

29
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

IMPLEMENTACION DE UN PROGRAMA EN
COMPUTADORA PERSONAL PARA
CARACTERIZACION REOLOGICA DE LOS
FLUIDOS DE PERFORACION BASE - AGUA,
EMPLEADOS EN LA PERFORACION DE POZOS
GEOTERMICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

OSCAR NOE RUIZ MALDONADO



DIRECTOR DE TESIS,

Dr. Eduardo González Partida

México, D. F.

1992

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.

INDICE

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCION | 6 |
| CAPITULO I GENERALIDADES | 7 |
| CAPITULO II FLUIDOS DE PERFORACION | 19 |
| II.1 Definición de Fluido de Perforación | 20 |
| II.2 Funciones de los Fluidos de Perforación | 20 |
| II.3 Criterios para Seleccionar Fluidos de Perforación | 22 |
| II.4 Propiedades del Fluido para una Óptima Perforación | 26 |
| II.5 Tipos de Fluidos de Perforación | 29 |
| II.5.1 Fluidos de perforación base aire-gas | 30 |
| II.5.2 Fluidos de perforación base agua | 32 |
| II.5.3 Fluidos de perforación base aceite | 34 |
| II.6 Fluidos de Perforación Usados en Pozos Geotérmicos | 35 |
| CAPITULO III REOLOGIA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION | 40 |
| III.1 Conceptos Reológicos | 41 |
| III.1.1 Relajación e histéresis | 44 |
| III.1.2 Estructura de la materia en relación a su comportamiento elástico o plástico | 48 |
| III.1.3 Tipos de enlaces iónicos | 51 |
| III.2 Correlación entre medidas relativas y absolutas de viscosidad | 59 |
| III.3 Clasificación Reológica de Fluidos de Perforación | 60 |
| III.3.1 Fluidos independientes del tiempo | 60 |
| III.3.2 Fluidos dependientes del tiempo | 64 |
| III.3.3 Fluidos viscoelásticos | 66 |
| III.3.4 Fluidos complejos | 70 |
| III.4 Variables que Caracterizan el Comportamiento Reológico | 73 |
| III.4.1 Viscosidades efectivas de circulación | 80 |
| III.4.2 Descripción general del análisis gráfico | 81 |
| III.5 Relación entre Variables y Modelos Reológicos | 83 |

| | |
|---|------------|
| III.5.1 Efecto de variables reológicas en lodos de perforación | 83 |
| III.5.2 Modelos Reológicos | 106 |
| CAPITULO IV IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA DE COMPUTO | 120 |
| IV.1 Panorama General | 121 |
| IV.1.1 Características del Programa de Cómputo | 122 |
| IV.2 Lenguaje y Variables de Cómputo | 130 |
| IV.3 Diagrama de Bloques | 137 |
| IV.4 Presentación de Resultados | 157 |
| CAPITULO V DISCUSION DE RESULTADOS | 170 |
| V.1 Observaciones al Programa de Cómputo | 171 |
| V.2 Validación del Programa de Cómputo | 176 |
| V.3 Alternativas al Programa de Cómputo | 180 |
| V.4 Aplicaciones del Programa de Cómputo | 181 |
| CAPITULO VI CONCLUSIONES | 183 |
| NOMENCLATURA | 186 |
| VOCABULARIO REOLOGICO | 189 |
| APENDICES | 200 |
| BIBLIOGRAFIA | 207 |

INTRODUCCION

La importancia del petróleo como recurso energético es indiscutible ya que es un arma estratégica en el aspecto económico, político y social a nivel mundial. Pero no todos los países cuentan con reservas de hidrocarburos para satisfacer sus necesidades de consumo interno, por tal motivo diversas naciones han invertido cuantiosos capitales en tecnologías sofisticadas alternas para la obtención de energéticos, como ejemplos se pueden citar a la energía nuclear y la explotación de yacimientos de esquistos bituminosos entre otras.

Una de las aplicaciones que se le da a los hidrocarburos es su utilización para la generación de energía eléctrica. Una alternativa viable para generar éste y otros tipos de energía es mediante la explotación de los yacimientos geotérmicos, que entre sus ventajas se ofrece una inversión económica menor respecto a otras alternativas energéticas, desarrollo de una infraestructura propia y una reducción en el impacto ecológico.

Obviamente también se requieren de tecnologías especiales, entre ellas la de los fluidos de perforación, que deben cumplir con las funciones básicas de acarreo, suspensión de recortes y estabilización del agujero. Funciones difíciles de lograr si no se tienen propiedades reológico - tixotrópicas estables. En especial a temperaturas mayores de 180 °C.

El objetivo de este trabajo es estructurar un programa de cómputo basado en un análisis bibliográfico que incluya datos experimentales que alimenten a métodos y modelos matemáticos tradicionales y modificados, que definan el comportamiento reológico como una función de la velocidad de corte, a elevadas temperaturas y presión, como es el caso de los yacimientos geotérmicos; así como la determinación de parámetros tixotrópicos básicos, todos ellos necesarios para el control efectivo del fluido de perforación.

CAPITULO I

GENERALIDADES

TEMAS CONTENIDOS EN EL CAPITULO:

- . Exploración de Campos Geotérmicos Nacionales
- . Perforación Geotérmica
- . Reseña Histórica de la Reología y su Importancia en la Perforación de pozos
- . Problemas Frecuentemente Encontrados en la Perforación de Pozos Geotérmicos o petroleros
- . Importancia de la Información para el Desarrollo de un Campo Geotérmico

Dentro de este capítulo se presentará un panorama general de la exploración, de la perforación y los problemas típicos encontrados en los campos geotérmicos nacionales, las diferencias existentes entre la perforación petrolera y geotérmica, así como la importancia que tiene la información de la geología en este último contexto.

. Exploración de Campos Geotérmicos

Se mencionarán brevemente algunas características de los campos geotérmicos nacionales. V. M. Arellano¹.

Cerro Prieto

Es el desarrollo geotérmico más importante de México y se encuentra localizado en el estado de Baja California Norte. Este campo es actualmente el segundo más grande del mundo.

La exploración superficial del campo se inició en 1958, la perforación del primer pozo fue en 1959, en tanto la producción de energía se inició en 1973. Hasta el año de 1984 se habían perforado 144 pozos, de los cuales 103 eran productores, 30 exploratorios y 11 fallidos. La capacidad instalada es de 620 MW. De 1973 a 1985 se generaron 11,041 GWH, lo que permitió un ahorro de 17'779,674 bl equivalentes de petróleo.

Existe un yacimiento entre los 650 - 1300 m de profundidad en el área denominada Cerro Prieto I, en rocas sedimentarias de origen deltáico sobre roca intrusiva granítica. La prolongación del yacimiento hacia la zona NE está comprendida entre 2000 - 3000 m de profundidad, que es el área denominada Cerro Prieto II y III. Los pozos M-201 y M-202 tienen un rango de profundidad de los 3500 - 4100 m donde se han detectado temperaturas del orden de los 300 °C. La porosidad promedio de la formación es aproximadamente del 8%, mientras que la permeabilidad horizontal varía entre 20 y 50 md y la permeabilidad vertical entre 1 y 3 md.

Los Azufres

Este campo se encuentra localizado en el estado de Michoacan,

en 1975 se iniciaron los primeros estudios sistematizados de exploración.

El primer pozo perforado fue en 1976, en el campo se han terminado 52 pozos, de los cuales 29 fueron productores, 17 fallidos y 6 inyectores.

Es un yacimiento de liquido dominante en rocas volcánicas fracturadas de edad Mioceno - Plioceno que se extiende desde los 600 m a profundidades mayores de 2500 m. Este cubre un área de 25 Km², en la zona sur el yacimiento presenta condiciones de producción en dos fases, con pozos de vapor y agua a profundidades de 600 a 1000 m y pozos de vapor seco a profundidades de 1000 m.

La capacidad energética del campo es estimada en 300 MW. y en base a ella es programada la construcción de una central geotermoeléctrica. En la zona norte existen 10 pozos productores, que aportan 579 ton. vapor / h a 10 bar de presión, que representa el 83 % de los requerimientos de una central de 55 MW. Actualmente se tienen cinco unidades turbogeneradoras móviles de 5 MW. cada una, con una capacidad instalada de 25 MW.

Los Humeros

Este campo se encuentra ubicado en el estado de Puebla. Los primeros estudios preliminares de geología, geofísica y geoquímica fueron en 1968, pero hasta 1977 se inician los trabajos formales. Las perforaciones empiezan en 1979 y se han terminado 21 pozos con profundidades de 1458 a 3104m. El yacimiento geotérmico se ubica en el interior de la caldera de los Humeros, en una secuencia de rocas andesíticas, ignimbritas y tobáceas que yacen sobre calizas e intrusiones graníticas; se han registrado temperaturas del orden de 250 a 348 °C en las rocas volcánicas y hasta 360° C en el basamento calcáreo e intrusivo que es prácticamente impermeable.

Este campo está constituido principalmente por dos zonas: Colapso Central y Colapso de los Potreros; la primera zona tiene un área de 9 km², cuenta con 12 pozos terminados, de los cuales 6 son productores, uno es inyector, cuatro están en calentamiento y uno es fallido. La producción de vapor total es de 286 ton. vapor

por hora a 10 bar de presión, equivalentes al 38 % de los requerimientos de una planta de 55 MW. . En la parte sur de la segunda zona se han terminado 4 pozos, de los cuales 3 son productores y uno fallido. Su producción de vapor es de 120 ton / hora a 10 bar . Actualmente, se han instalado 3 plantas a boca de pozo de 5 MW. cada una en la parte sur del Colapso de los Potreros, para tener una capacidad instalada de 15 MW .

La Primavera

El campo se encuentra en el estado de Jalisco, su desarrollo inició en 1980 y se han terminado 10 pozos a profundidades de 668 a 2986 m. El yacimiento geotérmico se ubica en el interior de la Caldera de la Primavera, donde hay rocas volcánicas de composición andesítica y riolítica con temperaturas del orden de 285 a 305 °C .Aparentemente el yacimiento está limitado a una profundidad de 2840 m por rocas granodioríticas de un cuerpo intrusivo de edad premiocénica.

De los 10 pozos terminados, tres son productores, tres en proceso de evaluación, dos no se han terminado, uno inyector y otro es fallido. Preliminarmente, se ha estimado que el yacimiento en una área de 2 km² tiene capacidad para una planta de 30 MW., si bién todo el potencial del yacimiento podría ser superior a los 100 MW. La producción total de los pozos evaluados es 130 ton / h a 10 bar de presión, que es suficiente para generar 10 MW. y por lo mismo se ha decidido la instalación de dos plantas a boca de pozo de 5 MW. cada una, con una capacidad instalada de 10 MW .

Perforación Geotérmica

Los recursos geotérmicos que se encuentran cerca de la superficie pueden tomar muchas formas: hidrotermales, geopresurizados y roca seca caliente. Entre los primeros se encuentran los yacimientos de agua caliente y/o vapor que son los más comunmente explotados. Las técnicas de perforación son completamente similares a las utilizadas en la perforación de pozos petroleros.

Los pozos geotérmicos generalmente tienen un diámetro mayor que los pozos petroleros o de agua. Las profundidades del yacimiento varían de 1 a 4 km., normalmente son muy calientes (200 - 300 °C) y son utilizados para la generación comercial de energía eléctrica.

En las fases de perforación de un pozo geotérmico se tienen:

. Planeación del pozo

Antes de que haya cualquier actividad en la prospección de la localización del pozo, es necesario obtener información que permita diseñar y seleccionar la localización del pozo.

. Preparación del lugar

La topografía frecuentemente limita el número de posibles localizaciones de los lugares a perforar. La preparación del lugar a perforar representa aproximadamente el 5 % del costo total del pozo.

. Operaciones de perforación

El equipo utilizado en la perforación geotérmica prácticamente es el mismo utilizado en la perforación petrolera: La torre de perforación, la barrena, las tuberías de perforación, los lastrabarrenas, la mesa rotaria, el lodo de perforación y las tuberías de revestimiento. Obviamente también se efectúan cementaciones, toma de registros y terminaciones.

Una de las diferencias que se encuentra en el equipo es el uso de una torre de enfriamiento, que tiene como objetivo reducir la temperatura del lodo al salir del sistema de circulación.

En cuanto al fluido de perforación utilizado en los campos geotérmicos su selección dependerá del tipo de formación que se esté perforando, del grado de compactación de la misma, de su composición y otros varios factores.

Las tuberías usadas en este tipo de pozos son las mismas que se utilizan en la perforación convencional de pozos petroleros, aunque existen tuberías de aleaciones especiales.

Entre los problemas asociados a la perforación geotérmica se encuentran las altas temperaturas que promueven a su vez un

ambiente corrosivo. Esta corrosión puede ser debida al hidrógeno, si el yacimiento contiene H₂S o es debida a la inducción de oxígeno cuando el aire es usado como fluido de perforación. Además el aire causa erosión en el equipo por las altas velocidades que se manejan para la elevación de los recortes de la formación a la superficie. De ahí que se hayan probado el uso de gases inertes como fluido de perforación.

Frecuentemente en la perforación de pozos geotérmicos, donde las pérdidas de circulación son comunes, el fluido de perforación a utilizar son los base agua. La constitución primaria de este fluido es agua y arcilla, dichas arcillas pueden ser bentonita, atapulgita y sepiolita; empleadas para incrementar la viscosidad del lodo. Esta propiedad tiende a incrementarse en forma muy significativa a temperaturas mayores de 180 °C, provocando la gelación del lodo. Si no se controla este problema puede llegarse a tener fluido inbombeable con un equipo de perforación convencional.

Para este problema se han diseñado y desarrollado polímeros sintéticos que controlan el filtrado del lodo y por ende las propiedades reológicas - tixotrópicas requeridas.

Reseña Histórica de la Reología y su Importancia en la Perforación de Pozos

En el transcurrir de los años se ha venido introduciendo una serie de aportaciones directas e indirectas al estudio de la reología, es por tal motivo que se presenta un panorama general de estos estudios:

| Año | Aportación Realizada |
|------------|--|
| 1662 | Ley de Boyle, ecuación termodinámica de estado de los gases. |
| 1676 | Ley de Hooke, dice que la deformación que sufre un |

- cuerpo es proporcional al esfuerzo aplicado.
- 1686 Ley de flujo viscoso de Newton, considera el comportamiento de un fluido ideal, el esfuerzo al movimiento es proporcional a la velocidad de corte.
- 1867 James Clerk Maxwell, sostiene que todas las sustancias poseen viscosidad y elasticidad al estar sometidas a esfuerzos.
- 1847 Poiseuille estudió el flujo a través de tubos capilares, derivó de sus experimentos, la relación entre la presión y la velocidad de flujo volumétrico para fluidos Newtonianos.
- 1920 a 1930 Existen gran variedad de tipos de comportamientos reológicos no Newtonianos. E. Bingham, W. Weissen Berg, M. Reiner, G. W. Scott, Blair.

La optimización de las operaciones de perforación y su éxito dependen directamente de la reología de los lodos de perforación y de las propiedades tixotrópicas del mismo, de tal manera que se tenga un control efectivo en el acarreo y suspensión de recortes, así como en la estabilización del agujero. Para ello es importante contar con información de laboratorio confiable y representativa de los fluidos de perforación a condiciones de trabajo, que no es fácil de conseguir, especialmente en pozos geotérmicos. Lo ideal sería contar con un viscosímetro Fann modelo 50 C, el cual puede manejar temperaturas del orden de los 260°C, presiones en un rango de [0,1000] lbr/pg² y velocidades de corte de [0,1024] seg⁻¹. En caso desfavorable se debe de contar con un viscosímetro Fann 35 de velocidad variable. En cuanto al bob, camisa y resorte del primer viscosímetro, tiene varios juegos intercambiables, entre los cuales tiene las características del segundo viscosímetro. Es por ello que se manejarán estas características en particular.

Constantes del aparato:

$$R_c = 1.8415 \text{ cm} \quad h_c = 4.050 \text{ cm}$$

$$R_b = 1.7250 \text{ cm} \quad \beta = R_c/R_b = 1.0678$$

Problemas Frecuentemente Encontrados en la Perforación de Pozos Geotérmicos y Petroleros

Como un panorama general se pueden enumerar los problemas más comunes encontrados en la perforación de pozos geotérmicos sin olvidar que también se presentan en pozos petroleros. Haciendo una diferencia entre los pozos geotérmicos y los pozos petroleros se encuentra un aspecto único en los primeros. J. Kelsey and C. Carson².

- 1.- Deshidratación y gelación por temperatura del lodo
- 2.- Filtración en zonas permeables
- 3.- Pegaduras de tubería por presión diferencial
- 4.- Derrumbes de la formación y atrapamientos de tubería
- 5.- Pérdidas de circulación en zonas fracturadas o vulgares
- 6.- Corrosión e incrustación en tuberías y equipo.

Los pozos geotérmicos típicamente tienen un costo de 2 a 4 veces más que un pozo petrolero, considerándolos a la misma profundidad. Sin olvidar que la profundidad de estos últimos es mayor que la de los primeros. Las razones por las cuales son más costosos son las siguientes:

. Temperatura

En yacimientos de aceite y gas raramente se excede de 100 °C, mientras que, en pozos geotérmicos para fines de generación eléctrica, por lo menos se encontrarán temperaturas del orden de 180 °C o mayores.

Las elevadas temperaturas afectan dramáticamente a los componentes elastoméricos de los fluidos de perforación, a las tuberías y al cemento.

. Formación

Los recursos geotérmicos generalmente se encuentran en áreas geológicas ígneas (andesitas, dacitas, riolitas, ignimbritas,

rocas graníticas, basaltos, tobas, piroclásticos) mientras que en los yacimientos petroleros son formaciones de origen sedimentario (calizas, areniscas, dolomias, etc.). Respecto a su dureza no se podrá generalizar entre cada una de ellas, se tendrá que analizar cada caso en particular y considerar factores tales como: consolidación, compactación, y módulo de elasticidad entre otros.

. Fluidos

La gran naturaleza salina de los fluidos geotérmicos y del yacimiento, tiende a incrementar la velocidad de corrosión en los componentes del pozo, la disolución del contenido de sólidos en el fluido producido puede causar severos problemas de incrustación durante la etapa de producción, llegando a obturamientos totales de la tubería en casos severos.

. Presión

Los yacimientos geotérmicos son típicamente despresurizados, principalmente "in-situ", es decir la presión de la formación es menor que la presión de la columna hidrostática. Este problema guía a las pérdidas de circulación del fluido de perforación (el fluido no regresa a la superficie) así como la obtención de cementaciones pobres. Este no es un problema exclusivo de la geotermia, pero es más frecuente y severo que en la perforación de pozos petroleros por la naturaleza del yacimiento.

. Corrosión

Las altas temperaturas y la naturaleza tanto de los fluidos como de la formación favorecen un ambiente altamente corrosivo, por lo que en la toma de registros eléctricos se requiere de equipo y cable especial.

Importancia de la Información para el Desarrollo de un Campo Geotérmico

En cuanto a la información requerida para el desarrollo un proyecto geotérmico es fundamental para poder decidir si se

desarrollará y explotará el campo de interés.

A continuación se presentan las etapas y la información requerida para un proyecto geotérmico completo. T. Casadevall et al.⁹

ETAPAS

. Estudio de Reconocimiento

. Estudio de Prefactibilidad

. Estudio de Factibilidad

EXPLORACION

. Desarrollo

. Explotación

EXPLOTACION

La información puede ser clasificada en los siguientes criterios:

1.-Criterios Geocientíficos

- Geológicos

1.1 Geológicos Vulcanológicos

Correlaciones estratigráficas de pozos, alteraciones hidrotermales, hipótesis de ubicación de la fuente de calor, límites de campo, eventos volcánicos ocurridos, formaciones

litoestratigráficas.

1.2 Estructurales

Definición estructural global, local, definir sistemas de fracturamiento, definición del sistema de fallas.

1.3 Estratigráficos

Obtención de la secuencia litológica de los pozos, definición de las componentes litológicas (cubierta, capa sello, yacimiento, basamento).

1.4 Geohidrológicos

Definición de la cuenca de carga, definición de zonas y flujos de recarga, identificación de los diferentes acuíferos de las zonas características geohidrológicas del yacimiento, características hidroquímicas e isotópicas del acuífero, definir el modelo preliminar geohidrológico.

- Geoquímicos

El conocimiento geoquímico de los fluidos geotérmicos es fundamental para determinar su procedencia, su interacción, su temperatura de origen. También se requiere conocer la distribución de temperaturas con ayuda de los geotermómetros. Características geoquímicas de los diferentes acuíferos existentes en el campo. Delimitación superficial del campo.

- Geofísicos

Es necesario conocer las estructuras del subsuelo. El método a utilizar dependerá del medio geológico.

Se tendrán que comprobar las anomalías electromagnéticas con un mínimo de dos métodos. Interpretación de las anomalías: electromagnéticas, gravimétricas, microsísmicas. Determinación de patrones de flujo térmico.

2.- Criterios Termodinámicos

Distribución de la temperatura en el campo, correlación entálpica de pozos. Detección de los cambios en las características termodinámicas.

3.- Otros Criterios

La topografía del terreno, características mecánicas del terreno. Tener en cuenta que no deben de ir pozos en los límites de manantiales, fumarolas, fallas activas, líneas de transmisibilidad, depósitos de agua dulce, ni centrales.

CAPITULO II

FLUIDOS DE PERFORACION

TEMAS CONTENIDOS EN EL CAPITULO:

- . Definición de Fluido de Perforación
- . Funciones de los Fluidos de Perforación
- . Criterios para la Selección de Fluidos de Perforación
- . Propiedades del Fluido de Perforación
- . Tipos de Fluidos de Perforación
- . Fluidos de Perforación Geotérmicos

II.1 Definición de Fluido de Perforación

De acuerdo a la definición hecha por el API el fluido de perforación se define como:

El fluido circulante utilizado en la perforación rotatoria de pozos, cuyo objetivo es ejecutar todas las operaciones de perforación requeridas.

El término fluido de perforación generalmente se refiere a todos los fluidos e incluye: aire, gas, agua, aceite y lodos. Por otra parte el lodo de perforación se refiere a una suspensión de sólidos en agua o aceite, suspensión de agua en aire o gas, o algún líquido disperso en otro. En campo al estar hablando del lodo se está haciendo referencia al fluido de perforación.

II.2 Funciones de los Fluidos de Perforación

Las funciones tienen como objetivo principal completar el éxito de un programa de perforación, optimizando los valores de penetración y consiguiendo la estabilidad del agujero.⁵

Se pueden enlistar las funciones que debe cumplir el fluido de perforación:

a) Enfriar y lubricar la barrena

Al estar realizando las operaciones de perforación la barrena se encuentra en contacto con la formación, la fricción genera calor el cual es absorbido por el lodo de perforación que fluye a través del sistema de circulación hasta la superficie.

Simultáneamente lubrica a la barrena y permite una mejor penetración.

b) Transmisión de la potencia hidráulica a la barrena

El lodo de perforación es el medio a través del cual se transmite la potencia hidráulica superficial de la bomba a la barrena. Mientras la viscosidad del lodo se asemeje en mayor grado a la del agua, se minimizarán las caídas de presión por fricción en el sistema y por lo tanto se incrementará la potencia hidráulica.

c) Limpieza del fondo del agujero

Se requieren obtener óptimos valores de penetración, peso sobre la barrena, velocidad de penetración. En pocas palabras es preciso diseñar el programa hidráulico de tal manera que el flujo genere la turbulencia necesaria a través de la barrena para elevar los recortes a la superficie. Para incrementar el flujo turbulento en la barrena es recomendable utilizar fluidos de perforación viscoelásticos.

Hay que tener en cuenta: la velocidad en el espacio anular, el punto de cedencia y la consistencia gel.

d) Remoción de recortes

Depende del perfil de la velocidad en el espacio anular, que a su vez depende de la velocidad de flujo, de las propiedades viscosas y no de la velocidad anular promedio. Desde luego hay que tomar en consideración la geometría del pozo y el programa hidráulico.

e) Acarreo de los recortes a la superficie

Es importante que la consistencia del gel sea capaz de tener en suspensión a los recortes y que el punto de cedencia tenga el valor mínimo requerido, el cual puede ser controlado por medio de aditivos.

f) Control de presiones de la formación

El fluido de perforación deberá ser capaz de generar una presión hidrostática (originada por la columna de lodo) tal que sea mayor a la presión del yacimiento y menor a la presión de fractura del mismo. Cualquier polarización generará problemas.

Dentro de las posibles causas que provoquen cambios sensibles en la presión hidrostática se encuentra:

- . Alta circulación de espuma en el lodo de perforación.
- . Invasión de flujo de gas de la formación hacia el lodo.

Lo anterior vendrá a disminuir la eficiencia en las bombas, por lo cual se requerirá eliminar el fluido de aireación y si fuera necesario disminuir el punto de cedencia y la resistencia gel.

Cabe señalar que mientras la densidad del lodo de perforación se aproxime a la densidad del agua se tendrán mayores ritmos de penetración; por el contrario el tener una mayor densidad del lodo

permitirá controlar derrumbes de formaciones deleznales.

g) Estabilizar las paredes del pozo

El espesor del enjarre será uniforme y deberá tener buena adherencia. Se tendrá especial cuidado a formaciones deleznales y poco consolidadas. Será preciso detectar la fuente del problema:

- . La abrasión mecánica de la barrena y aparejo de perforación.
- . La composición química del fluido de perforación.
- . El tiempo que el agujero ha permanecido descubierto.

h) Sustentación de la sarta de perforación

El lodo ejerce una fuerza contraria (fuerza de flotación) sobre la tubería en el momento de introducirla al pozo (lleno de fluido de perforación). Dicha fuerza está representada por:

$$F_b = 1 - \rho_{\text{lodo}} / \rho_{\text{acero}}$$

i) Acondicionar el pozo para la toma de registros

El lodo de perforación deberá proporcionar un medio adecuado para la toma de registros eléctricos. El tipo y concentración de electrólitos se tendrán que considerar así como la base del lodo.

