiadamente en el lodo, un factor importante que influye en la cantidad de lubricante requerido es el contenido de aceite en el lodo, a menudo que éste aumente se requiere proporcionalmente más lubricante.

1) AGENTES DESESPUMANTES.

La excesiva retención de gases en el lodo se manifiesta como gasificación del lodo ó como espuma. Pueden usarse en todos los sistemas de lodo base agua y en lodos base agua salada.

C A P I T U L O V
C O N C L U S I O N E S

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

C O N C L U S I O N E S

Los fluidos de perforación son sistemas coloidales base agua ó aceite definidos por un comportamiento reológico y tixotrópico que bajo la acción de esfuerzos tienden a deformarse originando un determinado patrón de flujo, laminar, turbulento ó tapón que representa un aspecto fundamental en las operaciones inherentes a la perforación.

El flujo turbulento favorece la limpieza del agujero, sin embargo puede causar la erosión de las paredes del pozo, por lo que se recomienda cambiar a un regimen de flujo laminar por evitar éste problema y facilitar el transporte de los recortes a la superficie, ver figura V. 1 .

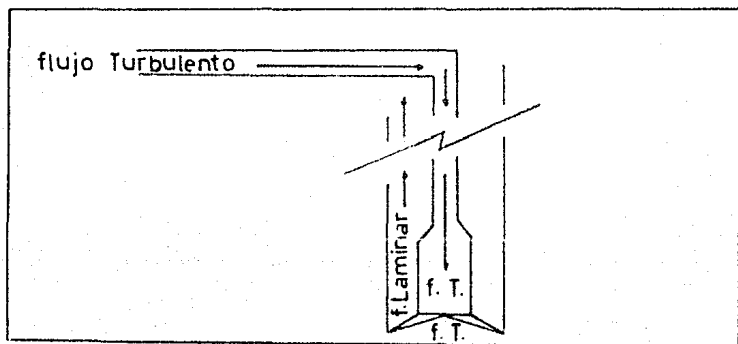


figura (V. 1)

Para que el fluido de perforación cumpla con las funciones de acarreo, remoción y suspensión es necesario mantener sus propiedades reológico-tixotrópicas mediante su continua evaluación a través del uso de viscosímetros rotacionales y otros dispositivos como el embudo Marsh que nos auxilia en forma rápida y eficaz en la obtención cualitativa de las condiciones de flujo del lodo.

De la veracidad de la información obtenida a través de las propiedades reológico-tixotrópicas dependerá el programa de tratamiento que se le dé al sistema hidráulico para que se realicen con éxito las operaciones de perforación.

BIBLIOGRAFIA

B I B L I O G R A F I A

- Apuntes de la materia de Fluidos de perforación
Miguel A. Benítez H. , Francisco Garaicochea P. ,
Ciro Reyes A.
U . N . A . M .

- Apuntes de la materia de Mecánica de fluidos
Roberto A. Castro F. , Raúl León V. ,
Rafael Rodríguez N.
U . N . A . M .

- Ingeniería de Producción del petróleo
Lester Charles Uren
Cía. Ed. Continental S. A.

- Composition and properties of oil well drilling
fluids
Walter F. Rogers

- Drilling practices Manual
Preston L. Moore
The petroleum Publishing Co.

- Manual de tecnología de lodos
I M P

- Reología de fluidos no newtonianos a través de
conductos circulares
I M P

- Drilling mud and cement slurry rheology manual
R. Monicard
Editions technip , París 1982

- Sistemas para obtener una óptima remoción de sólidos de los fluidos de perforación
I M P subdirección de capacitación

- Normas de calidad para aditivos empleados en los fluidos de perforación
I M P subdirección de explotación

- Operating instructions Fann viscosimeter
NL Baroid / NL Industries, Inc.