II.3 Criterios para Seleccionar los Fluidos de Perforación

La selección del fluido de perforación es una variable importante en la optimización de los valores de penetración, por lo que es indispensable tener en consideración los siguientes puntos: ⁵

a) El tipo de formación a perforar

. Lutitas Deleznales

En situaciones normales donde el problema de lutitas es menor, usualmente un ajuste al valor de cedencia controlará el problema.

. Anhidrita

La anhidrita es sulfato de calcio (Ca SO_4), un incremento en los iones de calcio disminuirá la hidratación y propiciará la

floculación, aumentando el filtrado y a su vez incrementando las propiedades viscosas. El problema más grave será en el momento que los iones de calcio actúen sobre las partículas de bentonita en un sistema de agua dulce.

. Sal

Su presencia vendrá a causar efectos de contaminación especialmente en lodos de agua dulce. De las sales más comunes a citar son: $MgCl_2$, $CaCl_2$, $NaCl$. Los iones causan efectos adversos (Ca^{++} , Mg^{++} , Cl^-), en las propiedades de los lodos.

Al estar realizando perforaciones masivas en sal es recomendable utilizar lodos saturados de sal (salados).

b) Temperatura

Hay que tener en cuenta que en yacimientos geotérmicos (nacionales) la temperatura es una variable de gran peso, como se se puede observar a continuación:

| CAMPO GEOTERMICO | TEMPERATURA [°C] | PROFUNDIDAD [m] |
|------------------|----------------------|--------------------|
| Cerro Prieto | 300 - 400 | 3000 - 4100 |
| Los Humeros | 250 - 348 | 1458 - 3104 |
| | 360 | |

*1 roca volcánica

*2 basamento calcáreo

Se requiere que los componentes del fluido de perforación se encuentren en estabilidad a la temperatura del yacimiento.

El efecto de temperaturas elevadas trae consigo las siguientes consecuencias:

- . Disminución en la efectividad de los aditivos químicos
- . Un aumento en el filtrado
- . Un incremento en la gelatinosidad del lodo, recargándolo de recortes.

Mientras menor sea el contenido de sólidos perforados en el lodo, se tendrá mayor control de las propiedades deseadas a elevadas temperaturas.

Haciendo referencia a los dos incisivos anteriores dentro del

marco geotérmico se puede presentar la siguiente clasificación de sistemas geotérmicos: según A. Razo⁴.

. Vapor Dominante:

De alta entalpía, el fluido producido es vapor seco, cuya potencialidad para generar electricidad es a gran escala, existen muy pocos a nivel mundial.

. Líquido Dominante:

De alta entalpía, son sistemas de salmuera con temperaturas mayores de 200 °C y menores de 300 °C. Un ejemplo de este tipo de yacimiento geotérmico es el caso de Cerro Prieto (el segundo más grande del mundo en su tipo).

. Roca Seca Caliente:

Son sistemas de alto contenido energético, tienen poca o ninguna cantidad de agua.

. Líquido Dominante:

De baja entalpía, con temperaturas mayores de 100 °C y menores 180 °C, es más común que el sistema de líquido dominante de alta entalpía en una relación de 10 a 1.

. Geopresurizados:

Son sistemas de agua con metano (C₁ H₄) disuelto, a condiciones de alta presión y mediana temperatura (150 °C).

. Marinos:

Son sistemas de alta entalpía que se encuentran localizados en zonas marinas (Golfo de Baja California).

. Magmáticos:

Son sistemas de roca fundida, donde existen aparatos volcánicos activos a gran profundidad. Como ejemplo tenemos al volcán de Colima.

Igual que en el inciso anterior no hay que perder de vista que en yacimientos petroleros los fluidos producidos son aceite gas y agua, mientras que en los yacimientos geotérmicos se produce predominantemente vapor y / o agua.

c) Pérdidas de circulación

Tienen una influencia directa en la selección del fluido de perforación. Podemos tener posibles alternativas como son:

obturar la zona de pérdida, perforar con aire, espuma o lodos aireados.

d) Abastecimiento de agua

Es necesario conocer el contenido de iones de calcio y magnesio, los cuales pueden ser obtenidos de un análisis químico. Puede ser necesario escoger el sistema de lodo conveniente en función de la fuente de suministro.

e) Equipo de perforación

Para que un fluido de perforación se encuentre y se pueda mantener en condiciones óptimas de perforación es básico el contar con un equipo apropiado de circulación de fluidos y de control de sólidos.

A continuación se presentan las dimensiones promedio de las partículas que llegan a separar los equipos de control de sólidos. H. Walters⁶.

| EQUIPO | φ PARTÍCULA SEPARADA MICRONES | SÓLIDOS GENERADOS % |
|--|----------------------------------|------------------------|
| Malla 60 | 234 | 14% |
| Malla 120 | 117 | 22% |
| Malla 200 | 74 | 30% |
| Desarenador 12pg | 40 | 42% |
| Desarcillador 4pg | 23 | 58% |
| Hidrociclón 2pg | 10 | 62% |
| Centrifugadora recuperadora de barita | 8 | 83% |
| Centrifugadora de alta velocidad | 2 | 94% |

f) Programa de revestimiento

Es importante considerar este punto porque está en función de los cambios litológicos, de las presiones de la formación, de las formaciones débiles y problemáticas, las que deberán de ser aisladas.

II.4 Propiedades del Lodo Para una Optima Perforación

a) Densidad

La densidad es una propiedad intensiva de los fluidos la cual se define como la masa de un elemento diferencial de fluido dividido por el volumen de dicho elemento.

Esta se debe mantener al mínimo requerido de tal manera que contrarreste la presión de la formación considerando un factor de seguridad por viajes de la tubería. Hay que tener en cuenta que al aumentar la presión diferencial entre la presión hidrostática y la presión de formación habrá una disminución en el valor de penetración, esto debido a los aumentos en los esfuerzos de compresión de la roca matriz bajo presión y a los efectos exagerados de la retención de fragmentos en el fondo del pozo.

Cabe mencionar que el peso específico está definido por la relación existente entre el peso y la unidad de volumen al considerar un volumen unitario de fluido de perforación. Por tal motivo numéricamente la densidad es igual al peso específico pero conceptualmente son diferentes.

Existen tres tipos de densidades diferentes que son las de mayor uso:

- Densidad estática o superficial: es determinada con la balanza de lodos.
- Densidad equivalente de circulación: se refiere al peso de la columna de un fluido de perforación en circulación, por lo que al quererla determinar a una profundidad dada será necesario conocer la caída de presión en el espacio anular, es decir:

$$\rho_{equiv} \text{ [lb/gal/pie]} = \rho_{lodo} \text{ [lb/gal]} + \Delta P_{anular} / .052 \times prof \text{ [psi/pie]}$$

- Densidad anular: se refiere al valor de presión actual generado por la densidad del lodo ejercida sobre la formación que está siendo perforada.

Esta última es de gran importancia y cuantitativamente su

valor es mayor que los dos primeros casos, especialmente cuando el ritmo de penetración es grande y el pozo es profundo. Esto es debido a la incorporación de recortes de la formación al fluido de perforación.

La densidad anular puede ser definida como sigue:

$$P_{\text{anular}} = P_{\text{estática}} + \frac{\Delta P_{\text{anular}}}{\text{profundidad}} + \frac{P_{\text{recortes}}}{\text{profundidad}}$$

b) Viscosidad

La viscosidad se define como la resistencia interna que presenta un fluido al flujo, al ser sometido a la acción de un esfuerzo cortante. Esta variable será tratada con mayor profundidad en el siguiente capítulo.

c) Punto de cedencia

Es el valor del esfuerzo de corte de un fluido en particular para que pueda iniciar su movimiento. Contribuye a la sustentación de los recortes. Sus unidades más comunes son: $\text{lb}/100\text{pie}^2$ (unidades de esfuerzo).

d) Gelatinosidad

Es la medida de las fuerzas de atracción molecular ejercidas entre las partículas del lodo de perforación. Contribuye en el desplazamiento de los recortes.

e) Contenido de Sólidos

Es necesario conocer y controlar el tipo de sólidos así como la concentración, distribución del tamaño de las partículas de los sólidos en los fluidos de perforación.

Todos los sólidos son adversos, especialmente aquellas partículas menores a una micra que son mucho más perjudiciales que las partículas más grandes.

f) Pérdida de filtrado

Existe la teoría del primer filtrado y los fragmentos atrapados en el fondo.

Los fragmentos atrapados en el fondo crean una presión

diferencial contraria, debido a la diferencia existente entre el frente hidrostático del lodo y la presión de la formación.

Estos fragmentos no se levantan inmediatamente del fondo a menos que la presión diferencial que los retiene se elimine.

El primer filtrado, es el filtrado instantaneo anterior a la formación del enjarre, el cual igualará la presión diferencial a través de los fragmentos. Los fluidos de perforación cargados con partículas coloidales, no muestran el primer filtrado y por lo tanto retardan el desplazamiento de los fragmentos de la formación.

El filtrado depende en gran medida de la presión, la temperatura, y del diámetro de la partícula, pudiendo ser medido a condiciones estáticas (durante viajes de tubería) con normas API y a condiciones dinámicas (durante la perforación) existen pruebas de laboratorio tales como HPHT. Se ha observado que no es mucha la diferencia entre cada uno de estos valores.

Las consecuencias que puede traer la pérdida de filtrado son:

Fegadura de tubería en zonas permeables por presión diferencial, daño a la formación, un incremento en la viscosidad del lodo, un aumento en los geles del mismo.

En sistemas de lodos no dispersos con mínimo contenido de sólidos es recomendable una pérdida de filtrado inicial alta y que la pérdida de filtrado final sea baja. Un valor de $20 \text{ cm}^3 / 30 \text{ min.}$ es un valor aceptable. ⁵

Para poder controlar la pérdida de filtrado se puede utilizar bentonita prehidratada, agentes poliméricos, dispersantes (neutralizan las cargas de las partículas reduciendo la permeabilidad del enjarre) y reductores.

Los materiales y la concentración de la pérdida de fluido depende en gran medida del tipo de lodo, del efecto aditivo de las propiedades del lodo y de la concentración de sólidos perforados en el sistema.

g) pH

Es una propiedad química del lodo definida como el potencial nitrógeno que se debe a la reacción química de los componentes que

intervienen en los lodos de perforación. Indica el grado de alcalinidad o acidez del fluido de perforación. Afecta a la viscosidad, a la gelatinosidad y el rendimiento de las arcillas principalmente.

Tiene una escala con un rango de [1, 14] y se cuenta con el siguiente criterio para determinar su naturaleza:

- . si pH < 7 se tiene un medio ácido
- . si pH = 7 se tiene un medio neutro
- . si pH > 7 se tiene un medio alcalino

Como se puede observar existe una relación directa entre las propiedades de los fluidos de perforación y sus funciones. Mientras las primeras se encuentren en valores óptimos entonces se estarán efectuando eficientemente las segundas. ⁵

II.5 Tipos de Fluidos de Perforación

Todos los fluidos de perforación pueden ser divididos en dos grandes grupos: densificados y no densificados.

De acuerdo a la clasificación de los fluidos de perforación en base a su peso específico tenemos que cualquier fluido de perforación cuyo peso específico sea de 78 lb/pie³ o menor puede ser considerado como no densificado, debido a que no requiere del uso de materiales densificantes como es el caso de la barita. Aquellos fluidos que tengan un peso específico mayor a 83 lb/pie³ pueden ser clasificados como densificados. Si algún valor llega a caer dentro del rango de los dos valores mencionados anteriormente es factible decir que el lodo de perforación inicia a ser densificado. Chilingarian and Voraburt⁷.

Dentro de los lodos de perforación no densificados es posible incluir: Los fluidos de perforación libres de partículas sólidas, compuestos principalmente de pequeñas concentraciones de gel y/o arcillas nativas con agua, polímeros y agua; también se pueden considerar emulsiones de agua en aceite o de aceite en agua, es decir emulsiones directas e inversas. Como se había comentado

anteriormente el agua limpia es un fluido de perforación ideal que puede alcanzar máximos ritmos de penetración. Otros fluidos de perforación no densificados que alcanzan máximos valores de penetración son el aire y las espumas, los cuales serán descritos más adelante.

Muchos pozos profundos requieren de fluidos de perforación densificados para proporcionar suficiente carga hidrostática para confinar a los fluidos de la formación.

La clasificación de los lodos de perforación de acuerdo a las fases que los componen, básicamente son tres:⁵ (diagrama 1)

- 1.- Lodos de Perforación aire-gas
- 2.- Lodos de perforación base agua
- 3.- Lodos de perforación base aceite

II.5.1 Fluidos de perforación base aire - gas

a) Seco (aire seco-gas)

Es el medio ideal para obtener rápidos valores de penetración. La capacidad de acarreo de los recortes depende principalmente de la velocidad promedio anular.

Es recomendable tomar en cuenta los siguientes puntos para su uso:

- . Inestabilidad del agujero
- . Formaciones productoras de agua
- . Factores económicos

Una de las grandes desventajas de este tipo de lodos es que siempre existe la posibilidad de una explosión de la mezcla, máxime si se está trabajando con temperaturas tan elevadas como es el caso de los pozos geotérmicos, haciéndose un tanto más crítico al manejar gas metano.

b) Niebla

Dicho lodo de perforación está compuesto por su fase continua que es gas seco, mientras que su fase discontinua es agua dispersa. También se pueden inyectar surfactantes espumosos a

CLASIFICACION DE FLUIDOS DE PERFORACION

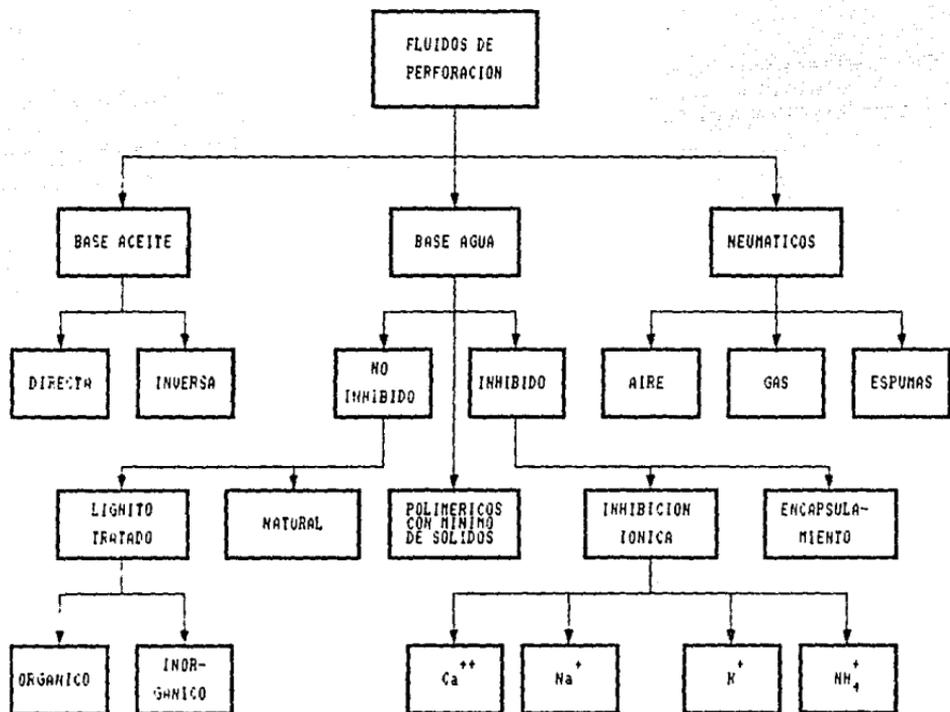


DIAGRAMA 1

altas velocidades en la corriente de gas. Puede ser utilizado en aquellas áreas donde existan pequeñas cantidades de agua de formación; también existe la posibilidad de una explosión.

c) Espuma

Se puede inyectar agua o surfactantes espumosos en una corriente de aire, creando una espuma viscosa. Referente a las espumas estables se inyecta lodo base gel con surfactantes espumosos en una corriente de aire.

En este caso la capacidad de acarreo de los recortes depende de la viscosidad del fluido de perforación y no de la velocidad del espacio anular.

d) Lodos aireados

Se inyecta aire o gas en una mezcla gelatinosa, al perforar formaciones de baja presión, como en el caso de los campos geotérmicos donde los lodos aire o espuma no sean utilizados.

II.5.2 Fluidos de perforación base agua

a) Lodos iniciales

Se utilizan hasta la profundidad en que irá la tubería conductora. Son una mezcla de bentonita o atapulgita más agua.

b) Lodos bentoníticos

Es un fluido de perforación simple, compuesto por bentonita y agua. La bentonita es el material que incrementa la capacidad de acarreo del lodo de perforación.

c) Lodos tratados con fosfato

Los fosfatos son adelgazantes químicos inorgánicos (dispersantes), no controlan el filtrado, son inestables a temperaturas mayores de 150°F (pozos someros). Son capaces de disminuir la viscosidad de lodos bentoníticos contaminados por sólidos de la formación y cemento. Su dosificación deberá ser relativamente en cantidades pequeñas para poder controlar sus propiedades de flujo.

d) Lodos gel-químicos

Están compuestos por bentonita y una baja concentración de adelgazante (lignosulfonato). Son similares a los lodos de fosfato

pero son más eficientes a profundidades mayores.

e) Lodos tratados con lignitos y lignosulfonatos

Si tenemos elevadas concentraciones de sólidos entonces habrá que incrementar la cantidad de lignosulfonatos para controlar el punto de cedencia así como la consistencia del gel.

Los lodos con lignosulfonatos tendrán mayor resistencia a la contaminación de iones de calcio y cloro. Lignitos con lignosulfonatos servirán para preparar lodos pesados estables a temperaturas del orden de 400°F. El lignito en sí es un agente de control de filtrado efectivo, mientras que el lignosulfonato es un adelgazante (dispersante).

f) Lodos cálcicos

Son utilizados para perforar secciones de anhídrita, lutitas deleznales, donde el flujo de agua salada es común.

La bentonita (arcilla sódica) se convierte en arcilla cálcica por medio de la adición de cal y yeso.

_ Lodos con adición de cal

Se preparan mediante la adición de sosa cáustica, adelgazantes orgánicos y cal hidratada. Resisten contaminaciones hasta de 50,000 ppm de sal y 30,000 ppm de cloruros.

Tienden a solidificarse, incrementan su consistencia gel al haber incrementos en la temperatura.

_ Lodos con adición de yeso

Son utilizados en la perforación de formaciones de anhídrita, y yeso, con intercalaciones de sal y lutita. Son elaborados a partir de lodos naturales mediante la adición de yeso y lignosulfonatos.

g) Lodos de polímeros de bajos sólidos no dispersos

En lugar de dispersar los sólidos en el lodo, los recubre y los floclula para facilitar su desplazamiento y así mejorar la estabilidad y características del fluido de perforación.

Se han elaborado utilizando varios polímeros con y sin bentonita y evitando el uso de dispersantes, pero no tienen un reductor no dispersante de viscosidad, por tal motivo requieren dispersante para controlar las propiedades de flujo.

Los lodos más avanzados de este tipo incluyen un reductor de

lodos no dispersante de viscosidad.

Se elaboran mediante la adición de bentonita con polímeros floculantes para aumentar el valor de cedencia de la bentonita.

Si tenemos una concentración menor de sólidos, podremos utilizar polímeros reductores poco recubridores y floculantes en áreas de perforación de formaciones bentónicas.

Un buen lodo de este tipo será el más rápido gracias a sus propiedades viscoelásticas y filtrantes. Los lodos base agua con polímeros son estables a la temperatura por su bajo contenido de sólidos y su probada estabilidad, pudiendo ser densificados a cualquier valor de peso requerido.

h) Lodos salados

Su salinidad puede provenir de su elaboración, sal añadida en la superficie, sal disuelta procedente de los estratos de la formación. Su rango de salinidad está comprendido entre 10,000 ppm. hasta la saturación de 315,000 ppm. de NaCl @ 68°F.

Algunos de los tipos de sales más comunes son:

NaCl, CaCl₂, MgCl₂, KCl.

_ Lodos salados convencionales

Son utilizados en la perforación de secciones de sal anhidrita, yeso, y lutitas problemáticas. En lodos base agua la bentonita será prehidratada y se podrá utilizar atapulgita.

_ Lodos salados de aplicación especial

Algunos se elaboran con polímeros que aumentan la viscosidad del agua salada. Su aplicación principal es en la reparación de pozos, en perforaciones costa afuera, áreas de lutitas que no requieran de alta densidad.

Otros sistemas son similares a lodos convencionales que incluyen aditivos, inhibidores para estabilizar la lutita.

II.5.3 Fluidos de perforación base aceite

Los lodos base aceite se elaboran por lo común de crudo desgasificado (de aceite muerto).

a) Lodos de aceite

Cuyo contenido de agua es menor al 5%, su uso principal

está enfocado para evitar contaminaciones de agua de la formación. En estado nativo son inertes a la contaminación de:

Anhidrita, secciones de sal y ácido sulfhídrico (H₂S).

b) Emulsión inversa

Es una emulsión de agua en aceite, donde el agua es la fase dispersa y el aceite es la fase continua (el más utilizado es el diesel). Por tal motivo el filtrado será el aceite.

Algunas de sus ventajas:

- . Estabilidad a altas temperaturas
- . Inertes a contaminación química
- . Ajustando la relación agua aceite podemos densificar a cualquier peso de lodo.

Algunas de sus desventajas:

- . Son más costosos que los lodos base agua
- . Dañan en mayor grado el medio ambiente

c) Emulsión directa

Es una emulsión de aceite en agua en donde la fase continua es el agua y la fase discontinua (dispersa) es el aceite.

II.6 Fluidos de Perforación Geotérmicos

Los efectos de elevadas temperaturas en el fondo del pozo llegan a ser completamente evidentes a finales de 1930 y a principios de 1940 (pozos petroleros), para la deshidratación molecular se hizo uso de fosfatos y polifosfatos, por lo que se utilizaron los lodos " thinners " (agente adelgazante) para combatir la defloculación. Esos adelgazantes de fosfato sufrieron degradación o reversión en un rango de 150 a 200 °F (65.5 a 93.3 °C) y así llegaron a ser ineficientes en mantener propiedades de flujo satisfactorias al exceder tales temperaturas. Los taninos compuestos (primeramente el extracto de quebracho) fué el adelgazante popular para mayores temperaturas en los 1940's. Esos lodos eran llamados " lodos rojos " por el color impartido por el quebracho, fueron más estables a la temperatura y más resistentes a la contaminación que los polifosfatos, pero su rango de efectividad fue sobrepasado al incrementar la profundidad en los

pozos.

Lodos de limo tratado fueron utilizados con mayor quebracho o lignosulfonato de calcio, llegando a ser popular a principios y mediados de los 1950's, pero este tipo de lodos tienden a presentar un tipo de inestabilidad a gran temperatura que da como resultado una gelación severa, conocida como solidificación de lodos de limo. Dicha solidificación es el resultado de la reacción limo / arcilla debido a la gran temperatura, produciéndose tobermorita un mineral encontrado comunmente en el cemento portland.

Como un intento para eliminar la gelación del limo, fueron usados lodos tratados con yeso y un ferrocromo lignosulfonato, que fueron utilizados ampliamente a finales de los 1950's. Aunque los lodos de yeso muestran una estabilidad mayor que los lodos de limo.

A principios de los 1960's a tiempos recientes uno de los fluidos de perforación base agua que se han utilizado con cierta frecuencia son los lodos lignosulfonatos. Esta clasificación obviamente contiene otros aditivos tales como arcillas, lignitos, etc. pero el componente clave en mantener la estabilidad reológica es el lignosulfonato. Un aspecto que distingue a estos sistemas es que no se les añade sales de calcio inorgánicas en su formulación.

Existen lignosulfonatos modificados que muestran considerablemente mayor estabilidad que los polifosfatos y mucho más efectividad en mantener las propiedades de flujo deseadas que los componentes taninos a elevadas temperaturas. A pesar de esas ventajas hace falta una suficiente estabilidad térmica para manejar el lodo sin problemas en rangos de temperaturas mayores.

Eduards et al.⁹ considera varios tipos de sistemas de fluidos de perforación que son manejados en la perforación geotérmica. El tipo de lodo a utilizarse dependera del tipo de yacimiento que se vaya a perforar y de las propiedades del lodo. En términos de las propiedades de los fluidos se considerarán:

. El peso específico del lodo usualmente tiene un rango de 8.8 a 10 lbr/gal (65.8-74.8 lbr/pie³).

. La pérdida de fluido de perforación API es normalmente

controlada de 10 a 20 cm³ / 30 min.

- . La viscosidad de embudo tiene un rango de 35 - 45 segundos Marsh
- . El pH normalmente es controlado en el rango de 9.0 - 10.0, por lo que se tiene un medio alcalino.

Algunas ventajas y desventajas de los sistemas de los fluidos de perforación que prevalecen en la perforación geotérmica, pueden ser resumidas como siguen:

- Sistema bentonita agua

La bentonita controla la viscosidad y la pérdida de filtrado del fluido de perforación. Y con la adición de sosa cáustica se ajusta del pH.

Ventajas

- . Es un sistema económico
- . En el sistema muy pocos productos son añadidos al fluido de perforación

Desventajas

- . Es sensible a la contaminación de cemento, sal y sólidos.
- . Es poco estable a altas temperaturas, bajo estas últimas condiciones tiende a gelarse y su viscosidad es excesivamente alta.
- . Las propiedades de los fluidos tienden a ser difíciles de controlar.

- Sistema bentonita - lignito - sosa - cáustica

Este sistema difiere del anterior en que el lignito es incorporado en el fluido para proporcionar estabilidad y mejor viscosidad así como control en las pérdidas de fluido (filtrado)

Ventajas

- . El sistema de lodo es relativamente económico
- . Mayor estabilidad que el sistema bentonita agua

Desventajas

- . Aunque la tolerancia a la contaminación es mayor que el sistema bentonita agua, no la inhibe completamente.
- . Puede ser sujeto a gelación si la temperatura en el fondo del pozo es excesiva.

- **Sistema cromo ligno - cromo lignosulfonato**

El cromo lignito y el cromo lignosulfonato son añadidos al fluido de perforación para impartir una mayor estabilidad.

Ventajas

- . Es proporcionada una mayor inhibición
- . Existe estabilidad a altas temperaturas.

Desventajas

- . Debido a la regulación del medio local puede ser que no sea utilizado en algunas áreas.
- . El sistema de lodo es más caro que los tipos precedentes

- **Sistema polimérico**

Gran parte de este tipo de lodos se componen del tipo de polimero VAMA y polimero poliacrilato. El uso de esos polímeros con bentonita y floculantes de sólidos crearán un sistema de lodos de bajo contenido de sólidos.

En combinación con la bentonita permiten la floculación de los sólidos perforados, creando un sistema de lodo de bajo contenido de sólidos.

Ventajas

- . Sistemas con bajo contenido de sólidos con su consecuente incremento en el ritmo de penetración.
- . Gran habilidad para la limpieza del agujero debido a sus buenas propiedades reológicas.

Desventajas

- . No tolera la contaminación
- . El sistema puede llegar a ser delgado si recibe un sobretratamiento.
- . Requiere una máxima utilización de equipo de control de sólidos.

- **Sistema sepiolita**

En este tipo de lodos se utiliza la sepiolita que es una arcilla que controla la viscosidad y modifica los polímeros para reducir la pérdida de filtrado. Se utiliza sosa cáustica para ajustar el pH.

Ventajas

- . No es susceptible a grandes temperaturas, a la gelación y a la

Floculación.

- Tiene la contaminación
- Es económico debido a sus bajos costos de mantenimiento ya que este todo no es relativamente afectado por contaminación y gran temperatura.

Desventajas

- Se requiere una alta eficiencia en el equipo de control de sólidos.
- Se requiere un equipo de mezclado de alta potencia para impartir la viscosidad deseada a la sepiolita.

C A P I T U L O I I I

REOLOGIA DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

TEMAS CONTENIDOS EN EL CAPITULO:

- . Conceptos Reológicos
- . Correlación entre Medidas Relativas y Absolutas de Viscosidad
- . Clasificación Reológica de los Fluidos de Perforación
- . Variables que Caracterizan el Comportamiento Reológico
- . Relación entre Variables y Modelos Reológicos

III.1 Conceptos Reológicos

La reología es la ciencia que se encarga del estudio de la deformación y el flujo de los materiales, al estar sometidos a esfuerzos cortantes.

Entre las propiedades de estudio de mayor importancia se encuentra: la elasticidad, la plasticidad y la viscosidad.

Los dos comportamientos extremos que pueden ocurrir desde un punto de vista reológico son: la deformación elástica pura de un sólido o el flujo viscoso de un líquido. La elasticidad pura se caracteriza principalmente porque el cuerpo regresa a su forma original después de liberar el esfuerzo. La viscosidad pura se caracteriza principalmente en que el líquido fluye uniformemente bajo pequeños esfuerzos aplicados y no regresa a su forma después de liberar el esfuerzo.

Los parámetros principales relacionados a esas deformaciones son:

La resistencia se vuelve deformación, expresada por el módulo de elasticidad " E ", para un cuerpo elástico y por el coeficiente de viscosidad para un líquido (flujo laminar).

La elasticidad caracteriza a aquellos cuerpos capaces de soportar un máximo esfuerzo sin presentar ruptura o fractura del mismo, volviendo a sus dimensiones originales.

La deformación elástica esta dada por:

$$dl = \sigma / E \quad \sigma = \text{esfuerzo}$$

Para el flujo viscoso se tiene:

$$D = \frac{dv}{dy} = \frac{\tau}{\mu} \quad (\text{flujo laminar})$$

τ = esfuerzo de corte.

El módulo de elasticidad E es una constante física tal que

la deformación es proporcional al esfuerzo aplicado (ley de Hooke). Es definido como el esfuerzo por unidad de deformación. El coeficiente de viscosidad $[\mu]$ es una constante física única, en el caso de proporcionalidad es el esfuerzo de corte por unidad de velocidad de deformación. E es expresado en $[F/L^2]$ y no es una presión, por lo general el coeficiente de viscosidad se expresa en [poise].

"E" la cantidad de energía almacenada en deformación elástica y el coeficiente de viscosidad es la cantidad de energía disipada en el flujo, debida a la transferencia de momentum (movimiento en la dirección del flujo) perpendicular a esta dirección.

Cuando ambos efectos se involucran simultáneamente la deformación es llamada "visco-elástico". También referido como comportamiento plástico, puede ser caracterizado por la adición de esfuerzos acordados:

$$\sigma = E * dI + \mu * D$$

Esta fórmula por lo tanto puede ser caracterizada como un ecuación general de comportamiento reológico. En el caso en que $E*dI = 0$ la deformación es algunas veces llamada inelástica.

En la Figura # 1 se aprecia el comportamiento elástico, donde la parte "A" de la curva representa la deformación elástica pura y la parte "C" representa la deformación plástica. Entre estas dos regiones existe una zona de transición "B" donde ambos fenómenos ocurren simultáneamente.

Se han encontrado materiales que tienen estructura temporal y pueden ser alterados por esfuerzos de corte y restaurarse una vez dada la relajación. Este fenómeno es llamado tixotropía. Un material tixotrópico es "rígido" y no fluye bajo esfuerzos relativamente pequeños. Es posible hacer que un fluido vaya disminuyendo su viscosidad cuando el esfuerzo de corte es incrementado, hasta un valor de viscosidad uniforme mínimo bajo la

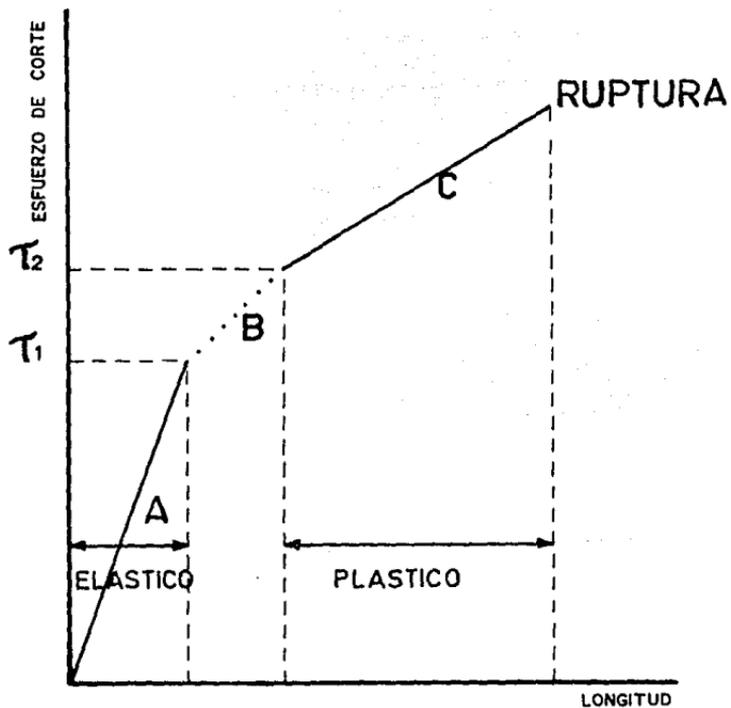


FIG. 1 CURVA ESFUERZO-DEFORMACION
EN UN SOLIDO

reducción de esfuerzos. Pero cuando el material está libre de éstos, con el tiempo recupera su estado original. Un ejemplo son precisamente algunos lodos de perforación.

La tixotropía es un fenómeno de dilatación (en menor o en mayor grado).

III.1.1 Relajación e histéresis

Los fenómenos de deformación elásticos y plásticos son influenciados por factores tales como: temperatura, tiempo, historia del material (tensión interna).

La lenta recuperación después de alguna deformación previa, que reproduce una tensión residual interna, llamado efecto elástico tardío. En la Figura # 2 se muestra la recuperación por etapas después de una prueba de compresión. En este ejemplo el efecto de elasticidad ocurre en dos etapas, una en el camino normal a un tiempo t_1 y la otra después de un corto periodo de calentamiento t_2 .

La tensión residual en un material tiende a disiparse, este fenómeno es llamado relajación. El tiempo necesario para que la tensión disminuya a $1/e$ de su valor original, es llamado tiempo de relajación (λ) y se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = \tau_0 \cdot \text{EXP} (t / \lambda)$$

donde:

τ_0 = tensión original

t = tiempo

Otro fenómeno relacionado con la relajación es el incremento gradual en la longitud de una muestra cuando se mantiene bajo esfuerzo constante.

Durante la deformación elástica, especialmente cuando es

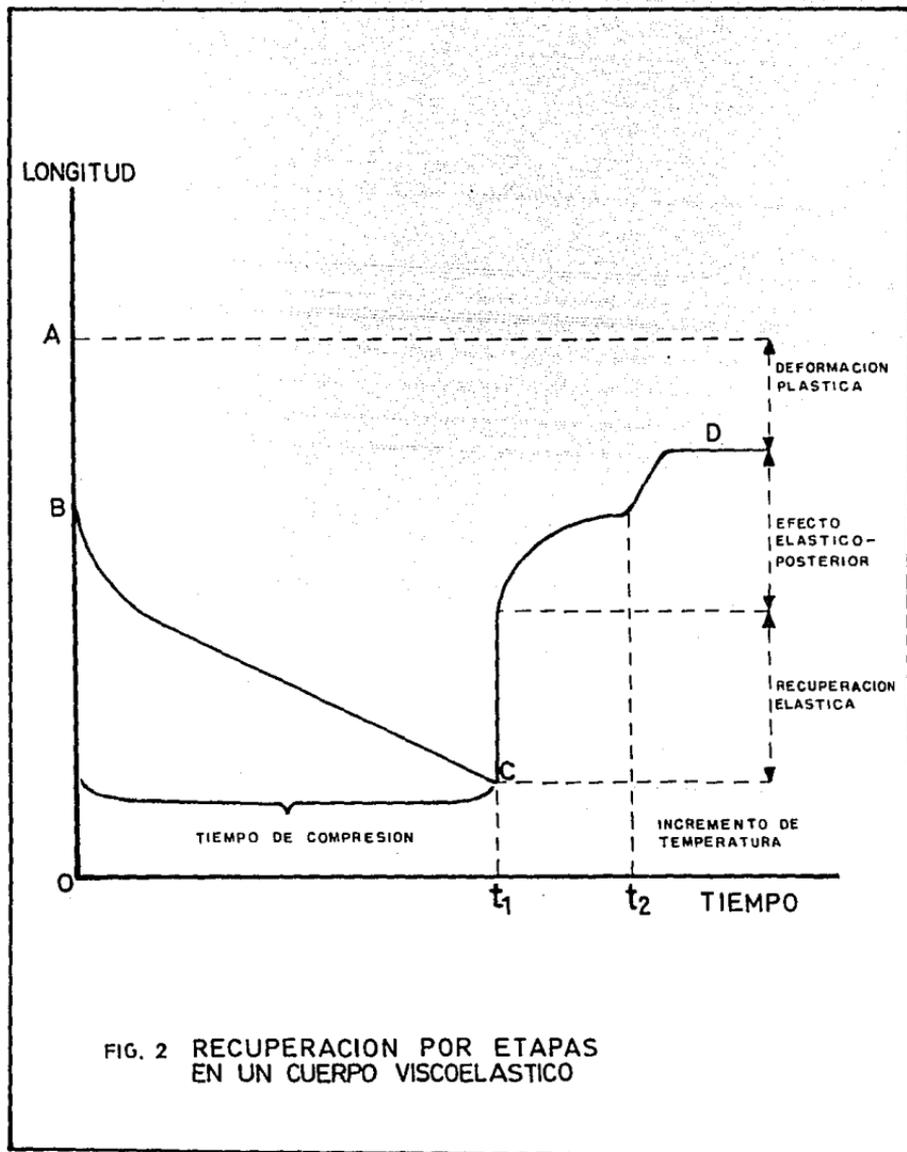


FIG. 2 RECUPERACION POR ETAPAS EN UN CUERPO VISCOELASTICO

acompañada por una componente del fenómeno plástico, seguramente una cantidad de trabajo será disipada como calor.

Este factor será manifestado en una curva esfuerzo Vs elongación, donde se obtendrá una diferencia respecto al tener carga sobre la muestra y al quitarla. Este punto se muestra en la Figura # 3 donde el área sombreada es una medida del trabajo perdido. Este fenómeno es llamado " histéresis elástica " y hace referencia a que es un proceso irreversible.

La deformación puede ir acompañada por un cambio en el volumen; las moléculas adquieren una nueva posición más cerrada, comparando su estado actual.

Existen algunas relaciones al respecto:

$$\text{tensión actual} = \text{esfuerzo nominal} \cdot \frac{1 + \Delta l}{l}$$

en esta fórmula se aprecia que hay cambio de volumen durante la deformación.

Otra de las propiedades intimamente relacionada es la compresibilidad (C) que está representada por:

$$C = - \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dP}$$

donde:

V = volumen

P = presión hidrostática.

La cual indica la variación del volumen de un material al modificar la presión, respecto a un volumen inicial de referencia. Por lo general la ecuación es aplicada a gases ya que son fluidos altamente compresibles, mientras que los líquidos llegan a ser considerados incompresibles. En el caso que se estén manejando flujos multifásicos o bifásicos esta suposición no se cumplirá. La relación entre las tres constantes elásticas para materiales isotrópicos es:

ESFUERZO

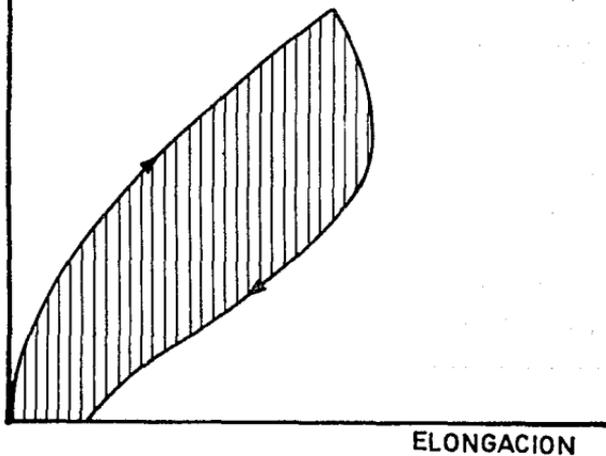


FIG. 3 HISTERESIS ELASTICA
EN UN CUERPO VISCOELASTICO

$$E = \frac{3(1-2\nu RP)}{C} = 2(1 + 2\nu RP) \cdot G$$

donde ν es la relación de Poisson, que se define como:

$$\nu = \frac{\text{contracción lateral relativa}}{\text{deformación longitudinal relativa}}$$

donde ν mide la contracción del volumen durante la deformación, si consideramos que la ν es igual a 0.5 y lo sustituimos en el numerador de la ecuación correspondiente se podrá observar que dicho término se anula, lo que físicamente indica que no ocurre contracción. Esto se puede entender mejor al considerar un líquido, donde E es igual a cero y las moléculas son movidas bajo la influencia del esfuerzo de corte, por lo cual no ocurre contracción. Cuando las características de una sustancia se aproximen a las de un líquido el valor de relación de Poisson tenderá al valor de 0.5. R. Houwink and H. Dekker⁹.

Como ejemplo ilustrativo. se tiene:

| Material | ν |
|--------------|-------|
| Vidrio | 0.25 |
| Acero | 0.27 |
| Ebonita | 0.39 |
| Plomo | 0.40 |
| Gelatina gel | 0.50 |

III.1.2 Estructura de la materia en relación a su comportamiento elástico o plástico.

Las propiedades reológicas de la materia dependen

primeramente de la energía contenida entre sus átomos constituyentes (iones) y moléculas. Hay factores estructurales que cubren completamente el tipo de comportamiento reológico que podría ser esperado en base a la naturaleza de los enlaces iónicos.

En cada sólido la unidad estructural ejerce fuerzas atractivas y repulsivas. Si no fuera este el caso sería imposible explicar el por qué se experimenta una resistencia, no únicamente durante la elongación, sino también durante la compresión de un material sólido.

Hay que tener en consideración los siguientes parámetros:

- . La existencia de diferentes enlaces iónicos
- . La distancia interatómica existente
- . Vibración de los átomos por calor
- . La energía potencial es una función de la separación de los átomos.
- . La energía de ruptura o energía de separación para iniciar el flujo es:

$$e_r = 3 * k (T_m - T)$$

donde:

k = constante de Boltzmann

T_m = temperatura de fusión

T < T_m

La naturaleza del tipo de fluido (líquido o gas), tiene una influencia en las propiedades de cada uno de ellos.

Considerando los líquidos simples, existen materiales que pueden mostrar comportamiento líquido (flujo viscoso) bajo diferentes condiciones. Los líquidos puros son el caso ideal donde se considera que las moléculas son esféricas, independientemente de la temperatura y la evaporación. La estructura real en cada caso muestra pequeñas desviaciones respecto al caso ideal.

Estadísticamente la distribución molecular llega a ser prácticamente uniforme (confirmada por difracción de rayos x) R. Houwink and H. Deker^p.

El líquido puede mostrar dos tipos de reacciones elásticas, originadas por cambios moleculares con la ayuda de su movimiento termal.

El cambio de lugar de moléculas en un líquido son frecuentes y rápidos, el espacio libre será llenado inmediatamente por otras moléculas de líquido, originando una compresibilidad (elasticidad estática). El tipo más simple de elasticidad presentada por los líquidos es la elasticidad de compresión. Inmediatamente que un líquido llena un espacio dado, la reducción de este espacio causa la compresión del fluido. Esta elasticidad de compresión es de naturaleza hidrostática. La reacción elástica ejerce una reacción igual a la presión en cada parte del confinamiento de las superficies de las paredes. Esta generación de comportamiento elástico es llamada compresibilidad. En un líquido se involucran pequeños cambios en la distancia promedio entre las moléculas. La reducción de compresión por la distancia promedio y el movimiento térmico buscan restaurar el equilibrio original.

Otro tipo de elasticidad de líquidos aparece cuando el líquido es deformado a muy grandes velocidades de flujo. En el flujo ordinario, las moléculas se mueven rápidamente y su mecanismo de desplazamiento es debido a su movimiento Browniano.

En el caso particular de los gases la atracción molecular no es tan fuerte como es el caso de un líquido o sólido. Consecuentemente los cambios en la densidad son sustanciales al variar la presión y la temperatura. Esta característica de los gases origina un número interesante de fenómenos que no ocurren en líquidos y sólidos, o su presencia es despreciable en comparación con los de un gas.

Una de las propiedades básicas de los gases es que sus moléculas se mueven aleatoriamente, saltando una distancia promedio, equivalente a su tamaño. Mientras que la temperatura

absoluta es proporcional a la energía cinética de las moléculas.

El coeficiente de viscosidad del aire medido a 0 °C es 1.7×10^{-4} poise, aproximadamente cien veces menor que el del agua a las mismas condiciones.

En un gas todas las moléculas están completamente en movimiento y esto permite una mayor transferencia de momentum por segundo, cuando su movimiento termal es mayor, por tal motivo la viscosidad del gas se incrementa con la temperatura.

III.1.3 Tipos de enlaces iónicos

Existen cinco tipos de enlaces que unen a la materia (Figura # 4), pero básicamente se tratarán dos grupos principales:

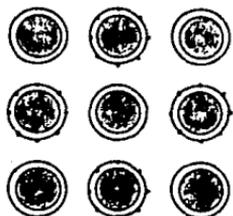
- 1.-Enlace primario (fuerte) - tienen un contenido de energía del orden de 100 - 200 kcal/mol, la distancia entre los centros de los átomos es más corta.
- 2.-Enlace secundario (débil) - el contenido de energía es del orden de 0.1 - 10 kcal/mol o ligeramente mayor.

. Enlaces primarios

En los enlaces iónicos o heteropolares, los átomos tienen en su última órbita electrones por ganancia o por pérdida de los mismos. Están eléctricamente cargados en un sentido opuesto y por lo tanto atraen a los otros.

En los enlaces covalentes u homopolares, los pares de átomos llenan sus órbitas externas para compartir las parejas de sus electrones externos entre ambos núcleos atómicos.

En los enlaces metálicos todos los átomos comparten todos los electrones externos y los electrones libres son la razón de la conductividad eléctrica de los metales. Este " flujo " de electrones en un metal puede variar su densidad de carga, tanto como $10^{22} / \text{cm}^3$ o del orden de la magnitud del número de moléculas en el mismo volumen de un líquido.



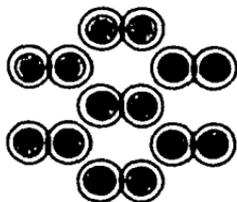
ENLACE IONICO



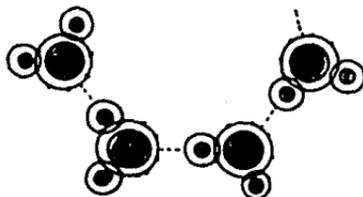
ENLACE
COVALENTE



ENLACE METALICO



ENLACE MOLECULAR



ENLACE HIDROGENO

FIG. 4 LOS CINCO TIPOS DE ENLACES

. Enlaces secundarios

Los enlaces secundarios o intermoleculares son responsables de su débil estructura, donde puede ocurrir fácilmente la ruptura de la estructura, dando un aumento en la deformación viscosa y plástica.

Los enlaces intermoleculares llamados de Van der Waals surgen del desplazamiento de cargas en átomos eléctricamente neutros o grupos de átomos. Existe una confusión en la nomenclatura, pues hay gente que considera todos los enlaces secundarios como enlaces de Van der Waals y otros restringen este nombre a las fuerzas de dispersión.

Los dipolos permanentes ocurren si el centro de gravedad de las cargas positivas y negativas no coinciden; como instancia tenemos el agua . Un tipo de magnetismo permanente es formado cuyo momento magnético (momento dipolo) es igual al tiempo de carga entre las distancias de los centros de carga.

El enlace hidrógeno es un tipo especial de dipolo, responsable de la asociación de moléculas tales como: el agua, alcohol, y ácido carboxílico. Con un contenido de energía comprendido entre 4 y 10 kcal / mol el enlace hidrógeno es el más fuerte de los enlaces secundarios.

Los dipolos inducidos que pueden ser generados por una molécula neutra o por dipolos permanentes también guían a la atracción mutua. Pueden ser permanentes o alternantes de acuerdo al carácter de la inducción de origen. Si hay un dipolo permanente la atracción puede cambiar durante la deformación.

Las fuerzas de dispersión durante el movimiento de los electrones alrededor del núcleo (positivo), hacen que los dipolos cambien continuamente al formarse y tengan un efecto de inducción en la vecindad de los átomos, resultando una atracción mutua. Esas fuerzas juegan un papel importante en la cohesión de la materia.

La interacción entre varias fuerzas originan principalmente la atracción de Van der Waals. En la Figura # 5 se muestra la contribución de cada una de varios efectos en la energía del

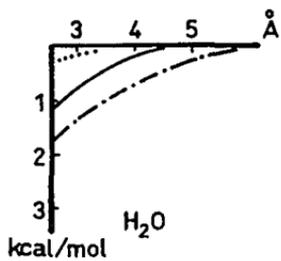
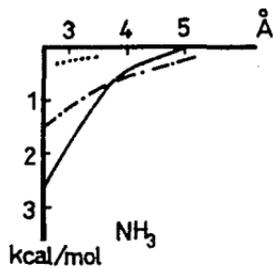
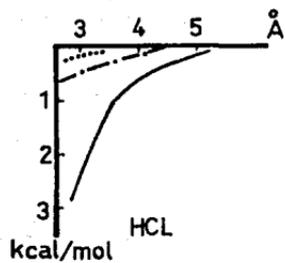


FIG5 CONTRIBUCION DE ENERGIA DEL ENLACE SECUNDARIO

enlace secundario total que puede variar considerablemente en magnitud para diferentes sustancias. Los dipolos OH y CO inducen dipolos, en donde cada átomo contribuye a la dispersión de fuerzas.

Se hace una clasificación de acuerdo a los incrementos de energía:

El caucho tiene un Δ^* cohesión de 1 - 2 kcal/ mol x cadena unitaria. El plástico tiene un Δ^* de cohesión de 2 - 5 kcal/ mol x cadena unitaria, las fibras tienen un $\Delta^* > 5$ kcal/ mol x cadena unitaria.

En los enlaces secundarios ocurren fenómenos interesantes, como son: la cohesión y las propiedades reológicas.

Muchas modificaciones ocurren debido a características inherentes en la materia o a cambios de estructura durante la deformación. Por ejemplo los polímeros pueden reducir su viscosidad por la orientación de sus moléculas.

La fuente de energía potencial puede atraer a cada uno de los pares de los átomos, considerando simultáneamente la fuente de alimentación de cada uno de ellos; los átomos circundantes darán como resultado un potencial que depende de e_r . Las vibraciones del átomo son en todas direcciones y tienen una frecuencia del orden de 10^{13} / seg debido a la agitación térmica. Sin embargo, si en cualquier impulso de energía debida a la vibración térmica, llega a ser mayor que e_r en un cierto momento, el átomo intentará migrar a la vecindad de la fuente. Un desarrollo de este proceso puede tomar una deformación plástica. El mecanismo de esta deformación es completamente análogo al de la relajación.

En un material cristalino se puede esperar un potencial equivalente en cada dirección cristalográfica, recordando que en un cristal el valor del esfuerzo puede ser diferente en cada una de las direcciones. Sin embargo, se considera que la energía potencial es distribuida en una sección aleatoria si se trata de un cuerpo amorfo.

Cada incremento en la tensión ocasionará nuevas migraciones de átomos y el estado de equilibrio se dará cuando no se incremente el número de átomos en el flujo.

La resistencia a la deformación depende de la estructura de la materia y de su energía expresada por el módulo de elasticidad en pruebas a la tensión y por el módulo de " corte " en pruebas de corte. En la práctica, se ha observado que el módulo es un promedio estadístico sobre un gran número de fuentes potenciales, en donde el desplazamiento de todos los átomos no son exactamente simultáneos por lo que el módulo nunca podrá ser constante a grandes ritmos de deformación. También hay que tomar en consideración las vibraciones irregulares de los átomos con amplitud pequeña.

La fuerza de cohesión máxima obtenible de un enlace secundario puede ser prácticamente realizado por el gran peso molecular y la orientación máxima de moléculas.

La capa molecular del flujo viscoso es obtenida por la acumulación de movimiento térmico de moléculas individuales, donde pueden realizar su independencia unas de otras en forma relativa. Hay dicha tendencia arriba del punto de temperatura de fusión, donde un gran número de moléculas tienen un exceso de energía cinética térmica.

Las moléculas en un líquido verdadero (arriba de la temperatura de fusión) se mueven aleatoriamente y no siguen un patrón ordenado desde un punto de vista estadístico.

En la Figura # 6 la parte sombreada representa el número de moléculas en un nivel de energía en particular. A una temperatura baja T_1 la mayoría de las moléculas tienen energía cinética abajo del nivel crítico. El flujo viscoso no se observa. En la temperatura T_2 se tiene casi el punto de fusión (suponiendo solidificación amórfica) un número sustancial de moléculas están en disposición al movimiento, donde el flujo viscoso llega a ser evidente. A la temperatura T_3 arriba del punto de fusión, ocurre flujo libre porque casi todas las moléculas se mueven libremente.

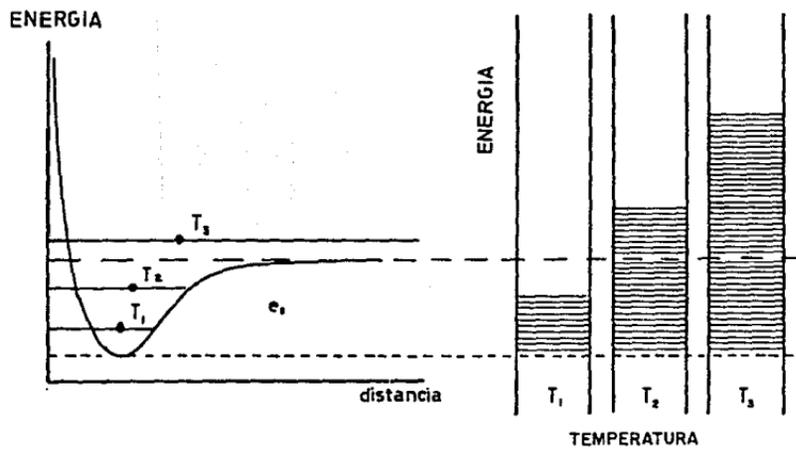


FIG. 6 DISTRIBUCION DE LA ENERGIA TERMICA DE LAS MOLECULAS.

Es claro que el flujo viscoso depende de la fracción de moléculas, que se mueven libremente o que tienen una energía cinética arriba del nivel crítico (e_{c}). La fracción es conocida y es proporcional a $\text{EXP}(-e_{\text{c}} / k \cdot T)$, por lo que la viscosidad muestra una dependencia de la temperatura.

$$\mu = A \cdot \text{EXP}(E_{\text{v}} / RT) = A \cdot \text{EXP}(E_{\text{v}} / N k T)$$

En niveles absolutos e_{c} y E_{v} / N son diferentes porque el primero es idealizado y existe una interacción de intercambio molecular.

Para moléculas pequeñas E_{v} es aproximadamente un tercio del calor de vaporización, además está correlacionado con las fuerzas de cohesión de la materia y el calor específico. Houwink / Decker^o.

. Estructura de sistemas multifásicos

Muchos materiales consisten de una mezcla íntima de dos fases diferentes. Una fase está definida como una región en la que todas las propiedades (composición, presión, etc.) son uniformes y que es limitada por una superficie en la que esas propiedades cambian abruptamente. Ejemplos de tales sistemas pueden ser: soluciones de macromoléculas y soluciones miscelares básicamente. El tamaño mínimo de una partícula (de 100 Å a micrones) que forma una fase, depende de las propiedades del material.

Las propiedades reológicas de una dispersión varían entre el líquido Newtoniano y el sólido rígido. Muchos sistemas dispersos muestran un comportamiento reológico típico, que es llamado plástico y que es de considerable importancia en sus aplicaciones. Si una dispersión no muestra un comportamiento plástico, generalmente exhibirá propiedades de flujo no Newtoniano, tixotrópico o comportamiento pseudoplástico.

La estructura de sistemas dispersos en relación a las propiedades reológicas, queda descrita por sus partículas dispersas (elementos estructurales) y las fuerzas que actúan sobre esos elementos.

III.2 Correlación Entre Medidas Relativas y Absolutas de Viscosidad

Durante la recopilación de información de este trabajo se encontraron una serie de correlaciones interesantes que relacionan a la viscosidad en segundos Saybolt [s.s.u.] (medida relativa) con la viscosidad [cp] (medida absoluta).

Tales correlaciones no fueron desarrolladas a partir de fluidos de perforación por lo cual es recomendable utilizarlas con mucha reserva y se presentan simplemente como una alternativa para poder abordar el tema. J.A.Gómez¹⁰.

No se tiene que perder de vista que las unidades [ssu] son diferentes a las unidades en segundos Marsh.

Si se llegara a efectuar alguna prueba, es necesario hacer una agitación apropiada del lodo y medir su densidad en gr/cm^3 .

A continuación se presentan las correlaciones:

$$\text{si } 50 < \text{ssu} < 100 \rightarrow \nu' = 0.22 * \text{ssu} - \frac{195}{\text{ssu}}$$

$$\text{si } \text{ssu} < 50 \rightarrow \nu' = 0.22 * \text{ssu} - \frac{180}{\text{ssu}}$$

$$\text{si } \text{ssu} > 100 \rightarrow \nu' = 0.22 * \text{ssu} - \frac{135}{\text{ssu}}$$

donde:

$$\nu' = \text{Viscosidad cinemática [cstoke]}$$

$$\text{ssu} = \text{segundos Saybolt}$$

$$\nu \text{ [stoke]} = 100 \nu' \text{ [cstoke]}$$

$$\therefore \mu \text{ [poise]} = \rho \text{ lodo [gr/cc]} * \nu \text{ [stoke]}$$

no hay que olvidar que Chilingarian and Vorabutr⁷ mencionan que la viscosidad de embudo medida no puede ser manipulada matemáticamente como los datos obtenidos de un viscosímetro rotacional.

III.3 Clasificación Reológica de los Fluidos de Perforación

De acuerdo con lo visto anteriormente han clasificado a los fluidos como Newtonianos y no Newtonianos. Aquellos fluidos que sigan el comportamiento descrito por la ley de viscosidad de Newton serán llamados Newtonianos, medidos a una determinada presión y temperatura. Un ejemplo de estos fluidos se pueden encontrar en el agua y la glicerina. Mientras que los que se comporten en forma diferente son llamados fluidos no Newtonianos. No tienen una relación lineal entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte. Como se puede apreciar en la Figura # 7.

Estos últimos son subdivididos en cuatro grupos, los cuales son:

- a) Independientes del Tiempo
- b) Dependientes del Tiempo
- c) Viscoelásticos
- d) Fluidos Complejos

A continuación se da una breve descripción de cada uno de estos grupos.

III.3.1 Fluidos independientes del tiempo

Existen tres fluidos de tiempo independiente que son:

- Plásticos de Bingham

Es un comportamiento lineal, igual que en los fluidos Newtonianos, la diferencia es que se requiere un esfuerzo de corte mínimo (diferente de cero) para que el fluido pueda iniciar su

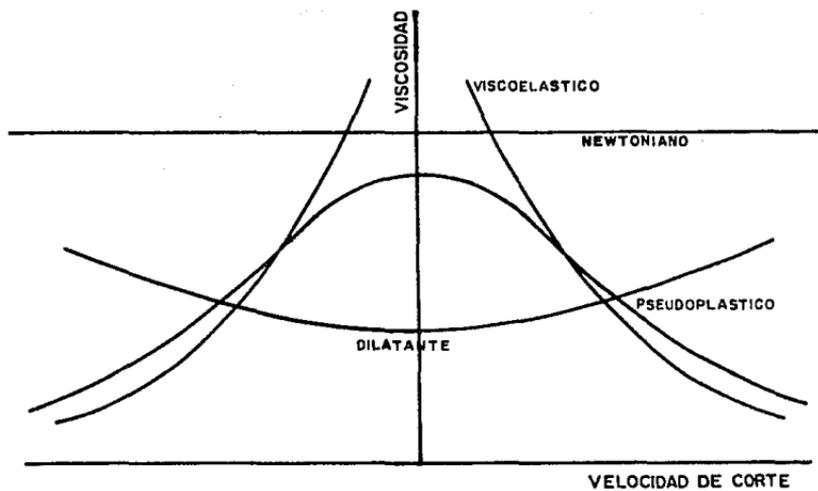


FIG. 7 CLASIFICACION REOLOGICA DE LOS FLUIDOS.
NEWTONIANO Y NO-NEWTONIANO

flujo, en los fluidos Newtonianos el punto de cedencia es cero.

Gráficamente, el punto de cedencia nos representaría la ordenada al origen, mientras que la pendiente de la recta esta representando la viscosidad plástica.

La representación matemática del plástico de Bingham es:

$$\tau = \gamma_p + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$$

donde:

| | | |
|----------------|----------------------|------------------------------|
| τ | esfuerzo de corte, | [lbr / 100pie ²] |
| γ_p | punto de cedencia, | [lbr / 100pie ²] |
| μ_p | viscosidad plástica, | [cp] |
| $\dot{\gamma}$ | velocidad de corte, | [seg ⁻¹] |

- Fluidos pseudoplásticos

Son fluidos que se caracterizan por disminuir su viscosidad al incrementar la velocidad de corte.

Un ejemplo de fluidos pseudoplásticos son:

Maltas, algunos fluidos base agua y soluciones poliméricas.

- Fluidos dilatantes

Son fluidos que se caracterizan por aumentar su viscosidad al al incrementar la velocidad de corte.

Un ejemplo de fluidos dilatantes son:

Almidones, mica en suspensión de agua entre otros.

La representación del comportamiento reológico de los dos casos expuestos anteriormente, puede representarse con el modelo reológico de ley de potencia, que está expresado por:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

La representación analítica del modelo en escalas logarítmicas es una línea recta, cuyas constantes características son presentadas a continuación:

- K Es el índice de consistencia, que es proporcional a la viscosidad del fluido y representa la ordenada al origen de la recta.
- n Es el índice de comportamiento reológico, que es la medida del grado de desviación del fluido respecto al comportamiento de un fluido Newtoniano. Analíticamente representa la pendiente de la recta.

Cuando " n " decrece el fluido llega a ser de corte más delgado o pseudoplástico. " K " es indicativo de la bombeabilidad y sobre todo indicativo de lo viscoso (espeso) del fluido.

En la práctica una gráfica que involucre diferentes velocidades de corte llega a ser una línea curva. Consecuentemente un fluido de perforación puede tener un número infinito de valores de " n " y " K " por lo cual habrá que asociar una velocidad de corte representativa única.

Los materiales más efectivos para aumentar los valores del índice de consistencia " K " son la bentonita y la goma xantana. Para valores altos de " K " se ha observado floculación, mientras que para valores bajos de " K " se ha observado defloculación.

La dilución es uno de los métodos más efectivos para reducir el índice de consistencia.

La fuerza aplicada al fluido (presión de la bomba) es la que origina el flujo del mismo (deformación irreversible) a través de ciertas condiciones geométricas particulares.

Es importante notar que algunos materiales, tales como polímeros de celulosa, mientras incrementan el punto de cedencia tienen pequeños efectos en el incremento del índice de consistencia. Es recomendable utilizar goma xantana si se presentan valores " n " inferiores a 0.5 para lodos base agua.

La dilución y adición de sólidos al lodo usualmente causa un incremento en el valor del índice de comportamiento de flujo.

Específicamente enfocándose en el modelo reológico de Ley de Potencias se tienen los siguientes criterios:

| | | |
|------------|---|-----------------------------|
| si $n = 1$ | → | el fluido es Newtoniano |
| si $n < 1$ | → | el fluido es pseudoplástico |
| si $n > 1$ | → | el fluido es dilatante |

Pero hay que recordar que aún dentro de los fluidos Newtonianos se pueden encontrar diferencias respecto a la pendiente, como se observa en la Figura # 8 (en ambos casos el comportamiento es lineal).

Una modificación al modelo de Ley de Potencia es aquella en que ha sido incluido el valor mínimo del esfuerzo de corte requerido para iniciar el flujo.

III.3.2 Fluidos dependientes del tiempo

Como se mencionó antes son fluidos no Newtonianos cuyo comportamiento es no lineal y dependen de la variable tiempo. Dentro de esta categoría se encuentran los fluidos tixotrópicos y reopécticos.

- Fluidos Tixotrópicos

La tixotropía es la propiedad de los lodos que consiste en gelificar el fluido en estado de reposo y adquirir su fluidez al iniciar su movimiento.

Por tanto los fluidos tixotrópicos tienen una estructura interna que aumenta su esfuerzo gel al estar en reposo. Presentan estructura de corte interno, pueden sufrir cambios por: floculación, defloculación o reacción química de la fase interna o dispersa. La adhesión, las fuerzas eléctricas, la interacción de partículas, la concentración de las mismas, la polaridad eléctrica y la forma de las partículas están relacionados con la microestructura de la materia. Estos factores definen la importancia en describir la dependencia del tiempo.

La estructura del fluido es rota bajo un incremento en la deformación. Al cesar la deformación en la estructura, la

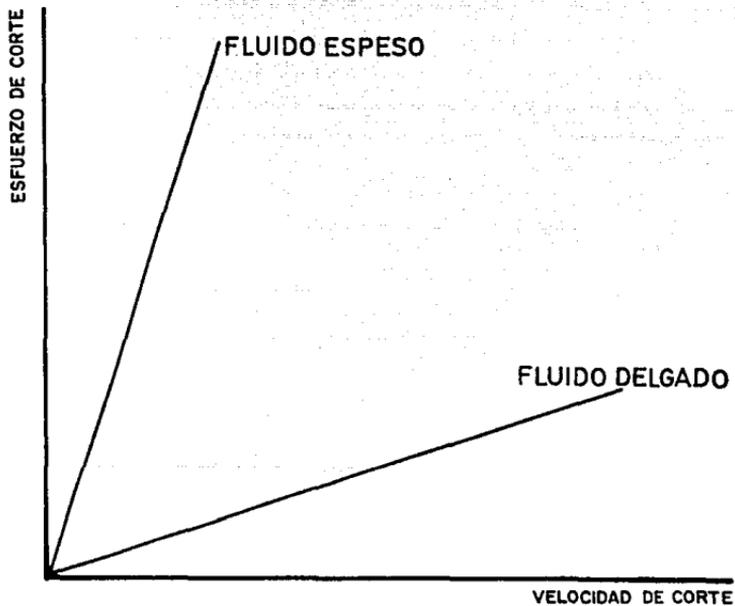


FIG.8 COMPORTAMIENTO DE FLUIDOS NEWTONIANOS

sustancia regresa a sus dimensiones originales. Como se puede observar en las Figuras 9A / 9B. P. Goldblatt¹¹.

Las ecuaciones de plásticos de Bingham y Ley de Potencias pueden utilizarse para este comportamiento, siempre y cuando ya haya desaparecido la estructura gel.

Un ejemplo de este tipo de fluidos son: algunos lodos de perforación (base agua), pinturas, etc.

Se requiere ejercer una presión definida para iniciar el flujo de un fluido tixotrópico. Cuando el movimiento del fluido inicia, la estructura gel comienza a romperse, resultando una disminución en la resistencia viscosa. Como la resistencia viscosa decrece, la velocidad de flujo inicia a incrementarse y la presión de la bomba inicia a decrecer. (Figura # 10).

- Fluidos Reopécticos

Tienen un comportamiento contrario al de los fluidos tixotrópicos (anti-tixotrópico), si se incrementan los esfuerzos en su estructura, aumenta la viscosidad a una velocidad de corte constante. Ejemplos de este tipo de lodos son: Suspensiones de yeso, grasas para balero, etc.

III.3.3 Fluidos viscoelásticos

Estrictamente el término viscoelástico es aplicable a los sólidos como sustancia. El término elastoviscoso es aplicable a líquidos elásticos. Pero ambos poseen dichas propiedades: viscosidad y elasticidad.

Un líquido puede adquirir dichas propiedades por medio de la adición de moléculas flexibles en solución, por sólidos dispersos o partículas líquidas.

En el movimiento de corte oscilatorio la elasticidad produce un retraso entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte. Las propiedades viscoelásticas se calculan con el método dinámico, en donde el esfuerzo y la deformación siguen un patrón sinusoidal.

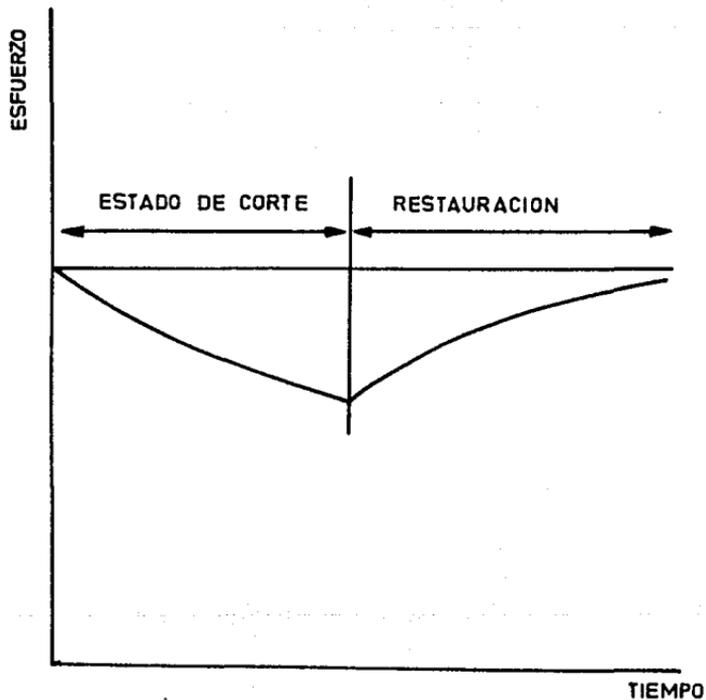


FIG. 9-A COMPORTAMIENTO DE UN FLUIDO TIXOTROPICO.

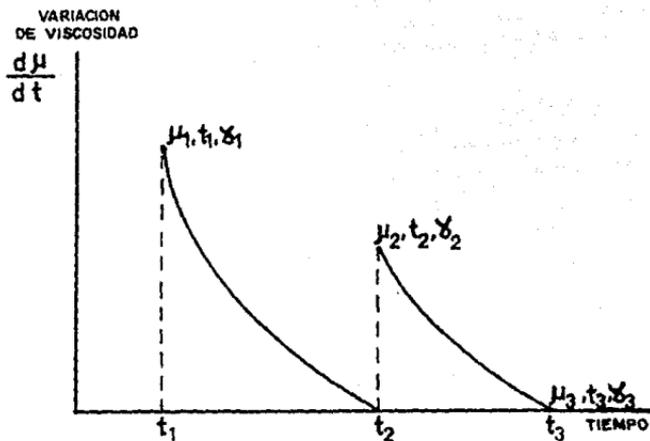


FIG.9-B COMPORTAMIENTO TIXOTROPICO
CUALITATIVO

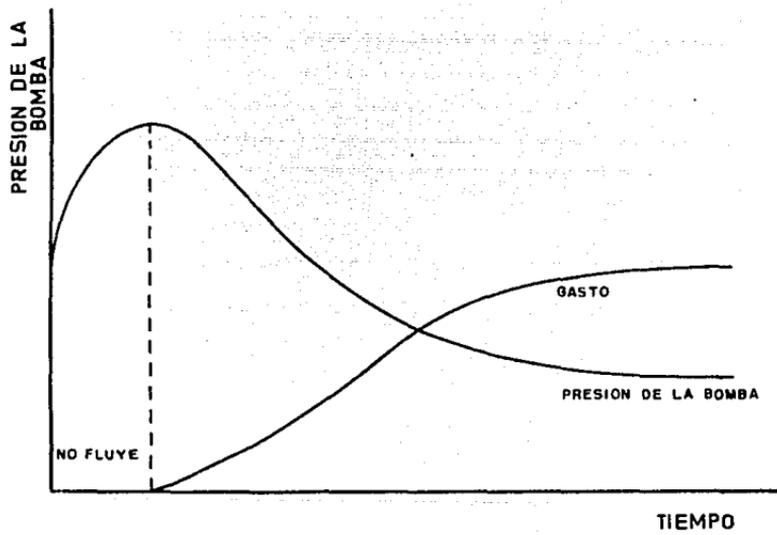


FIG. 10 COMPORTAMIENTO DE UN FLUIDO TIXOTROPICO

$$\frac{\text{máximo esfuerzo}}{\text{máxima deformación}} = \text{valor absoluto del módulo complejo} = |G^*|$$

$$\text{módulo de elasticidad} = G' = |G^*| \cos \theta$$

$$\text{módulo de viscosidad} = G'' = |G^*| \sin \theta$$

$$\text{Viscosidad dinámica} = \mu = G'' / 2\pi f$$

donde:

- G^* , G' , G'' [dina / cm²]
- θ [grados]
- f [ciclos/seg]
- μ [poise]

El diagrama esquemático puede verse en la Figura # 11. Para mayor profundidad se pueden consultar a J. Harris¹², A. Sisko and L. Brunstrum¹³.

Las propiedades viscosas de estos fluidos hacen que el lodo de perforación presente cierto grado de elasticidad.

Se puede poner como ejemplo a los polímeros viscoelásticos que tienden a producir elongaciones al estar sometidos a altas velocidades de corte y volver a su estado original al suprimirse dicho efecto. Cuando pasan a través de las toberas de la barrena las caídas de presión por fricción se reducirán en el espacio anular con baja disminución de corte; los polímeros permiten que el lodo regrese a su estado actual, mejorando su capacidad de acarreo. Esta característica viscoelástica es la habilidad de adelgazar el esfuerzo del lodo de perforación.

Algunos polímeros utilizados para obtener altas propiedades visco-elásticas son: Polímero Ben-Ex, polímero X-C, polímero pvc. Obviamente habrá que verificar su temperatura máxima de trabajo.

III.3.4 Fluidos complejos

Existen diferentes fluidos que pueden mostrar diversos tipos

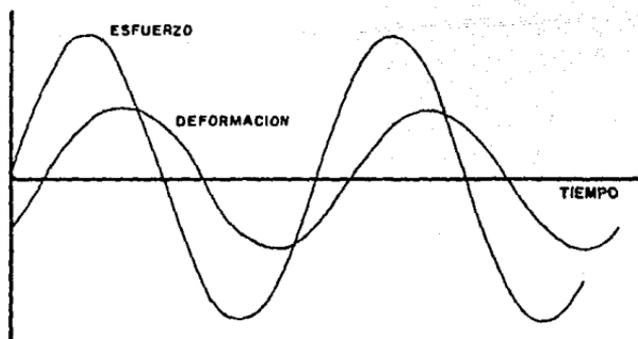


FIG. 11 RESPUESTA DE UN FLUIDO VISCOELASTICO EN UN MOVIMIENTO DE CORTE OSCILATORIO.

de comportamiento reológico, bajo condiciones variables de: Velocidad de corte, temperatura, presión, tiempo, concentración de fases, peso molecular de fases.

Dichos comportamientos pueden ser cualquiera de los antes mencionados:

Tixotrópicos, pseudoplásticos, plásticos de Bingham, reopéticos y dilatantes. Alguno de ellos podrán presentarse en un mismo fluido, obviamente a diferentes tiempos y no en forma simultánea.

III.4 Variables que Caracterizan el Comportamiento Reológico

Atendiendo las propiedades reológicas de los fluidos de perforación dicho comportamiento estará definido por las siguientes variables:

a) Viscosidad del lodo

Es la resistencia interna de un fluido al ser sometido a esfuerzos de corte, causada por la fricción mecánica debida a la acción de las partículas sólidas del lodo.

La viscosidad de un fluido de perforación puede expresarse en medidas relativas o cualitativas y absolutas o cuantitativas. Las primeras tienen como objetivo detectar las variaciones apreciables en las propiedades de flujo, mientras que las segundas cuantifican numéricamente las propiedades de flujo para diagnosticar y efectuar las operaciones correctivas necesarias.

Dentro de las medidas relativas se tiene a la viscosidad de embudo Marsh, dicha viscosidad se expresa en segundos Marsh y está referida al tiempo que tarda en escurrir un volumen lodo definido en una copa de aforo.

En realidad es una medida cualitativa de la consistencia de un fluido de perforación, dado que variaciones de 1 a 3 segundos en la viscosidad efectiva no reflejan cambios apreciables en la viscosidad plástica, esfuerzo gel y valor de cedencia.

Incrementos de 1 a 2 segundos por hora de circulación, puede indicar un serio problema por exceso de sólidos o contaminación de químicos. También se tiene a la viscosidad aparente en dicho rubro.

Dentro de las medidas absolutas tenemos a la viscosidad plástica que puede ser determinada con ayuda de un viscosímetro rotacional Fann de velocidad variable. También se puede incluir dentro de esta categoría al valor de cedencia y al esfuerzo gel. La viscosidad plástica no puede ser determinada exactamente como una función de la concentración de sólidos, por lo que será considerada como una medida indicativa del "contenido de sólidos"

en el fluido de perforación.

La acción de las partículas sólidas y líquidas, así como la deformación de estas últimas dependen directamente de la naturaleza, tipo, forma, tamaño, distribución y estado de las partículas que se encuentren presentes en el lodo.

En cuanto al tipo y tamaño de partículas sólidas existentes en el lodo de perforación, las hay planas, de arcilla bentonita con capas absorbentes, de los recortes separados de la formación, partículas de barita y residuos de cemento entre otras. Es deseable que la distribución del tamaño de las partículas formen un enjarre tal que su permeabilidad sea mínima para evitar pérdidas de filtrado del fluido de perforación, mientras que las dimensiones no deberán corresponder al tamaño coloidal debido a que se dañaría a la formación por penetración de finos, reduciendo el área de flujo de la misma. Por otra parte los sólidos de gran tamaño y de diferente forma originarán desigualdades en el espesor del enjarre, causando una alta permeabilidad del mismo.

Las cadenas poliméricas favorecen al enjarre, pues evitan el endurecimiento y adelgazamiento del mismo. Aunque las partículas de bentonita también le proporcionan buenas propiedades.

Las partículas micrométricas creadas por reactivos dispersantes proporcionan bajos valores de pérdidas por filtrado API en lodos dispersos, pero pueden ser más perjudiciales que las partículas de una micra.

En cuanto a los tipos de enjarre se puede decir que existen dos tipos:

- . compresibles
- . incompresibles

La bentonita forma el enjarre de mayor compresibilidad además de controlar la pérdida por filtración.

En un sistema de lodos no disperso es fácil remover los sólidos perforados, por tanto se tendrá una viscosidad plástica más baja que un lodo disperso con la misma densidad.

Por tal motivo, la acumulación de sólidos perforados, la

adición de barita, químicos y contaminantes, contribuirán al incremento en la viscosidad plástica.

El aspecto contrario del párrafo anterior nos permite afirmar que:

La dilución del lodo con agua, el uso efectivo del equipo de control de sólidos, la floculación de partículas en la línea de descarga, tenderán a reducir la viscosidad plástica del lodo.

Dado su carácter cualitativo un tratamiento para ajustar la viscosidad plástica sería injustificado.

La viscosidad efectiva dependerá del punto que se desee estudiar dentro del sistema de circulación donde se encuentra el fluido de perforación ya que las condiciones de flujo varían puntualmente. Deberá cumplir con las siguientes funciones:

- . Debe tener suficiente "viscosidad efectiva" en el espacio anular para mantener el agujero limpio.
- . Ser suficientemente baja la " viscosidad efectiva " en las presas para que el fluido se desprenda de los recortes al llegar a la superficie.
- . La viscosidad del fluido en la barrena deberá proporcionar los mejores valores de penetración.

La densidad tiene un fuerte impacto en la viscosidad, para eliminar dicha influencia se puede utilizar a la viscosidad cinemática, que se define como la relación entre la viscosidad dinámica y su correspondiente densidad. ($\nu = \mu / \rho$).

El efecto de la viscosidad típicamente es estudiado considerando el flujo de un fluido incompresible. El flujo es influenciado principalmente por fuerzas viscosas en flujo laminar, y por fuerzas de inercia en el flujo turbulento. Si se efectúa la relación entre la fuerza viscosa y la fuerza de inercia se tendrá:

$$F_{\mu} \sim \rho \nu^2 L^2$$

$$F_i \sim \mu \nu L$$

$$F_{\mu} / F_{i} = \frac{\rho v^2 L^2}{\mu v L} = \frac{\rho v L}{\mu} = N_R$$

N_R es la relación de fuerzas y se llama número de Reynolds, es adimensional e indicativo de las regiones de flujo laminar, zona crítica y flujo turbulento.

Al estar utilizando sustancias puras entonces se hablará de su coeficiente de viscosidad que es una constante que depende de la temperatura y no existe componente elástica en la deformación.

b) Esfuerzo de corte

El esfuerzo de corte es la fuerza requerida por unidad de área para iniciar un gradiente de velocidades dando movimiento al fluido.

$$\tau = \frac{\text{Fuerza de Corte}}{\text{Area}} \quad \left[\frac{\text{lbf}}{100 \text{ PIE}^2} \right]$$

Los fluidos se distinguen por su comportamiento de flujo, el cual se genera mediante un esfuerzo externo aplicado, cuyo resultado es un gradiente de velocidades.

Puede ser originado entre dos placas, ya sean éstas paralelas o concéntricas, (una fija y otra movable). Cuando el flujo es laminar la velocidad en la pared de la placa fija es cero mientras que la velocidad de la placa en movimiento imparte al fluido que está en contacto con ella la misma velocidad. Las "capas" de fluido intermedio variarán su velocidad en forma ascendente en un rango comprendido entre los valores de [0, V]. Siendo V la velocidad de la placa en movimiento.

De lo anterior podemos deducir que la velocidad de corte está definida por la siguiente expresión:

$$\gamma = \frac{\text{Velocidad}}{\text{Distancia } \perp} \quad \left[\frac{1}{\text{seg}} \right]$$

Los conceptos arriba mencionados fueron utilizados por Isaac Newton quien estableció que la viscosidad (μ) de un fluido es proporcional al esfuerzo de corte (τ).

$$\tau = (\text{constante}) \times \gamma$$

Newton define a la constante de proporcionalidad como el coeficiente de viscosidad.

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

El concepto de mayor importancia es que se maneja una viscosidad constante (valor único) para todas las velocidades de corte, es decir se guarda siempre la relación τ / γ los fluidos que tienden a seguir este comportamiento son: el agua, agua salada, la glicerina, etc. Esta es una relación lineal para los fluidos Newtonianos. Analíticamente, es una recta cuya ordenada al origen es cero y su pendiente es la viscosidad absoluta del fluido. Cuando un fluido no guarde la relación antes mencionada se estará hablando de un fluido no Newtoniano.

c) Punto de cedencia

El punto de cedencia se define como el valor mínimo del esfuerzo de corte aplicado a un fluido para que éste inicie su movimiento.

Es la medida de las fuerzas electroquímicas en el lodo, bajo condiciones de flujo. Dichas fuerzas son debidas a cargas en la superficie reactiva de las partículas, a las cargas eléctricas y a las fuerzas de Van der Waals, así como a la presencia de electrólitos en la fase acuosa.

El valor de cedencia es el factor dominante que afecta las pérdidas por fricción, la densidad de circulación equivalente, a la capacidad de acarreo del fluido de perforación. El valor de cedencia depende directamente del control de sólidos perforados.

Mantener el valor de cedencia entre límites exactos requiere un efectivo control de sólidos y un tratamiento químico adecuado.

Pequeñas cantidades de agua no afectan el valor de cedencia, mientras que grandes cantidades de agua afectan la capacidad de acarreo y propiedades estabilizadoras.

En un sistema de lodo disperso se puede reducir el valor de cedencia si removemos los sólidos mecánicamente, con la adición de dispersantes, de lo contrario se propiciará floculación en la línea de descarga. Los dispersantes químicos neutralizan las superficies reactivas de las partículas, disminuyendo la actividad electroquímica y la consecuente reducción del valor de cedencia del lodo.

Para aumentar el valor de cedencia de un lodo disperso, es necesario añadir bentonita y polímeros (CMC). La cantidad de tratamiento químico dependerá del grado de ajuste al valor de cedencia, del volumen de fluido total en circulación y del contenido total de sólidos.

En sistemas de lodos no dispersos con bajo contenido de sólidos hay que evitar un sobretratamiento con bentonita, polímeros y la acumulación de sólidos perforados para no modificar sensiblemente el valor de cedencia.

d) Gelatinosidad

Es la propiedad que permite que el lodo mantenga en suspensión a los recortes de la formación al dejar de circular el lodo. Desde un punto de vista molecular es la medida de las fuerzas de atracción molecular ejercidas entre las partículas del fluido de perforación, medidas a condiciones estáticas.

Dicha propiedad está involucrada en el desplazamiento de los recortes y depende directamente del control efectivo de sólidos.

Su medición se realiza a 10 segundos y a 10 minutos de reposo, a la mínima velocidad del viscosímetro rotacional Fann 35 de velocidad variable (3 rpm).

Es importante tener bajo consideración que el esfuerzo gel es

diferente al valor de cedencia, indirectamente están relacionados dado que las fuerzas de atracción entre las partículas influyen en ambas medidas.

Cualitativamente, los geles son clasificados en base a las lecturas antes mencionadas, considerando la variación existente entre los valores. No debe perderse de vista que por el simple hecho de conocer estos valores, no necesariamente estamos describiendo el comportamiento del gel y se puede incurrir en errores graves.

. Gel frágil

Los esfuerzos gel son muy bajos e idénticos a 10 segundos y a 10 minutos. Su forma general: $N / N \quad N = 1,2,3$

. Gel progresivo

Valores bajos e intermedios a la primera lectura, valores muy altos en la segunda lectura (2/25, 6/35, 15/60).

. Gel plano

Son esfuerzos gel muy semejantes en la primera y segunda lectura de medios a altos (13/14, 21/23).

Los gels apropiados son aquellos con bajo a medio esfuerzo gel a la primera lectura, el cual aumenta a valores medios e intermedios a la segunda lectura (2/4, 4/8, 5/10).

En estas medidas se hace intervenir a la variable tiempo, cuya respuesta puede arrojar cualquiera de los comportamientos antes mencionados. Sin embargo es posible efectuar pruebas en laboratorio que permitan involucrar otras variables como es la temperatura, donde se observará otro tipo de comportamiento reológico, ver Figura # 14 . L. M. Edwards⁹.

Es necesario conocer el valor del esfuerzo gel para ayudar a mantener los sólidos en suspensión durante las paradas y conexiones por viaje de tubería. Respecto a estos últimos hay que tener cuidado en la introducción y sacado de tubería, ya que se producen efectos de pistoneo y succión; dichos efectos actúan sobre la columna de lodo ocasionando incrementos o decrementos en

la presión hidrostática. Esta presión actúa directamente en la formación y puede lavar, golpear o disolver la formación si los esfuerzos gel son muy altos. En casos extremos se puede inducir una fractura y ocasionar la pérdida del fluido de perforación o un brote, dependiendo del tipo de yacimiento. Por tal motivo es recomendable realizar un movimiento lento en los viajes de la tubería, levantarla y rotarla mientras la bomba deberá estar circulando lodo.

El esfuerzo gel es una de las propiedades clave que justifican el tratamiento al sistema del lodo para evitar problemas.

III.4.1 Viscosidades efectivas de circulación

Los fluidos de perforación muestran cambios de viscosidad en diversas partes del sistema de circulación. Estos se deben principalmente a la variación en la geometría de las tuberías, específicamente el diámetro; así como del gasto volumétrico proporcionado por la bomba.

Por tal motivo si se desea definir la viscosidad efectiva de un fluido de perforación en un punto cualquiera del sistema, lo primero que se tendrá que conocer es la velocidad de corte actuante, medida a condiciones de presión y temperatura locales.

La clasificación de las velocidades de corte en un sistema de circulación están dadas de la siguiente manera:

| SECCION DEL SISTEMA DE CIRCULACION | VELOCIDAD [seg^{-1}] |
|---------------------------------------|------------------------------------|
| Tubería de perforación | 100 - 500 |
| Lastrabarreras | 700 - 3000 |
| Toberas | 10000 - 100000 |
| Espacio anular | 10 - 500 |
| Presas | 0 - 5 |

Dichas velocidades pueden ser reproducidas por un viscosímetro de velocidad variable. La viscosidad del lodo medida a la velocidad de corte en la barrena es posible determinarla con un viscosímetro capilar. Se requiere efectuar la conversión de rpm a seg^{-1} con el factor de 7.03 .

Con las viscosidades efectivas de circulación es posible realizar una clasificación de valores por medio del análisis gráfico de datos.

III.4.2 Descripción general del análisis gráfico

Trazar en papel logarítmico de 3 x 5 ciclos el perfil del lodo de perforación.

- Obtener las lecturas requeridas del viscosímetro medidas a las siguientes velocidades: 600, 300, 200, 100, 6, 3. [rpm].
- Convertir la velocidad de rpm a seg^{-1} con el factor de 1.7
- Calcular la viscosidad aparente en cp:

$$\mu_a \text{ [cp]} = \text{lectura} \times \text{Factor de Multiplicación}$$

El Factor de Multiplicación se obtiene de la siguiente forma:

$$F.M. = \frac{300}{\text{rpm}} ; \text{rpm} = \text{velocidad de interés}$$

- Llevar los valores en forma gráfica. A las viscosidades aparentes les corresponde el eje de las ordenadas, mientras que a las velocidades (seg^{-1}) les corresponde el eje de las abscisas
- Obtener la velocidad de corte en el espacio anular:

$$\gamma_{E.A.} \text{ [seg}^{-1}\text{]} = 2.4 \cdot V \cdot (D_h - D_p)$$

$$V_{EA} = \text{velocidad anular [pie/min]} = \frac{Q_{bmb} \text{ (bl/min)}}{\text{Vol. agujero (bl/pie)}}$$

Hay que realizarlo por cada segmento del espacio anular y cada valor en particular representará la viscosidad efectiva. El objetivo del perfil de velocidad es determinar la viscosidad efectiva del fluido de perforación a condiciones de flujo. Así como estimar la viscosidad en la barrena, extrapolando el perfil de la viscosidad a 100,000 seg^{-1} .

$$\gamma \text{ barrena } [\text{seg}^{-1}] = 72 \cdot V_n / D_n$$

V_n = velocidad en las toberas : pie/seg

D_n = diámetro de las toberas : pg

Una aplicación importante del análisis gráfico es que se puede utilizar al estar efectuando las operaciones de perforación. Cualquier cambio en la inclinación de la recta puede ser indicativo de la presencia de sólidos o algún contaminante. Los problemas de limpieza serán observados en cuanto haya un incremento en el valor de cedencia, o exista un decremento del valor de circulación. Con lo anterior es posible determinar el efecto de cualquier tratamiento en la viscosidad efectiva del lodo de perforación.⁵

III.5 Relación entre Variables y Modelos Reológicos

Cada una de las variables reológicas que interactúan directamente en un lodo de perforación, modificarán sus propiedades en menor o mayor grado, al considerar las condiciones iniciales del mismo.

Si las variaciones de las mismas son muy severas vendrán a implicar una serie de problemas, lo cual implicará tiempo y costos tanto de tratamiento como de perforación.

Por tal motivo se han desarrollado diversos modelos reológicos con el propósito de predecir las variaciones y el comportamiento que puedan sufrir los lodos al estar efectuando la perforación en un yacimiento.

Para ello se trata de simular y manejar en los modelos las variables reológicas más frecuentes, pero difícilmente se lograrán involucrar todas y cada una de ellas en un modelo reológico único.

Una alternativa sería expresar la relación de variables como una serie de potencias, de tal manera que se encontrara una función del tipo:

$$\mu = f(T, t, \gamma, c, M, P, \rho, pH, \text{filtrado, tipo de componentes})$$

Como se puede observar en primera instancia no es nada sencillo encontrar una solución a dicho problema. Sin embargo ha habido una serie de intentos de predecir la viscosidad en función de alguna de esas variables.

Por tal motivo es que se presentan en los siguientes subtemas el efecto que tienen las variables reológicas en los lodos de perforación, así como los modelos empleados para predecir diferentes comportamientos y parámetros reológicos.

III.5.1 Efecto de variables reológicas en lodos de perforación

Cada variable reológica tiene una influencia diferente en el

fluido de perforación, la sensibilidad del lodo estará determinada por la naturaleza de cada una de ellas, así como por la magnitud y el tiempo de exposición entre otras. A continuación se da un tratamiento particular a aquellas variables de mayor importancia. Sin olvidar que en realidad interactúan simultáneamente en el lodo de perforación.

• Efecto por tipo de Componente

La forma, tamaño, e interacción de moléculas influyen directamente en la resistencia al flujo, se ha observado que la viscosidad aumenta a medida que el tamaño de las moléculas también aumentan, como ejemplo ilustrativo se tiene:

| Componente | Viscosidad [cp] |
|---------------------------------|-----------------|
| C ₆ H ₆ | 0.003 |
| C ₂₀ H ₄₂ | 1.0 |

La atracción polar entre las moléculas de agua es relativamente fuerte, tal atracción resultará en una gran actividad de energía.

Un supuesto que se hace con cierta frecuencia es que las características plásticas de soluciones líquidas no difieren significativamente de los líquidos puros. Claro está que no siempre se cumple dicha suposición y se cumplirá bajo ciertas condiciones muy particulares.

Si la viscosidad de la mezcla es apropiadamente expresada en términos de la relación de sus componentes y propiedades se tiene que:

$$\log \mu_m = m \log \mu_A + (1-m) \log \mu_B - f(q_m, T)$$

donde "A" representa al solvente, mientras que "B" se refiere a las moléculas del soluto; q_m es el ritmo de calor molar de la

mezcla. Si q_m tiende a cero se tendrá un líquido ideal. Si $f(q_m, T)$ es diferente de cero entonces se tendrá una desviación respecto al caso ideal, positiva, negativa o nula.

Dentro de este contexto se tiene a la viscosidad de Einstein:

$$\mu_{\text{EINSTEIN}} = \mu_0 (1 + 2.5v)$$

donde:

v = fracción de volumen del soluto

μ_0 = viscosidad de un líquido de Newton con esferas dispersas

se supone que las partículas son esféricas, por lo cual el tamaño de las esferas dispersas no afectan a la viscosidad.

Para polímeros de gran peso molecular, el efecto en la viscosidad no se ve modificado sensiblemente por el tamaño de las moléculas del polímero B (soluto).

En el estudio de los yacimientos geotérmicos es necesario perforar con un lodo que sea capaz de no degradarse fácilmente con la temperatura, por lo cual frecuentemente son utilizados productos poliméricos. Dichos productos vienen a proporcionar propiedades plásticas al lodo, modificando su comportamiento reológico.

En términos de su comportamiento reológico las mezclas de polímeros muestran muchas variedades de respuesta y en un intento por entenderse se ha hecho una clasificación de mezclas de polímeros, basada en la desviación de propiedades reológicas de los componentes constitutivos. C. Rangel et al. ¹⁴

1.- Mezclas de desviación positiva

Son sistemas donde la viscosidad de la mezcla es mayor que la viscosidad del componente puro.

2.- Mezclas de desviación negativa

Son sistemas donde la viscosidad de la mezcla es menor que la

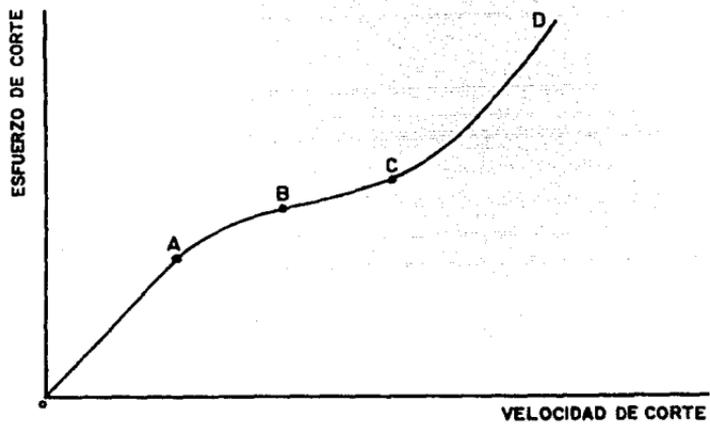


FIG.12 FLUJO GENERALIZADO
EN UN FLUIDO POLIMÉRICO

de sus componentes puros.

3.- Mezclas de desviación positiva - negativa

Son sistemas de mezclas de viscosidades inferiores o superiores que la viscosidad de los componentes puros, dependiendo de la composición de la mezcla.

Las cadenas largas de los polímeros en reposo están dispuestas aleatoriamente; al incrementar la velocidad de corte hay un alineamiento de las cadenas en dirección de la fuerza, por tal motivo se experimenta una reducción en la viscosidad.

Considerando un flujo generalizado variando exclusivamente la velocidad de corte se tendrán varias regiones para un fluido, en particular (Figura # 12) dichas secciones son:

. Sección OA

Primera región Newtoniana: las cadenas están desorientadas.

. Sección AB

Comportamiento fluidificante: las cadenas se alinean lentamente

. Sección BC

Segunda región Newtoniana: todas las cadenas están alineadas.

. Sección CD

Comportamiento espesante: existe fricción entre las cadenas, por lo que la viscosidad empieza a ser creciente; posible formación de paquetes así como cristalización parcial de ciertos polímeros líquidos debido a esfuerzos muy grandes. L. Ibañez¹⁵.

Se presenta como ejemplo ilustrativo el comportamiento reológico gráfico (reograma) de un fluido de perforación bentonítico al 7.6 % con formulación polimérica "A₂", al variarle la temperatura. Prueba elaborada por Bottai A. et al.¹⁶

Al iniciar la prueba se presenta el comportamiento clásico en un lodo de perforación, disminuye la viscosidad al aumentar la temperatura. En segundo término empieza a desarrollarse una reacción química entre los componentes que integran al lodo de perforación, de ahí que se observe un incremento y decremento

paulatino en la viscosidad. Posteriormente inicia a haber una deshidratación del lodo con el correspondiente incremento en la viscosidad. Por último hay una fusión de los componentes del lodo, con la consecuente disminución drástica en la viscosidad hasta un valor constante, inferior al que se tenía a condiciones iniciales.

Cabe señalar que las variaciones drásticas en la viscosidad se presentan antes de alcanzar una estabilización en la temperatura, mientras que una vez alcanzado el proceso isotérmico (220 °C), la viscosidad tiende a estabilizarse relativamente.

En la perforación de pozos geotérmicos (o pozos profundos petroleros) el empleo de fluidos base agua, tienen la limitante de la disponibilidad de aditivos que puedan mantener estables las propiedades reológicas y control en la pérdida de filtrado a elevadas temperaturas. El problema es acelerado cuando existe gran cantidad de contaminantes químicos, tales como: sales de sodio, calcio y magnesio.

Una buena alternativa para no emplear dichos aditivos son los copolímeros sintéticos de sulfonato que proporcionan las dos funciones en condiciones desfavorables.

La composición y mantenimiento de los sistemas del lodo llegan a ser complicados, por lo que es necesario mantener la eficiencia de los procesos de perforación.

Los fluidos de perforación deberán ser diseñados considerando las condiciones de flujo del fluido (la más crítica en el fondo del agujero), la permeabilidad, la composición química de la formación, la presión y sobretodo la temperatura. Hay que recordar que las condiciones cambian constantemente con la profundidad, por lo que hay que tener un continuo monitoreo de las propiedades.

En sistemas de fluidos de perforación base agua, hay componentes que son relativamente inertes a condiciones superficiales, llegando a ser altamente reactivos a elevadas temperaturas. La arcilla bentonítica es comunmente utilizada para

impartir viscosidad y control de filtrado, dando estabilidad a sistemas ante la presencia de contaminaciones graves de iones hidroxilo (en particular, sistemas altamente alcalinos). A temperaturas mayores de 200°F (94°C) la interacción de arcillas y los iones hidroxilo ocurren suficientemente rápido y cambian el comportamiento reológico de los fluidos.

La presencia de altas viscosidades puede ser propiciada no exclusivamente por la floculación originada por la temperatura, sino también por las fuerzas electrostáticas de los electrolitos. Los recortes, el cemento y la sal son los contaminantes más comunes.

Existen varios mecanismos en el efecto de la invasión del filtrado, sobre todo en zonas potencialmente productoras. La alteración de la permeabilidad puede ser cambiada por el hinchamiento de arcillas o por la migración de finos; así como por condiciones conocidas como es el bloqueo del agua, originada porque la presión del yacimiento no es suficientemente fuerte para empujar el filtrado del agua a través de los poros. Cuando el filtrado contiene sales disueltas la precipitación de sal puede ocurrir al contacto con el agua intersticial.

Haciendo referencia a algunos agentes de control de filtrado de mayor uso en sistemas acuosos se tienen a las arcillas y a los polímeros. Algunas de las arcillas son: bentonita, atapulgita, sepiolita; mientras que los polímeros tienen una estructura química muy compleja, por lo que es difícil caracterizarlos, por ello se requiere conocer: peso molecular, número de unidades monoméricas, longitud de cadena, etc. En contraste el almidón y el lignito son efectivos para el control del filtrado.

La celulosa se ha derivado para mejorar su solubilidad en el agua, tolerar las sales y tener estabilidad con la temperatura. Los más populares son: carboximetil celulosa CMC, hidroxietil celulosa HEC, celulosa polianiónica PAC y metal lignosulfonato. Existen polímeros sintéticos tales como el poliácrilato PA y la hidrolización parcial poliácridamida PHPA.

Todos esos materiales han permitido terminaciones sucesivas de múltiples pozos con fluidos de perforación base agua. Su función es cubierta por medio de diferentes mecanismos como son: formación de un filtrado base, control de la viscosidad del filtrado, control de sólidos y reacción de arcillas, así como la creación de una barrera "impermeable" en zonas permeables. La eficiencia es alterada por elevadas temperaturas y la presencia de electrólitos.

Aun con dichos aditivos es difícil mantener las propiedades reológicas y del control de filtrado; cuando la temperatura en el fondo del pozo es aproximada a 350°F (177°C) y se estén perforando formaciones de sal, anhidrita o yeso, esto provocaría que el problema se acelerara.

De los polímeros utilizados en el control del filtrado, el PA y el PHPA son estables a temperaturas del orden de 400°F (204°C) o mayores. La columna vertebral es el vinilo y en particular el enlace carbono / carbono que dan a los polímeros resistencia tanto térmica como de degradación hidrolítica. Esos polímeros están limitados a la tolerancia de los cationes divalentes (como es el caso del calcio), a grandes temperaturas y elevado pH la tolerancia decrece más rápidamente debido a la hidrólisis alcalina de los grupos acrilamida.

En el caso de sistemas de lodos saturados de sal, donde el pH está en un rango de siete u ocho, el agua puede promover a la electrólisis. En el caso de producirse ésta se tendría un incremento en el grupo carboxilato.

En el caso de los dos grupos funcionales, vinilo y acrilamida son normalmente utilizados para reducir la pérdida de filtrado, así como tolerar la incorporación de iones divalentes. El grupo acrilamida puede ser un escudo de saponificación en los lodos de perforación altamente alcalinos. Las moléculas pueden ser lo suficientemente largas y de alto peso molecular para cubrir efectivamente los sólidos.

El polímero sintético vinilsulfonato / vinilamida VSVA ha

sido desarrollado para tales propósitos y tiene un peso molecular del orden de 750,000 a 2 millones. En este polímero la columna vertebral (carbono) y los grupos amida son complementados por la no saponificación de grupos funcionales. El grupo sulfonato, que proporciona fuerte densidad de carga, permite al polímero tolerar cationes divalentes así como la función de proporcionar estabilidad reológica. Algunos polímeros no sintéticos poseen la función dual, particularmente en pozos calientes con la presencia de grandes concentraciones de sales disueltas. El copolímero estireno-anhídrido maléico deflocula a las arcillas en ambientes de elevadas temperaturas pero no proporciona control de filtración.

El almidón tiene la habilidad de encapsular (cubrir) las partículas sólidas que se encuentren en contacto con él, incluyendo las partículas de arcilla, obviamente este fenómeno está relacionado con la distribución del tamaño de las partículas. Por otro lado el copolímero sintético no encapsula a las partículas de carbonato de calcio.

Se ha observado que existe un decremento en el pH del lodo si no tiene VSVA, el cual es causado por la degradación de la resina sintética y el material lignosulfonato.

El PHPA es estable a altas temperaturas pero inefectivo ante la presencia de sales (sodio y calcio). El polímero VSVA mantiene el control de filtración arriba de 400°F (204°C). El control de filtración es efectivo por medio de la adsorción en los recortes, e interacción con las partículas de arcilla. El polímero puede llegar a ser adsorbido en la superficie y en las orillas de la arcilla.

La combinación de dos polímeros aniónicos (bentonita extensa y VSVA) puede crear un exceso de cargas negativas originando una dispersión o adelgazamiento del fluido. La gran contaminación química en combinación con la alta temperatura causa la deshidratación y floculación de la bentonita, resultando un incremento en la velocidad de filtrado del lodo. El control de la

filtración puede ser mejorado por la adición de polimeros. El polímero VSVA no imparte viscosidad, su función es la de un coloide protector para prevenir la floculación de arcillas.

La contaminación de cemento a bajos niveles (menores del 1%) puede causar gelación severa en lodos base agua. El copolímero VSVA promueve la estabilidad en lodos de potasio en presencia de grandes concentraciones de cemento y promueve la reducción de la gelación por temperatura, manteniendo bajos puntos de cedencia y esfuerzos gel con contaminaciones de cemento del orden de 3 a 5%.

Un 5% de cemento y un 10% de sólidos perforados como contaminantes, afectarán en mayor grado las propiedades reológicas. La habilidad del polímero VSVA para proporcionar estabilización reológica puede ser atribuida al grupo sulfonato.

Como panorama general de lo anteriormente mencionado se puede citar:

El polímero VSVA se extiende al uso de fluidos de perforación base agua a profundidades donde las temperaturas son mayores que los 400°F (204°C) y alta contaminación de electrólitos. Siendo un efectivo reductor de pérdida de filtrado y estabilizador reológico. Promueve una gran tolerancia a la contaminación de sólidos perforados y al cemento en sistemas de lodo base agua no dispersos. No precipita al contacto con ácidos y no reacciona con los iones del agua intersticial. Promueve la economía en costos de perforación a través de bajo tratamiento inicial del lodo y sus niveles de mantenimiento. A. J. Son¹⁷.

Existen otros tipos de copolímeros que aunque de la misma familia tiene una estructura diferente que a los mencionados anteriormente, por lo cual se hace una referencia a ellos así como un enfoque más profundo de algunos componentes ya abordados previamente.

Entre los copolímeros sintéticos de gran peso molecular se tiene al vinilo sulfonato, que es utilizado también en lodos base agua para controlar las propiedades de filtración a grandes

temperaturas. Tienen una mayor resistencia a la despolimerización por el efecto hidrolítico y a los ambientes oxidantes. Son derivados de polisacáridos y no forman sales insolubles en presencia de electrólitos. La degradación termal tiene un efecto oxidante sobre los lignitos, produciendo ácidos intermedios, componentes alifáticos y ácidos carboxílicos. El lignito es reconocido como más resistente térmicamente que el almidón o la celulosa, ya que estos últimos se degradan por oxidación y reacciones hidrolíticas, originando productos de bajo peso molecular que causan pérdida de viscosidad y en la efectividad del control de filtración. Es recomendable que los almidones no sean utilizados arriba de los 225°F [107°C], ni productos derivados de carboximetil celulosa arriba de 300 °F [149 °C], como lo es la celulosa polianiónica PAC.

Los niveles de tratamiento de lignitos serán específicos de cada pozo en particular, pero se han observado algunos niveles de tratamiento que varían de 1 a 20 lb_m / b1, [2.85 - 57 Kg / m³]. Un sobretratamiento puede guiar a un incremento en la viscosidad y en la velocidad de gelación del lodo, pudiendo ser controlado por dilución con agua.

Se recomienda utilizar los lignitos para el control de filtración en lodos base agua, preferentemente de alta densidad. Arriba de la neutralización con sosa cáustica, los lignitos producen una sal soluble en agua y un remanente insoluble cáustico. Esta sal de sodio es completamente sensitiva a los electrólitos y puede formar productos insolubles de carboxilato de calcio en presencia de compuestos solubles de calcio. Por lo que una mayor resistencia a los electrólitos puede ser obtenida por el uso de lodos más alcalinos o efectuando una sulfonatación de lignitos.

Una combinación de dispersante, agente de control de filtración y una resina fenol - formaldehído, reporta menos sensibilidad al calcio y a otros electrólitos.

No se deberá olvidar que el ritmo de degradación depende del

oxígeno disuelto y del pH en el sistema del lodo, así como del tiempo de exposición a elevadas temperaturas.

Los derivados de la hidrólisis del poliacrilamida y del ácido acrílico son los polímeros más utilizados comercialmente en la perforación de lodos para el control de filtración.

Las características deseables que deben tener los polímeros para el control de filtración deben de ser:

- El polímero debe ser soluble en agua y aniónico
- Debe ser termalmente estable y resistente a la hidrólisis alcalina.
- Debe ser un aditivo efectivo para el control de filtración en presencia de electrólitos.
- Su peso molecular debe ser suficiente para controlar la filtración pero no lo suficientemente grande para afectar drásticamente la reología del sistema o ser susceptible a la degradación de corte.
- El costo de tratamiento deberá ser económicamente atractivo.
- Debe ser de fácil manejo y almacenamiento en las maniobras de perforación.
- Debe ser ambientalmente aceptable.

Se han estudiado a los copolímeros de 2 acrilomidas-2 ácidos sulfónicos metil propano (AMPS) y acrilamida (AM). Este último puede presentar algún problema con la hidrólisis alcalina. Una modificación hecha a este copolímero es con la substitución de AM por un alquilo (AAM). Las propiedades físicas y químicas de los copolímeros son las siguientes:

| | |
|-------------------------|---------------------|
| viscosidad (1% sólidos) | 25 - 75 cp |
| Carácter iónico | Aniónico |
| Humedad | < 10% |
| Peso molecular | 750,000 - 1'500,000 |
| solubilidad | soluble en agua |

Además han demostrado ser ambientalmente aceptables el tipo de copolímeros AM/AMPS. A continuación se mencionarán dos tipos de copolímeros, los cuales son: COP-1 (AM/AMPS) y COP-2 (AMPS/AAM).

El ritmo de filtración es una de las propiedades del lodo que se ve influenciada casi por cualquier cambio en otras propiedades del lodo. El efecto de la temperatura en los componentes individuales y / o la interacción de los componentes del lodo, hacen difícil determinar el efecto de un componente en particular en el ritmo de filtración de un sistema de lodo, especialmente después de un tratamiento a elevada temperatura. Por esta misma razón se hace difícil estudiar el efecto de los polímeros en el lodo.

Una alternativa para evaluar los copolímeros en presencia de electrólitos en un sistema de lodo, es comparando las pruebas de filtración API de laboratorio.

El COP-1 es más efectivo que un poliacrilato tratado con celulosa polianiónica (PAC), ya que estos últimos son sensitivos al calcio. El poliacrilato tratado con PAC tiende a proporcionar menores valores de filtración con respecto a los copolímeros bajo condiciones de temperatura tolerables a los productos de celulosa.

El COP-2 muestra un mayor grado de estabilidad termal que el COP-1.

El COP-1 ha sido utilizado en fluidos geotérmicos para controlar la velocidad de filtración, cuando no puede ser controlada (física o económicamente) por lignitos o derivados de lignitos. Este producto ha sido utilizado en más de 30 pozos geotérmicos, donde las temperaturas de fondo exceden los 500 °F [260 °C]. El fluido geotérmico es un sistema bentonítico defloculado en el que el copolímero sulfonado estireno / anhídrido maléico es utilizada como desfloculante. El control de filtración es mantenido con una combinación de lignito, derivados de lignito y concentraciones del COP-1 de 0.25 a 0.5 lbm / bi que son normalmente suficientes para controlar las pérdidas por filtración bajo las condiciones más adversas. Los datos que a continuación se

presentan muestran los cambios en las propiedades de un lodo geotérmico tratado con COP-1.

| | | Antes | Después |
|----------------------------------|---------------------------|-------|---------|
| Densidad | [lbm/gal] | 9.2 | 9.1 |
| Temperatura de flujo en la línea | [°F] | 189.0 | 212.0 |
| Viscosidad plástica | [cp] | 8.0 | 7.0 |
| Punto de cedencia | [lb/100pie ²] | 6.0 | 5.0 |
| Gel | [lb/100pie ²] | | |
| 10 segundos | | 1.0 | 1.0 |
| 10 minutos | | 6.0 | 6.0 |
| Filtrado API | [cm ³ /90 min] | 12.0 | 12.4 |
| Filtrado HTHP | [cm ³ /90 min] | 26.0 | 26.0 |

Se puede decir que los dos copolímeros de vinil - sulfonato consistentes de AMPS y AM o N-alquilo AM tienen estabilidad térmica, tolerancia a los electrólitos y efectividad en el control de filtrado a elevadas temperaturas en fluidos de perforación base agua. A.C. Perricone et al.¹⁸.

En contraste los componentes lignosulfonatos fallan al permanecer substancialmente adsorbidos en los sólidos del lodo bajo condiciones de gran temperatura. Es difícil especificar una temperatura de fondo en particular en la cual sea modificado y llegue a ser inefectivo el lignosulfonato. Este punto no depende únicamente de un factor en específico, como lo son la densidad del lodo, el contenido de sólidos, el tipo de sólidos y otros contaminantes del lodo. Han ocurrido problemas a temperaturas de fondo de 250 °F [121 °C], hasta temperaturas de fondo de 450°F [232°C]. Investigaciones de degradación termal de varios

lignosulfonatos comerciales encontraron que la degradación inicia a 330°F [165°C] progresando continuamente hasta una descomposición severa de 450 °F [232.2 °C]. Se ha observado que cuando la temperatura de fondo excede 350 °F [176.7 °C], hay un incremento en el consumo de lignosulfonatos y dificultades en mantener las propiedades de flujo deseables.

Es evidente que el polímero sintético debe requerir su propio peso molecular para obtener defloculación, estabilidad termal y la capacidad para mantener activos a los sólidos del lodo a elevada temperatura. Dentro de los estabilizadores reológicos de bajo peso molecular que más prometen a dichas condiciones se encuentran: metales alcalinos o sales de amoníaco de ácidos acrílicos homopoliméricos, siendo también sensitivos a las contaminaciones de calcio.

Existe una sal de sodio de un copolímero sulfonado estireno - anhídrido maléico que fue preparada para que fuera adecuada a los requerimientos de defloculación a gran temperatura y estabilizador reológico. Esta sal de sodio es referida como SSMA la cual proporcionó los mejores resultados con un peso molecular del orden de 1000 y 5000. Las cadenas poliméricas de anhídrido maléico están altamente cargadas, contribuyendo a la ionización de dos carboxilos y el poliestireno sulfonado también es ionizado fuertemente. Esta gran densidad de carga es un factor que contribuye a que el copolímero tenga la habilidad para permanecer adsorbido en los sólidos del lodo bajo condiciones de gran temperatura. Esos lugares de ionización proporcionan buena solubilidad al agua y la actividad de superficie que presenta el SSMA es tan leve que no tiene una tendencia significativa a la formación de espuma en el lodo. El arreglo molecular del mismo incrementa la fuerza en los enlaces hidrógeno. Sus propiedades físicas y químicas son:

| | | |
|-----------------------------|----------------------------|----------|
| Viscosidad (30% de sólidos) | [cp] | 30.0 |
| pH (30% de sólidos) | | 6.5 |
| Densidad | [lbm / pie ³] | ~ 38 |
| Humedad | [%] | ~ 5 |
| Carácter iónico | | Aniónico |
| Descomposición | [°C] | 400 |

Hay que notar que la temperatura de descomposición (400 °C) fue determinada por análisis diferencial térmico (ADT). La degradación del polímero puede ocurrir a una temperatura inferior de este valor cuando sea expuesto a periodos prolongados de tiempo.

La columna vertebral del copolímero es la presencia de carbono - carbono que es el que contribuye grandemente a la estabilidad térmica. Adicionalmente el SSMA tiene un bajo orden de toxicidad y puede ser ambientalmente seguro para utilizarse en los fluidos de perforación.

El SSMA es un defloculante efectivo a elevadas temperaturas donde defloculantes estándares como lo son el cromo o ferrocromo lignosulfonato empiezan a fallar. Una combinación de lignosulfonato y SSMA es aún más efectiva que los componentes individuales. La adsorción decrece con el incremento de la temperatura, que es el mecanismo de acción de defloculación del SSMA y del lignosulfonato pero el grado de efectividad de cada uno puede diferir por el tamaño y forma de las macromoléculas de los lignosulfonatos, influyendo en el aumento del grado de floculación.

El efecto del SSMA ha sido probado en el laboratorio en más de 100 lodos de campo con ayuda de un consistómetro. Esos lodos de campo han sido primeramente tratados con lignosulfonatos como principal defloculante para perforar en pozos de gran temperatura y alta presión. El SSMA solo ha sido añadido al lodo como un aditivo suplementario para alcanzar la estabilidad reológica a las condiciones antes mencionadas.

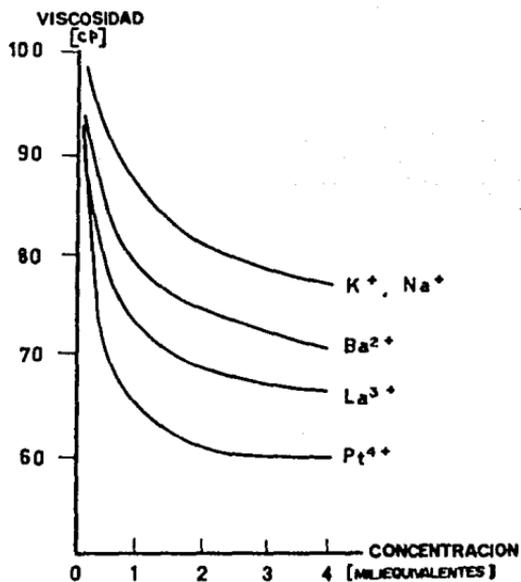


FIG. 13 EFECTO ELECTRO-VISCOZO EN SOLUCION AGAR-AGAR.

Como ejemplo de aplicación del producto se tiene que durante algunas operaciones cubiertas en el campo geotérmico de Cerro Prieto se encontró un excesivo espesamiento en el lodo de perforación, debido a la elevada temperatura. Las temperaturas de fondo en esos trabajos cubiertos tenían un rango de 650 a 700 °F [343 a 371 °C] y en algunas ocasiones era necesario dejar al lodo en el pozo bajo condiciones estáticas por períodos de tiempo superiores a las 48 horas. Después de estos períodos de exposición el lodo llegó a ser gelado hasta el punto en que no fue posible correr el equipo de línea hasta el fondo y siendo difícil "romper" circulación. El sistema de lodo se inició a tratar con 3 lbm / bl (8.3 Kg_m / m³) de SSMA. Después de este tratamiento no hubo dificultades para correr las mismas herramientas en el pozo y la circulación fue comenzada con un mínimo de presión de bombeo. La viscosidad de embudo Marsh del fluido fue únicamente 10 segundos mayor que la viscosidad inicial.

En forma global se puede decir que el copolímero SSMA se ha extendido para trabajar en rangos de temperatura elevados en sistemas de lodos base agua. Donde las temperaturas de fondo promedio alcanzan los 500 °F [260 °C], sin presentar alteraciones severas. B. G. Chesser and D. P. Enright¹⁰.

Por lo anteriormente expuesto el efecto electrostático ejercido por la concentración de iones en solución y la forma de las macromoléculas está influenciada por la interacción de sus elementos, la viscosidad de una solución puede ser alterada en mayor o menor grado por la adición de electrólitos, como ejemplo se puede observar la Figura # 13.

Una alternativa para reducir la desestabilización de las arcillas podrá hacerse mediante un diseño de balance químico al fluido de perforación (polimérico). Deberá hacerse una formulación proporcional en cuanto a la concentración de sales y a los cationes que es capaz de absorber la arcilla.

Por cada catión del porcentaje de concentración de sales en

la arcilla se deberá añadir una proporción doble al fluido polimérico, de tal manera que sea capaz de tolerar el diseño.

La transferencia catiónica del fluido a la arcilla tenderá a reducir la desestabilización de la arcilla. J.M.Griffin and A. Ghalambor²⁰.

Debido a la presencia de tales alteraciones en los fluidos de perforación se emplean productos que permiten el control de algunas variables reológicas. (TABLA 4).

La tabla pertenece a IMCO y se puede observar que solamente se mencionan las ventajas y beneficios de los productos, e indudablemente tendrán algunas desventajas las cuales no se mencionan. Por ejemplo hasta qué límites son efectivos dichos productos, tanto de temperatura, salinidad y otros.

Estos y otros componentes se pueden consultar con mayor profundidad en la referencia de Chilingarian and Vorabutr⁷. Una de las variables reológicas que modifican en alguna medida el comportamiento de los fluidos de perforación es la fase interna o dispersa del lodo. Hasta ahora se han mencionado a las arcillas y polímeros. Pero no hay que olvidar que es posible utilizar aire como fase dispersa y trabajar con lodos aireados; estos lodos se recomiendan para zonas de pérdidas de circulación como es el caso de los pozos geotérmicos. Las espumas tienen una alta capacidad de acarreo de recortes y tienen un comportamiento pseudoplástico; mientras que su viscosidad aumenta con la temperatura y disminuye con la velocidad de corte.

. Efecto de temperatura

El concepto de temperatura entra en el entendimiento de todos los fenómenos reológicos, porque el movimiento térmico de átomos y moléculas es el mecanismo base en la deformación de los materiales.

Existe el término de " temperatura de transición " que indica el punto donde la energía térmica de un material llega a ser

T A B L A I

COMPONENTE PRINCIPAL

APLICACION PRIMARIA

AGENTES VISCOSIFICANTES

| | |
|--------------------|---|
| Bentonita | control de viscosidad y filtración en lodos base agua. |
| Sub-bentonita | Control de viscosidad y filtración al tener gran tamaño de partículas. |
| Atapulgita | viscosificante en lodos de agua salada. |
| Fibra de asbesto | viscosificante de lodos de agua dulce y salada. |
| Polímero bacterial | control de viscosidad y pérdida de filtrado, lodos de bajo contenido de sólidos. |
| Sepiolita | viscosificante para todos los lodos base agua, especialmente a elevadas temperaturas. |

DISPERSANTES

| | |
|---------------------------|--|
| Taninos modificados | adelgazador de lodos base agua dulce y salada, controlador del pH alcalino. |
| Lignito procesado | Dispersante de emulsiones y suplementariamente aditivo para el control de pérdida de fluido. |
| Lignosulfonato modificado | Dispersante y controla pérdida de fluido, aditivo de lodos base agua. |

REDUCTORES DE PERDIDA DE FLUIDO

| | |
|-------------------------|--|
| Polímero orgánico | controlador de pérdida de filtrado en sistemas base agua. |
| Almidon pregelatinizado | controlador de pérdida de filtrado en lodos arcillosos y saturados de agua salada. |

PRODUCTOS ESPECIALES

| | |
|--------------------------------|--|
| Bentonita extendida | incrementa el punto de cedencia, formando fluidos de perforación de bajo contenido de sólidos. |
| Agente inhibidor | controla pérdida de fluidos y estabiliza a elevada temperatura, e incrementa la inhibición. |
| Mezcla de polímeros sinérgicos | controla la estabilización reológica y pérdida de filtrado. |
| Polímero de alta temperatura | control de pérdida de fluido a alta temperatura. |

QUIMICOS COMERCIALES

| | |
|--------------------|---|
| Cromato - sodio | usado en lodos base agua para prevenir la gelación a elevadas temperaturas. |
| Hidróxido de sodio | controla el pH en lodos base agua. |

relativamente libre de su movimiento pasado. Considerando a un material cristalino, se puede decir que abajo de la temperatura de transición hay un respuesta en cuanto a la posición y al esfuerzo elástico.

Las zonas de transición pueden indicar variaciones importantes en las propiedades reológica de cada material. Un cambio en la declinación del comportamiento reológico se hace evidente al ocurrir la fusión del material.

La transición entre sólido y líquido (semi-líquido) en el comportamiento de polímeros puede variar ampliamente en sus rangos de temperatura.

Al incrementar la temperatura a un material, su estado reológico se verá modificado, pero si el material se libera de esfuerzo interno y recupera la forma anterior a la de la deformación, entonces a dicho fenómeno se le denomina memoria elástica. Lo anterior puede explicarse si se recuerda el movimiento térmico de las unidades cinéticas que es necesario para recuperar la forma original de una muestra, después que el esfuerzo de deformación ha sido removido.²

. Efecto del tiempo

El elemento tiempo participa en la respuesta reológica de la materia. Las bases elementales de la reología se basan en dos casos idealizados: relajación a un tiempo infinito (elasticidad) y la relajación a un tiempo cero (flujo). En todos los casos intermedios hay valores finitos para esas características de tiempo. Un material dado puede en realidad no estar caracterizado por un tiempo de relajación, pero si por una serie de tiempos de relajación (espectro), donde cada uno de los valores individuales en la serie corresponde a un proceso elemental en particular (movimiento molecular) de la materia.

La mayor importancia del espectro del tiempo de relajación aparece bajo la siguientes condiciones:

La mezcla de materiales tiene varias diferencias en su

espectro, por ejemplo: líquidos con termoplásticos, elastómeros y plastómeros.

En el comportamiento viscoelástico se indica la dependencia de la deformación de corte relacionada con el tiempo, definiendo el tiempo de relajación y el tiempo de retardo del material.⁹

III.5.2 Modelos reológicos

En la realidad las propiedades reológicas de los lodos de perforación se desvían en menor o mayor grado del comportamiento de la ley viscosa de Newton. La predicción teórica de las mismas se basa en el uso de variables reológicas ideales del fluido a considerar. Aunque son difíciles de verificar bajo condiciones de flujo complejo se han desarrollado una serie de modelos reológicos.

Los modelos reológicos son expresiones que permiten relacionar alguna de las propiedades reológicas con cualquiera de las variables reológicas existentes, pudiendo ser en términos de una o varias variables. Entre las más usuales están aquellas que ligan:

- . el esfuerzo de corte con la velocidad de corte
- . la viscosidad con velocidad de corte
- . la viscosidad con la temperatura
- . la viscosidad con la concentración

El objetivo de los modelos reológicos es estimar y cuantificar los parámetros reológicos a condiciones reales de flujo al modificar la variable reológica de interés. Así como predecir el comportamiento reológico del fluido en estudio.

En forma general los modelos reológicos se pueden clasificar en los siguientes tipos:

- . Matemáticos
- . Mecánicos
- . Eléctricos.

En el primer tipo de modelos, como su nombre lo indica se utilizan únicamente expresiones matemáticas que permitan describir el comportamiento reológico del fluido en estudio

En el segundo tipo de modelos se tiene que los parámetros y variables reológicas son representadas por medio de combinaciones de resortes y amortiguadores. Las asociaciones de estos últimos, tan complejas como sean darán como resultado un comportamiento viscoelástico lineal. Un ejemplo de este tipo de modelos es la Función Sólido de Kelvin.¹⁵

Cada uno de sus elementos tiene perfectamente definidas sus constantes características. En el caso del resorte se tendrá una complacencia elástica, mientras que en el amortiguador se tiene un coeficiente de viscosidad.

El tercer tipo de modelos son representados por circuitos eléctricos (resistencias, capacitores, bobinas, diodos, etc.) los cuales pueden ser conectados tanto en serie como en paralelo. De tal manera que se estén reproduciendo las condiciones reales deseadas. Una alternativa de ellos es que permiten plantear y resolver una o varias ecuaciones diferenciales representativas del fenómeno. Es importante contar con las correspondientes condiciones de frontera para así obtener la función reológica de estado deseada.

A continuación se presentan en forma breve algunos de los modelos reológicos matemáticos, encontrados al desarrollar el trabajo escrito:

Arrhenius modifica y generaliza una expresión que tiene la forma:

$$K = K_0 \text{ EXP} (\Delta E / RT)$$

donde:

- K índice de consistencia
- K₀ factor preexponencial
- ΔE energía de flujo
- RT factor de efecto por temperatura

En este modelo el índice de consistencia " K " tiende a predecir valores irreales a bajas concentraciones de la fase dispersa.¹⁴

Modelo de Rao

Rao partiendo de la ecuación propuesta por Arrhenius genera dos ecuaciones:

$$K = \alpha c^{\beta} \text{EXP}(\Delta E/RT)$$

$$K = \alpha \text{EXP}(\beta c) * \text{EXP}(\Delta E/RT)$$

Este modelo tiene mejor predicción a bajas concentraciones. Cuando la concentración (c) es igual a cero entonces " K " es una función exclusiva de la temperatura; en el caso de tener una suspensión acuosa (si la concentración de sólidos solubles tiende a cero) se tendrá que el factor preexponencial es una función exclusiva de la energía de flujo. Hay que recordar que la energía de flujo (ΔE) está definida al dar una concentración y una temperatura. C. Rangel et al.¹⁴.

En esta dirección varios autores han intentado modelar la viscosidad Newtoniana con expresiones para completar la "energía de flujo", haciendo énfasis en la contribución energética.

Glasstone¹⁴ presenta su ecuación que es utilizada en el caso de sustancias poliméricas, la ecuación de Arrhenius tiene que ser modificada por un factor " Z ".

$$\mu = \text{EXP} \left[\frac{AT + BTZ^{1/2} + C}{RT} \right]$$

Eyring propuso una teoría general del efecto de temperatura que guía a la siguiente expresión:¹⁴.

$$\mu = A\tau \text{ EXP} \left[\frac{a - b\tau}{T} \right]$$

A, a, b dependen directamente de las fuerzas intermoleculares y τ es el esfuerzo de corte.

Lobe probó varias ecuaciones empíricas con mezclas de líquidos Newtonianos. Encontrando la siguiente ecuación:¹⁴

$$\nu_m = \sum_{i=1}^n \phi_i \nu_i \text{ EXP} \left[\frac{\sum_{j=1}^n \mu_j \phi_j}{RT} \right] ; (i \neq j)$$

donde:

- ν_m = viscosidad cinemática de la mezcla
- ϕ_i = volumen fraccional del componente *i*ésimo
- ν_i = viscosidad cinemática del componente *i*ésimo
- μ_i = viscosidad característica del fluido *i*ésimo

Modelo GVRG permite una explicación estructural del fenómeno reológico en sistemas de fluidos, en que el índice de consistencia " K " puede ser explicado en términos de propiedades fisicoquímicas del sistema.¹⁴

Para predecir el valor del índice de consistencia " K " se recurrió a la siguiente expresión.

$$K = \alpha \text{ EXP} \left[\frac{f(c,T)}{RT} \right]$$

$\frac{f(c,T)}{RT}$: Relación que explica el comportamiento del índice de consistencia asociado con cambios en la temperatura y la concentración.

$f(c,T)$ es una serie aditiva de términos que representan la contribución energética o efecto de concentración, temperatura y la interacción de ambos.

La determinación de la serie fue hecha estadísticamente y explica el comportamiento observado. Su expresión es:

$$f(c,T) = \alpha c + \beta cT + \gamma T + \delta c/T + \epsilon/T + \eta/T^2$$

el primer y el último término son los de mayor contribución y se puede hacer el supuesto de considerar únicamente dichos elementos. Hay que recordar que la energía de flujo es una propiedad física real de cada sustancia. C. Rangel et al. ¹⁴

De acuerdo al capítulo anterior se dijo que el índice de comportamiento de flujo " K " es directamente proporcional a la viscosidad del fluido. Al aumentar la temperatura la viscosidad decrece debido a un incremento en la energía molecular medida a una concentración constante. La energía necesaria para obtener un flujo total es proporcional a la cantidad de trabajo necesario para que cada molécula fluya.

Al incrementar la concentración se observa un incremento en la viscosidad debido a que las distancias intermoleculares se acortan, medido a una temperatura fija.

La determinación de $f(c,T)$ es propuesta por medio de una regresión no lineal.

Williams ¹⁴ desarrolló una expresión para calcular la viscosidad de una mezcla binaria, incluyendo un término de velocidad de corte cero, basándose en la información de los componentes puros.

$$\mu_m^0 = \phi_1 w_1 \mu_1^0 + \phi_2 w_2 \mu_2^0$$

donde:

- w_i = fracción de peso de cada componente de la mezcla
- ϕ_i = composición en fracción
- μ_i^0 = viscosidad del componente puro a una $\dot{\gamma} = 0$

$$i = 1, 2$$

μ_m^0 = viscosidad de la mezcla a una $\gamma = 0$

Se hace el supuesto que el tiempo de relajación característico de una cadena larga en la mezcla es reducido al estado puro, donde el tiempo de relajación del componente disperso permanece invariable.

De esta manera para elementos de alto peso molecular (un componente) se tiene:

$$\lambda_1 = \phi_1 \lambda_1^0 = w_1 \lambda_1^0 + w_2 \lambda_2^0$$

$$\lambda_2 = \phi_2 \lambda_2^0 = \lambda_2^0 ; \phi_2 = 0$$

λ_i^0 = tiempo de relajación en estado puro

$$\therefore \phi_1 = w_1 + w_2 \frac{\lambda_2^0}{\lambda_1^0}$$

Lo cual indica que existe equilibrio entre la creación y destrucción de aglomeraciones de ligaduras.

En el capítulo pasado se habló del modelo de Ley de Potencia, a dicho modelo se le hizo una modificación la cual consistió en tomar en consideración el esfuerzo de cedencia para iniciar el flujo, dicho modelo es conocido como Ley de Potencia Modificada o con Punto de Cedencia. Es necesario conocer tres parámetros para definir perfectamente la ecuación de recurrencia, los cuales son: n , K , γ_p' . F. Hernández²⁴.

La ecuación de recurrencia es:

$$\tau = K \gamma^n + \gamma_p'$$

Hay que recordar que el modelo de Ley de Potencia es utilizado en

coordenadas logarítmicas, mientras que el punto de cedencia es utilizado en coordenadas normales. Por lo expuesto anteriormente se puede decir que:

$$Y_p' = \log(Y_p)$$

Al introducir el punto de cedencia se tendrán que modificar las ecuaciones originales, quedando:

$$n = 3.32 \log \left[\frac{\theta_{500} - Y_p'}{\theta_{300} - Y_p'} \right]$$

$$K = \frac{\theta_{500} - Y_p'}{1022^n} = \frac{\theta_{300} - Y_p'}{511^n}$$

donde:

n adimensional

K lbr segⁿ/100pie²

θ grados

Existe el modelo de Casson que es utilizado en la industria de las pinturas y plásticos, diseñado para el estudio reológico de sistemas heterogéneos. Dicho modelo es aceptable para velocidades de corte altas, donde se calcula el parámetro de viscosidad infinita μ_{∞} . F. Hernández²¹.

$$\mu^{1/2} = \mu_{\infty}^{1/2} + \left[\frac{gc \tau_{oc}}{\gamma} \right]^{1/2}$$

En este modelo se relaciona la viscosidad como una función de

la velocidad de corte, es decir:

$$\mu = f(\dot{\gamma})$$

y no relaciona el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte, que es como normalmente se expresa. Por tal motivo Lauzon y Reid enfocaron el modelo de Casson para utilizarlo con fluidos de perforación, expresándolo de la siguiente manera:

$$\tau^{1/2} = \left[\frac{\mu_{00} \dot{\gamma}}{\theta_c} \right]^{1/2} + \tau_{0c}^{1/2}$$

Se introduce Método de mínimos cuadrados, al cual se le da un enfoque para la determinación de parámetros reológicos, cuya aplicación se basa en la utilización de la ecuación de la recta²⁵. A continuación se dan las ecuaciones de recurrencia:

$$Y = m X + b$$

donde:

- Y = variable dependiente
- X = variable independiente
- m = pendiente de la recta
- b = ordenada al origen

Las constantes " m " y " b " pueden ser obtenidas por las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{\sum Y_i \sum X_i - M \sum X_i Y_i}{[\sum X_i]^2 - M \sum X_i^2}$$

$$b = \frac{\sum X_i Y_i \sum X_i - \sum Y_i \sum X_i^2}{[\sum X_i]^2 - M \sum X_i^2}$$

donde:

- (X_i, Y_i) son las componentes del punto iésimo
- M = número de puntos manejados en el experimento

Para poder aplicar el método para la obtención de parámetros reológicos lo único que se tuvo que efectuar fue un cambio de variable, como se indica a continuación.

Para coordenadas naturales:

Y = τ = lectura teórica Fann

X = γ = 1.7 NN = velocidad Fann en rpm

$$\mu_p \text{ (cp)} = 300 \frac{\sum \tau \sum NN - M \sum \tau NN}{[\sum NN]^2 - M \sum NN^2}$$

$$Y_p \text{ [LB/100 pie}^2\text{]} = \frac{\sum NN \tau \sum N - \sum \tau \sum NN^2}{[\sum NN]^2 - M \sum NN^2}$$

para coordenadas logarítmicas:

Y = $\log \tau$

X = $\log \gamma = \log 1.7 NN$

$$n = \frac{\sum \log \tau \sum \log \gamma - M \sum (\log \tau \log \gamma)}{(\sum \log \gamma)^2 - M \sum (\log \gamma)^2}$$

$$\log K = \frac{\sum (\log \tau \log \gamma) \sum \log \gamma - \sum \log \tau \sum (\log \gamma)^2}{(\sum \log \gamma)^2 - M \sum (\log \gamma)^2}$$

donde:

n = índice de comportamiento reológico [adim]

K = índice de consistencia [lbr segⁿ / 100 pie²]

Generalmente las propiedades reológicas obtenidas de pruebas de laboratorio de cualquier fluido de perforación pueden ser dadas en dos formas. La primera puede ser una lista de esfuerzo de corte (τ) medidos a sus correspondientes velocidades de corte ($\dot{\gamma}$). Mientras que la segunda es dando el esfuerzo de corte en la pared del tubo, como una función de flujo ($8\bar{V}/D$).

Si el primer tipo de datos es disponible entonces habrá que convertirlos a los del segundo tipo, para así determinar los valores de n' y K' . Que son los índices reológicos del Modelo de Metzner and Reed en donde se utiliza el método corto propuesto por S. E. Din, M. Desouky²⁰, que está enfocado al manejo de fluidos pseudoplásticos al ser transportados en tuberías bajo condiciones de flujo turbulento.

Para su deducción fue necesario usar un análisis de regresión donde fueron correlacionados esfuerzos de corte básicos de 132 fluidos pseudoplásticos diferentes. Una buena relación lineal fue obtenida entre $(\log \tau^2 \dot{\gamma})$ Vs $(\log \tau)$. Esto puede ser expresado por el siguiente modelo reológico:

$$\tau^2 \dot{\gamma} = a \tau^b$$

donde:

a , b son los índices de comportamiento de flujo.

La ecuación anterior fue sustituida en la ecuación de Rabinowitsch and Mooney²⁰ donde esta última tiene la forma:

$$\frac{8\bar{V}}{D} = \frac{4}{\tau_v^a} \int_0^v \tau^2 \dot{\gamma} \, d\tau$$

donde:

$$n' = \frac{\ln [d(\tau v)]}{\ln [d(8\bar{V}/D)]} ; K' = \tau_v / (8\bar{V}/D)^{n'}$$

al efectuarse la sustitución se obtuvieron los siguientes parámetros reológicos:

$$n' = \frac{1}{b - 2}$$

$$K' = \left[\frac{b + 1}{4 a} \right]^{n'}$$

donde " n ' " y " K ' " son los parámetros reológicos de Metzner and Reed.

La determinación de dichos parámetros es propuesta por Saad E. Din and M. Desouky^{2d}, quienes proponen un método gráfico, de tal manera que se grafique en coordenadas log - log los valores de $(\tau^2 \gamma)$ Vs (τ) medidos a diferentes velocidades de corte. De la recta resultante es posible determinar la pendiente que es (b), y la ordenada al origen que es (a).

El desarrollo analítico del método gráfico y la presentación de la viscosidad como una función de la velocidad de corte es desarrollado y presentado en el " Apéndice A ".

La ecuación general que describe el efecto de temperatura en la viscosidad de un líquido puro es el Modelo de Guzman Andrade.

Dicho efecto de temperatura puede ser atribuido a un incremento en la energía cinética de las partículas del fluido. El incremento en la energía permite a las partículas del fluido moverse con mayor libertad. J. V. Fisk and D. E. Jamison²².

La expresión matemática del modelo reológico está dada por:

$$\mu = C_1 \text{EXP}(C_2/T)$$

Las constantes C_1 y C_2 son características de cada fluido en particular y deben ser obtenidas de una gráfica semilogarítmica $\log \mu$ Vs $1/T$, la representación analítica es una recta que tiene como ordenada al origen C_1 y la pendiente de la recta C_2 .

Con el objetivo de que el modelo tenga un uso práctico es posible hacer la suposición que se conoce la viscosidad a la temperatura de fondo y de superficie. Con esas dos condiciones es posible plantear y desarrollar un sistema de ecuaciones cuyo resultado permitirá hacer predicciones de las viscosidades a diferentes temperaturas. Es evidente que el comportamiento no deberá ser complejo, considerando que la viscosidad de un líquido decrece al aumentar su temperatura. El planteamiento y desarrollo es mostrado en el "Apendice B".

Por último se hace referencia a la ecuación de recurrencia del Método de Lagrange, Iruarte et al.²³ la cual puede ser utilizada en el aspecto reológico si se le da un enfoque adecuado.

$$y = \sum_{i=1}^n \left[\prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}} \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)} \right] y_i$$

Dicha ecuación permite realizar una interpolación de valores,

dado un número definido de parejas ordenadas, considerando que siempre deberá existir variación de los valores de los parámetros y variables involucradas, es decir para valores constantes el método no es aplicable.

Adicionalmente a esto el método permite obtener los coeficientes de un polinomio de ajuste respecto a los valores dato. El número de coeficientes es igual al número de puntos dato menos uno.

La expresión general para el cálculo de los coeficientes del polinomio de ajuste es:

$$A_n = \frac{Y_n}{\prod_{j=0}^{n-1} (x_n - x_j)}$$

De manera general se puede decir que la deducción y obtención de las constantes dimensionales de cualquier modelo es un tema frecuente y relativamente sencillo de abordar que se presenta en problemas de ingeniería; por tal motivo no se hace la presentación de las mismas en cada caso de los modelos reológicos propuestos.

Si se desea ver el planteamiento del problema con características similares se puede consultar Hernández J. F.²⁴.

CAPITULO IV

IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA DE COMPUTO

TEMAS CONTENIDOS EN EL CAPITULO:

- . Panorama General
- . Características del Programa de Cómputo
- . Variables de Cómputo
- . Diagrama de Bloques
- . Presentación de Resultados

IV.1 Panorama General

Para intentar realizar una buena predicción en cuanto al comportamiento reológico de un lodo de perforación, es necesario contar con información de laboratorio confiable con la que se pueda alimentar al programa de cómputo.

Es importante considerar que los resultados arrojados por el programa de cómputo serán sometidos a una prueba de validación, la cual consistirá en comparar los datos teóricos arrojados por el programa contra la información experimental u real disponible, de tal manera que deberán caer dentro de una tolerancia de error razonable. Una vez cubierta esta etapa será posible iniciar la evaluación del lodo de perforación, lo cual ayudará a predecir el comportamiento reológico del lodo de perforación, que al fin de cuentas es uno de los objetivos para los cuales se elaboró el programa de cómputo.

Una vez concluida la etapa anterior, implícitamente se está hablando de que ya se han calculado las constantes características reológicas de cada uno de los modelos utilizados en el programa.

Una de las alternativas que se tendrán es el cálculo de la viscosidad a cualquier velocidad de corte deseada. Cada una de las velocidades de un viscosímetro rotacional (Fann) puede representar la velocidad del lodo en una parte del sistema de circulación, iniciando de la superficie al fondo del pozo, considerando el retorno del mismo hasta las cribas (tomando en cuenta el flujo interno y / o externo en las tuberías de perforación, lastrabarreras y de revestimiento, flujo en toberas y en espacio anular).

Como se puede observar no se tiene la limitante de un número determinado de velocidades de trabajo (como es el caso del viscosímetro) más aún es posible evaluar viscosidades a velocidades de corte fraccionales. Pero no se deberá perder de vista en ningún momento que se está extrapolando de una velocidad de corte a otra.

También se tiene la posibilidad de calcular la lectura teórica Fann, proporcionando solamente una velocidad de corte hipotética o de interés.

El trabajar con temperaturas de tan alto orden como es el caso de los yacimientos geotérmicos hace que el comportamiento del lodo de perforación sea complejo y difícil de predecir, sobre todo porque interactúan variables reológicas de diverso índole:

- . Temperatura
- . Velocidad de corte
- . Tiempo
- . Presión
- . Composición química de cada una de las fases
- . Concentración de cada una de las fases
- . Peso molecular de cada una de las fases
- . Tamaño y distribución de partículas sólidas
- . Contaminación del lodo por electrólitos
- . Pérdida de filtrado del fluido de perforación
- . pH

De las cuales el programa de cómputo involucra a la velocidad de corte, temperatura y presión. El resto de la variables reológicas no se están involucrando directamente en el programa.

IV.1.1 Características del programa de cómputo

El programa de cómputo diseñado está elaborado en lenguaje de programación " BASIC " desarrollado con la ayuda del paquete de cómputo " Quick Basic " versión 4.50 ; 1985 - 1988 (Microsoft).

Es un programa accesible y tiene las características de ser conversacional y amigable. Presenta un menú principal que da la posibilidad de trabajar con cualquiera de las opciones de estudio que se presentan a continuación:

- . Modelo de Newton
- . Método de Mínimos Cuadrados
- . Ley de Potencia Modificada
- . Modelo de Casson
- . Modelo de Metzner and Reed
- . Modelo de Andrade

En conjunto todos los métodos y modelos permiten involucrar diferentes parámetros reológicos, tales como: viscosidad plástica, viscosidad efectiva de circulación, punto de cedencia, gel inicial, tipo de fluido en cuanto a comportamiento reológico, lectura teórica Fann, esfuerzos de corte y velocidades de corte; así como las constantes de los modelos reológicos respectivos. No se hace la presentación directa de la viscosidad aparente debido a que queda definida al dividir la lectura Fann de 600 rpm por dos.

A continuación se presentan las características generales de cada una de las opciones propuestas en el programa de cómputo.

Cada una de las opciones presentadas en el menú principal dan la posibilidad de inicializar los cálculos en cada modelo cuantas veces se desee, permitiéndolo hacer en forma iterativa.

El Modelo de Newton es el caso ideal de flujo viscoso y sirve para calcular la viscosidad efectiva y observar la variación de la viscosidad respecto a la velocidad de corte. Es necesario proporcionar las lecturas Fann a las velocidades de corte deseadas. No se calcula ninguna constante característica del modelo en función de los datos de entrada, por tal motivo no se está en la posibilidad de interpolar valores.

El método de Mínimos Cuadrados determina las constantes básicas de una recta y permite plantear los casos de coordenadas naturales y logarítmicas, es decir los modelos de Bingham y Ley de Potencia respectivamente.

Una de sus ventajas es que los parámetros reológicos no son

calculados necesariamente a partir de las dos lecturas básicas Fann como normalmente se acostumbra, sino que es posible considerar un número mayor o igual de lecturas Fann. Con esto se obtendrá el mejor ajuste de una línea recta a los puntos dato proporcionados.²⁵

Los parámetros que permite calcular el modelo son:

- . Viscosidad plástica
- . Punto de cedencia
- . Índice de comportamiento reológico
- . Índice de consistencia

El modelo de Ley de Potencia tiene un comportamiento de flujo viscoso (sin punto de cedencia) pero existe una modificación a tal modelo y hace la consideración que el fluido tiene un comportamiento plástico (con punto de cedencia), a tal modelo se le conoce con el nombre de Ley de Potencia Modificada.

La presentación que se hace del modelo en el programa, es la de ser semihíbrido, pues se pueden introducir los parámetros " N " y " K " de otras opciones del menú principal. En caso contrario el modelo determina sus propios parámetros característicos a partir de los datos de entrada, éstos son las dos lecturas básicas Fann y el punto de cedencia en coordenadas logarítmicas. Si no se contara con el último dato, es posible obtenerlo con ayuda de las opciones 2, 4 y 5. El modelo también puede detectar si el punto de cedencia (natural) es menor que cero, lo que indicaría que el modelo de Bingham no se ajusta al comportamiento reológico del lodo.

Una vez alimentado el modelo y hecha la corrida del programa se podrán obtener:

- . Los índices de consistencia K1, K2 con su valor medio KM
- . El índice del comportamiento de flujo del fluido de perforación
- . Definición del tipo de comportamiento reológico.
- . Cálculo de la viscosidad efectiva y lecturas teóricas Fann a diferentes velocidades de corte.

El modelo de Casson representa un comportamiento reológico no lineal con punto de cedencia.

La información necesaria para alimentar al modelo son las lecturas Fann medidas a 600 y 100 rpm. Si no se dispone del último dato es posible emplear las opciones 3 y 5.

Las constantes características determinadas en el modelo son:

- . La viscosidad en la barrena
- . El punto de cedencia de Casson.

Al igual que en el modelo anterior se determina:

- . La viscosidad efectiva y la lectura teórica Fann a diferentes velocidades de corte.

El modelo reológico de Metzner and Reed está orientado a la aplicación de fluidos pseudoplásticos. Los datos de entrada que alimentan al modelo son las dos lecturas básicas Fann.

Las constantes características que se obtienen del modelo son: " a , b " los cuales son identificados como índices de comportamiento de flujo.

De acuerdo con Saad E. and M. Desouky²⁶ los índices anteriores pueden obtenerse a partir de una manera gráfica, por lo cual fue necesario plantear y deducir el desarrollo analítico para la obtención de las ecuaciones de recurrencia. El procedimiento es mostrado en el " Apendice A ".

A partir de los índices de comportamiento de flujo se determinan N' y K' que son los parámetros de Metzner and Reed, que son equivalentes a los parámetros determinados en el modelo de Ley de Potencia y Ley de Potencia Modificada.

Similarmente el modelo permite determinar:

- . La viscosidad efectiva y la lectura teórica Fann a diferentes velocidades de corte.

El Modelo de Andrade involucra a la variable reológica temperatura y está orientado a predecir el comportamiento de flujo en líquidos puros. J. Fisk and Jamison²².

Por tal motivo se hace la consideración que el lodo es de bajo contenido de sólidos, cuyo uso es extensivo en la perforación geotérmica. Hay que recordar que las mayores velocidades de penetración se obtienen teóricamente con agua, mientras que con el manejo de lodos aireados se han obtenido buenos resultados.

Otra consideración que se hace en el modelo es que la viscosidad decrece al incrementar la temperatura y viceversa. De ahí la necesidad de determinar dos constantes características de cada fluido en particular propuestas por el modelo. Tales constantes son una función de la viscosidad y temperatura, de ahí la necesidad de deducir a las constantes a partir de condiciones iniciales y finales de interés del lodo, que son la viscosidad superficial y de fondo medidas a las temperaturas respectivas. Estos son los datos de entrada mínimos requeridos para inicializar al modelo.

En el "Apéndice B" se presenta el desarrollo del sistema de ecuaciones que se resolvió para la obtención de las constantes C_1 y C_2 del modelo mencionado, que permitirán calcular la viscosidad teórica de Andrade.

En cuanto al manejo de unidades la viscosidad está expresada en [cp], mientras que la temperatura tiene la opción de usar [$^{\circ}$ C] o [$^{\circ}$ F].

El modelo es complementado con el Método de Interpolación de Lagrange y su uso queda restringido a la disponibilidad de información reológica, la cual puede ser obtenida de un reograma que involucre a la viscosidad del lodo y temperatura, procediendo a digitalizar el mismo.

El comportamiento reológico será dividido en dos partes, cada una de ellas requerirá tener su correspondiente serie de datos, con esto se obtendrá un polinomio de ajuste para cada una de las series.

La presentación del método en el programa de cómputo está dada por la subrutina " Lagrange ", que permite ajustar los valores teóricos a los valores experimentales reales.

Primeramente se efectúa la diferencia entre los valores de viscosidad experimental y viscosidad teórica, asignándoles un vector diferencia. Dicho vector alimenta a la subrutina y con ello calcula de 1 a 6 coeficientes por cada uno de los dos posibles polinomios de ajuste. Las características antes descritas se deben a que es recomendable que un polinomio sea de grado menor o igual a cinco, ya que de lo contrario se tendería a presentar paulatinamente mayor inestabilidad, especialmente en problemas de interpolación de valores, R. Iriarte et al.²⁹

En general el grado del polinomio de ajuste será de (n-1), donde n es el número de pares de datos digitizados por cada subintervalo y el número de coeficientes es igual al número de puntos dato proporcionados.

Dadas las dos series de datos la subrutina Lagrange genera a los vectores VISPOL(I) y VISPOL2(I), que representan la diferencia de viscosidades interpoladas en forma continua y no en forma discreta como lo son los vectores DIFVIS(I) y DIFVIS2(I).

La suma de las viscosidades teóricas con los vectores respectivos generados por " Lagrange " permitirá determinar a la viscosidad de Andrade total. También es posible interpolar viscosidades a diferentes temperaturas de interés. La expresión general del Modelo de Andrade tiene la forma:

$$VISAT = C1 * EXP [C2 / TEM(I)] + (GG(I) * TEM(I)^I \setminus CC(I) * TEM(I)^I)$$

donde el lado izquierdo de la ecuación representa a la viscosidad de Andrade corregida, el primer término del lado derecho representa a la viscosidad teórica de Andrade, el segundo término representa la corrección de viscosidad entre los valores reales y teóricos. Este último término a su vez está constituido por dos partes, la primera parte corrige a la primera serie de datos con los coeficientes GG(I) y la segunda a su correspondiente con los coeficientes CC(I). La antidiagonal indica que se está trabajando con una u otra serie de datos pero nunca ambas en forma

simultanea.

Al proporcionar la segunda serie de datos, automáticamente se utilizará a la subrutina " Datos Dos " cuya función es hacer cambios de variables e inicializar otras con valor cero.

Es posible que se presente el caso en el cual no se disponga con información experimental actualizada de laboratorio. Al efectuar la corrida en el modelo de Andrade en el programa de cómputo se hace el cuestionamiento de tal posibilidad, en caso de ser afirmativa automáticamente el programa llama a la subrutina "AJUSTESD", que como su nombre lo indica permite ajustar los datos estimados por el modelo en cuestión, bajo la premisa de que la viscosidad de un lodo de perforación decrece al incrementar su temperatura.

El ajuste de datos también consiste en dividir el comportamiento reológico en dos partes (no forzosamente iguales). Dado un sistema de ejes coordenados, donde el eje de las ordenadas es el error relativo de viscosidad en fracción y el de las abscisas es la temperatura.

Habrá que verificar la distribución de errores que se origina al estimar las viscosidades por el modelo en cuestión. Es necesario determinar la temperatura (TMO) a la cual el modelo de Andrade determina la viscosidad (VPM) con mayor error relativo. Esto puede conocerse con información de lodos con características similares, de registros pasados o determinando el rango de valores en los que ocurre el mayor error de predicción, la fracción de error estará dada respecto a la viscosidad.

Una vez conocido el punto (TMO,VPM) y sabiendo que las mejores predicciones del modelo son los datos de entrada básicos, es decir la condición inicial y final, pues tienen errores prácticamente nulos, es posible hacer común el punto crítico a cada uno de los otros dos puntos (inicial y final). Con lo anterior es perfectamente factible generar las ecuaciones de dos rectas, cuyas constantes básicas serán: M_1, B_1, M_2 y B_2 .

A cualquier temperatura le corresponde una fracción de error

de la viscosidad estimada, lo que indica que hay que incrementarla en dicha cantidad para obtener a la viscosidad corregida.

En forma ilustrativa se puede mostrar la expresión general para corregir a la viscosidad estimada:

$$\mu_{\text{corr.}} = \mu_{\text{estim.}} * [1 + (M\# * TEM + B\#)]$$

donde:

- $\mu_{\text{corr.}}$ = viscosidad corregida
- $\mu_{\text{estim.}}$ = viscosidad estimada por modelo de Andrade
- M# = pendiente 1 o 2; M1 o M2
- B# = ordenada al origen 1 o 2; B1 o B2

Para los modelos 3, 4 y 5 se tiene la alternativa de mandar llamar a la subrutina " VISPT "que permite corregir la viscosidad por efectos de presión y temperatura. Al igual que en la subrutina anterior se considera que la viscosidad de un líquido disminuye cuando su temperatura aumenta y conserva la misma tendencia al disminuirle la presión. Obviamente la viscosidad del lodo tiene mayor sensibilidad a la temperatura que a la presión.

El planteamiento fué hecho a partir de una función exponencial decimal, tanto para la presión como para la temperatura, haciendo una corrección por condiciones estandar. Los denominadores de cada uno de los exponentes (D1, D2) pueden ser obtenidos a partir de datos experimentales que cuenten con variación de presión y temperatura. Se toma la condición inicial como punto común y considerando las componentes de aquellos puntos que contengan a la máxima presión y a a la máxima temperatura, se sustituirán cada uno de ellos en la ecuación de recurrencia, formandose de esta manera un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas. La expresión general del factor de corrección de la viscosidad es:

$$FMU = \text{antlog}(P1 - 14.7) / P1^{D2} - (T1 - 60) / T1^{D1})$$

La subrutina también permite calcular el error porcentual existente entre el valor experimental y el valor estimado por el programa de cómputo. Si se desea calcular dicho error es recomendable hacerlo únicamente a nivel pantalla, debido a que hay que ir introduciendo dato a dato el caso de estudio requerido. Si el signo del error porcentual es positivo, indicará que el valor teórico estimado es mayor que el valor real experimental, inversamente si el error es negativo indica que el valor teórico es inferior al valor experimental.

IV.2 Variables de Cómputo

Respecto a las variables utilizadas en el programa de cómputo se intentó respetar dentro de lo posible la nomenclatura propuesta por el Ing. F. Garaicochea y R. A. Castro²⁷.

Sin embargo, existen varios parámetros que no se encuentran registrados en dicho documento, por lo cual fue necesario hacer una notación personal.

La nomenclatura que se presenta en el programa de cómputo no necesariamente coincide con la que se presenta en el desarrollo del trabajo escrito, por lo que se recomienda no confundir variables, parámetros y simbología.

Debido a que los métodos y modelos empleados en el programa de cómputo son similares (especialmente las opciones 3, 4 y 5), se presenta de una manera global las unidades de las variables reológicas comunes a cada modelo. Posteriormente se listan las variables que fueron utilizadas en el programa de cómputo para cada modelo en particular, mismas que son integradas en el diagrama de bloques.

Lista de Variables de Computo

Variables Globales

| | |
|----------|--|
| γ | velocidad de corte [rpm] |
| μ | viscosidad [cp] |
| τ | esfuerzo de corte [lbf/100pie ²] |
| e | lectura Fann [grados] |
| T | temperatura [°C, °F] |
| P | presión [lbf/pg ²] |

Modelo de Newton

| | |
|---------|--|
| M | número de datos (velocidad Fann, lectura Fann) |
| SRT1(I) | velocidad de corte [rpm] |
| STSS(I) | lectura Fann |
| SRT(I) | velocidad de corte [1/seg] |
| VISN(I) | viscosidad obtenida por modelo de Newton |

Método de Mínimos Cuadrados

| | |
|---------|--|
| ND | número de datos Fann |
| NN(I) | velocidad de corte |
| LECT(I) | lectura Fann |
| SUMLEC | sumatoria de lecturas Fann |
| SUMN | sumatoria de velocidades |
| SUMNL | sumatoria del producto velocidad x Lectura |
| SUMN2 | sumatoria de velocidades cuadradas |
| VISMC | viscosidad plástica obtenida por el método de mínimos cuadrados. |
| STSS0 | punto de cedencia |
| SUMLECT | sumatoria de los logaritmos decimales de las lecturas Fann. |
| SUMVEL | sumatoria de logaritmos de velocidades Fann |

| | |
|---------|---|
| SUMNV | sumatoria del producto de los logaritmos de la velocidad y la lectura Fann. |
| SUMVEL2 | sumatoria del cuadrado del logaritmo de la velocidad de corte. |
| N | índice de comportamiento reológico [adim] |
| K | índice de consistencia [$\text{lbr seg}^N / 100\text{pie}^2$] |

Modelo de Ley de Potencia Modificada

| | |
|-----------|--|
| L600 | lectura Fann a 600 rpm |
| L300 | lectura Fann a 300 rpm |
| STSSOP | punto de cedencia en coordenadas logarítmicas |
| N | índice de comportamiento reológico |
| K1 | índice de consistencia a 600 rpm |
| K2 | índice de consistencia a 300 rpm |
| KM | índice de consistencia medio |
| M | número de velocidades para calcular viscosidad |
| NN(I) | velocidades de corte para calcular viscosidad |
| VISLPM(I) | viscosidad obtenida con el modelo de Ley de potencia modificada. |
| B | número de velocidades para obtener lectura Fann |
| TEQ(I) | lectura teórica Fann |

Modelo de Casson

| | |
|---------|--|
| NN(1) | velocidad Fann a 600 rpm |
| NN(2) | velocidad Fann a 100 rpm |
| L(1) | lectura Fann a 600 rpm |
| L(2) | lectura Fann a 100 rpm |
| VISINF | viscosidad infinita |
| STSSC | punto de cedencia de Casson |
| M | número de velocidades para calcular viscosidad |
| NN(I) | velocidades de corte para calcular viscosidad |
| VISC(I) | viscosidades obtenidas por modelo de Casson |

MM número de lecturas teóricas Fann deseadas
TEO1(I) lecturas teóricas Fann calculadas

Modelo de Metzner and Reed

NN(1) velocidad Fann de 600 rpm
NN(2) velocidad Fann de 300 rpm
STSSMR(1) esfuerzo de corte a 600 rpm
STSSMR(2) esfuerzo de corte a 300 rpm
a , b índices de comportamiento de flujo
n ' índice de comportamiento de flujo de Metzner
and Reed.
K ' índice de consistencia de Metzner and Reed
NVF número de velocidades Fann
VISMR(I) viscosidad obtenida con modelo de Metzner and
Reed.
NVI número de velocidades a interpolar
NN(I) velocidades a interpolar
TEO2(I) lectura teórica Fann calculada

Modelo de Andrade

TEM(1) temperatura inicial a condiciones de superficie
TEM(2) temperatura final a condiciones de fondo
VISA(1) viscosidad inicial a condiciones de superficie
VISA(2) viscosidad final a condiciones de fondo
TE1 temperatura inicial en modelo de Andrade
TE2 temperatura final en modelo de Andrade
C1, C2 constantes características del fluido en el
modelo de Andrade.
NOB número de temperaturas en cada serie de datos
TEM(I) temperaturas digitizadas para serie de datos 1
VISA(I) viscosidad de andrade para la serie 1 ; I ≠ 1,2
TEM2(I) temperaturas digitizadas para serie de datos 2

VISA2(I) viscosidad de andrade para la serie de datos 2
 VISAE(I) viscosidades experimentales @ a temperaturas de serie de datos 1.
 DIFVIS(I) diferencia de viscosidades para la serie 1
 VISPOL(I) viscosidades del polinomio de Lagrange en serie de datos 1.
 CC(I) coeficientes del polinomio de ajuste a la diferencia de viscosidades en serie de datos 2
 VISAT(I) viscosidad de Andrade total serie de datos uno
 VISAT2(I) viscosidad de Andrade total serie de datos dos
 TEMP columna de temperaturas digitizadas
 VISAE columna de viscosidades experimentales
 VISA columna de viscosidades teóricas de Andrade
 DIFVIS columna de diferencia entre viscosidades
 VISAT columna de viscosidad de Andrade Total
 NTI1 número de temperaturas a interpolar en serie 1
 TEMI(I) temperaturas a interpolar en serie 1
 VISA3(I) viscosidad de Andrade al interpolar en serie 1
 VISA4(I) viscosidad del polinomio de Lagrange al interpolar en serie 1.
 VISATI(I) viscosidades interpoladas en serie 1
 NTI2 número de temperaturas a interpolar en serie 2
 TEMI2(I) temperaturas a interpolar en serie 2
 VISA3(I) viscosidad de Andrade al interpolar en serie 2
 VISA5(I) suma de viscosidad de Andrade y la viscosidad del polinomio de Lagrange en serie 2
 VISATI2(I) viscosidades interpoladas en serie de datos 2

Subrutina Lagrange

R(I) diferencia de viscosidades
 Z(J) productoria de R(I); $I = 1$ a 7
 ZZ(J) cociente entre la viscosidad de interés y Z(J)
 A,B,C,D,E asignación de temperaturas

C(I) producto que involucra las literales A,B,C,D,E
D(I) suma algebraica que involucra a las literales
G(I) coeficientes del polinomio de ajuste a la
diferencia de viscosidades en serie de datos 1.
MM(I) viscosidad (variable dependiente) interpolada

Subrutina Datos Dos

TEM2(I) temperaturas digitizadas para la serie 2
VISAE2(I) viscosidades experimentales @ temperaturas de
serie de datos 2.
DIFVIS2(I) diferencia de viscosidades de la serie 2
VIS(I) asignación de DIFVIS2(I) para entrar a Lagrange
SSD variable que indica el deseo de trabajar con la
segunda serie de datos.
GG(I) coeficientes del polinomio de ajuste a la
diferencia de viscosidades en serie de datos 1
por asignación.
VISPOL2(I) diferencia de viscosidades del polinomio de
Lagrange en serie de datos 2.

Subrutina AJUSTEBD

TMO temperatura al mayor error de viscosidad estim.
VPM fracción al que ocurre mayor error de viscos.
M1 pendiente uno para ajuste de datos
M2 pendiente dos para ajuste de datos
B1 ordenada al origen uno para ajuste de datos
B2 ordenada al origen dos para ajuste de datos

Subrutina VISPT

T1 temperatura experimental [$^{\circ}$ F].
P1 presión experimental [lb/pg^2].

| | |
|-------|--|
| MUPC | viscosidad generada por el programa de cómputo |
| ETT | exponente de temperatura |
| FT | factor de corrección por temperatura |
| EPP | exponente de presión |
| FP | factor de corrección por presión |
| FMU | factor de corrección por viscosidad |
| VISTC | viscosidad teórica corregida |
| VISRE | viscosidad real experimental |
| EP | error porcentual [%] |

IV.3 Diagrama de Bloques

En este subcapítulo se hace la presentación general del diagrama de bloques, tanto del programa de cómputo como de cada uno de los métodos y modelos reológicos propuestos.

A continuación se enlistan cada uno de ellos en cuanto a su orden de aparición:

- . Diagrama General de Bloques
- . Modelo de Newton
- . Métodos de Mínimos Cuadrados
- . Modelo Ley de Potencia Modificada
- . Modelo de Casson
- . Modelo de Metzner and Reed
- . Modelo de Andrade
- . Subrutina Lagrange
- . Subrutina Datos Dos
- . Subrutina AJUSTESD
- . Subrutina VISPT

DIAGRAMA GENERAL DE BLOQUES

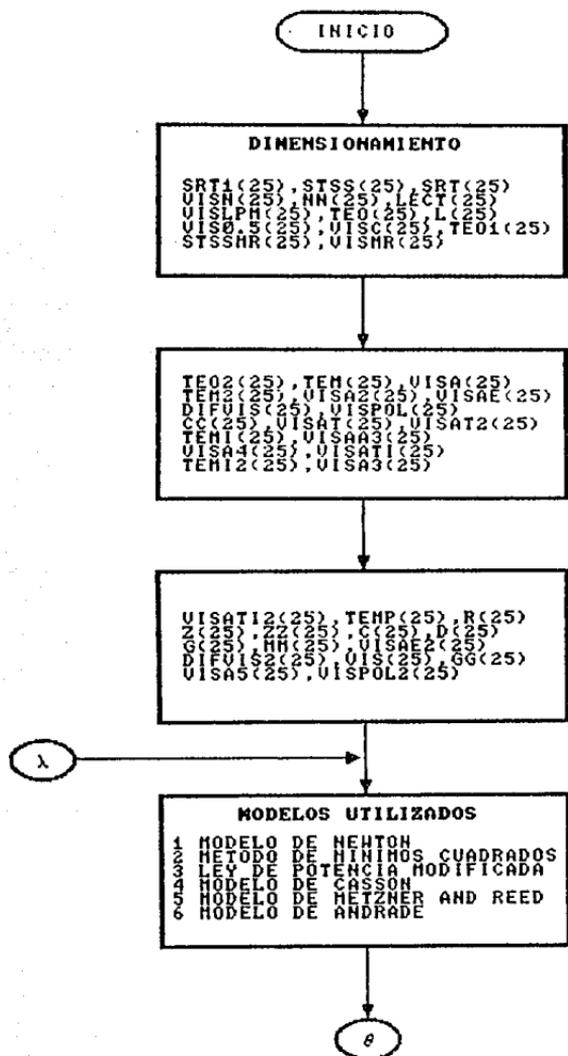
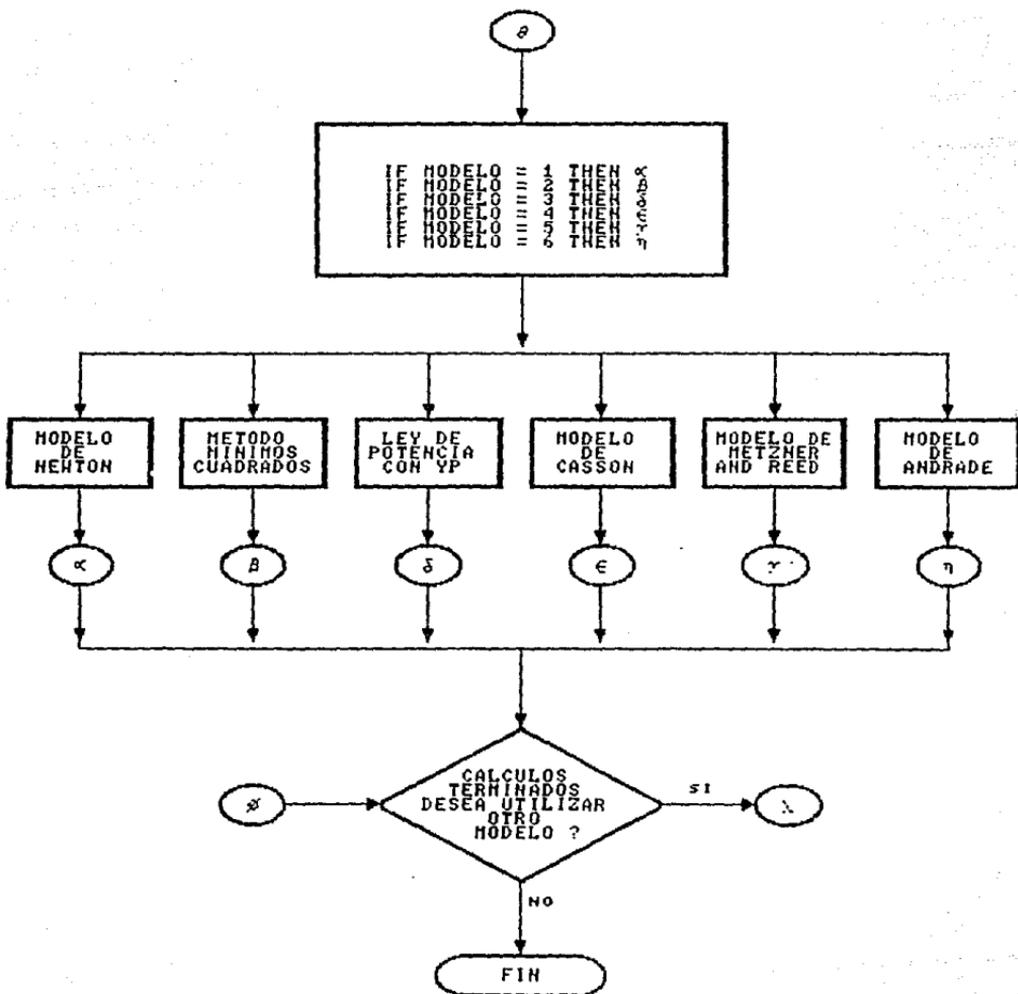
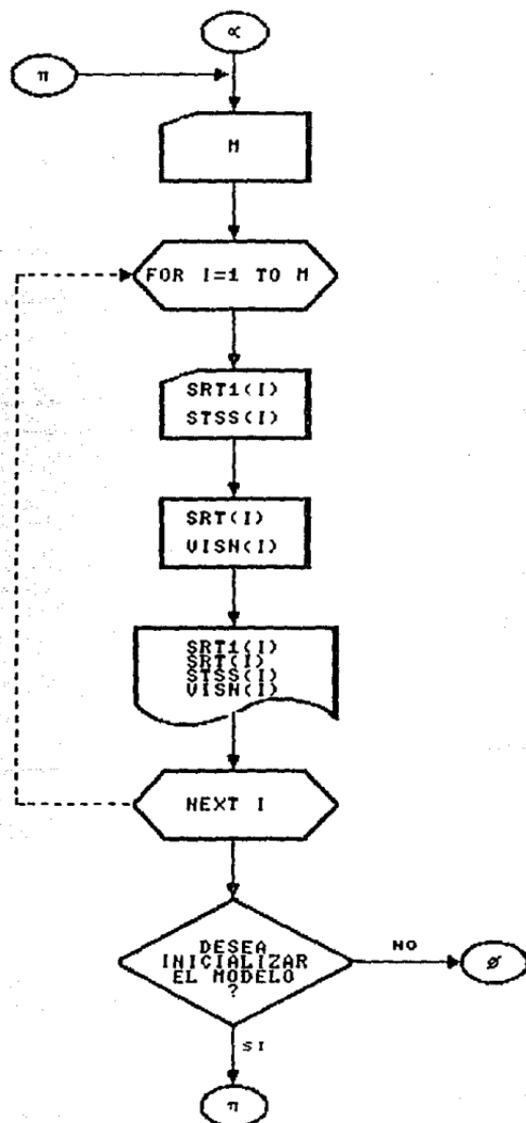


DIAGRAMA GENERAL DE BLOQUES

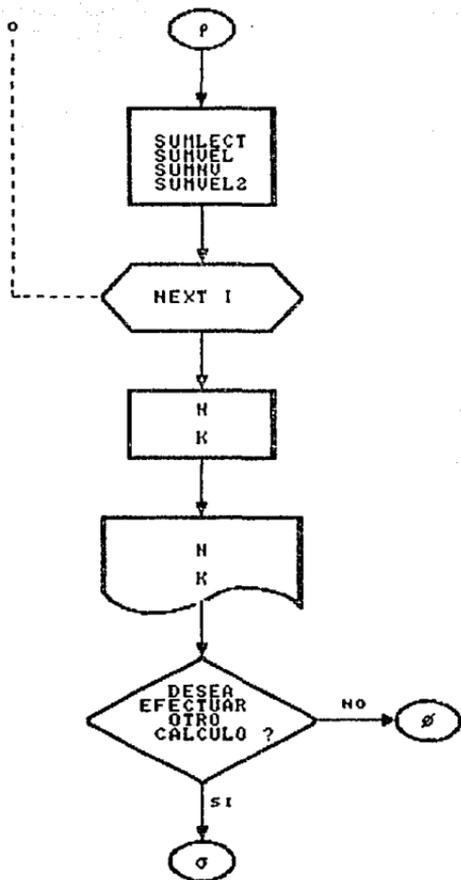
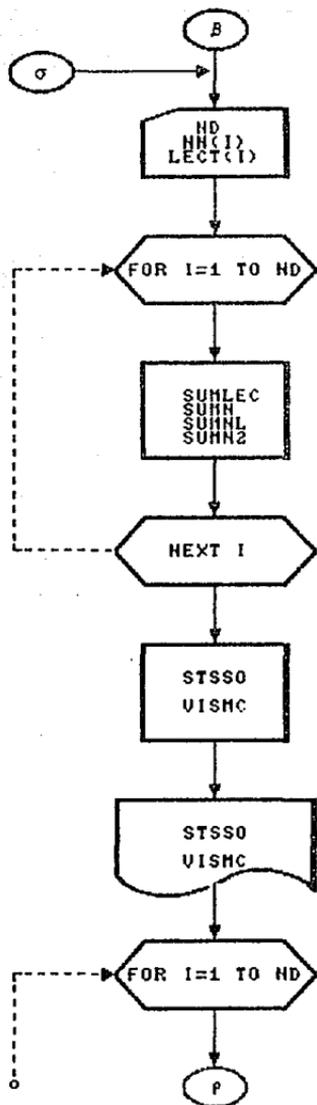
(CONTINUACION)



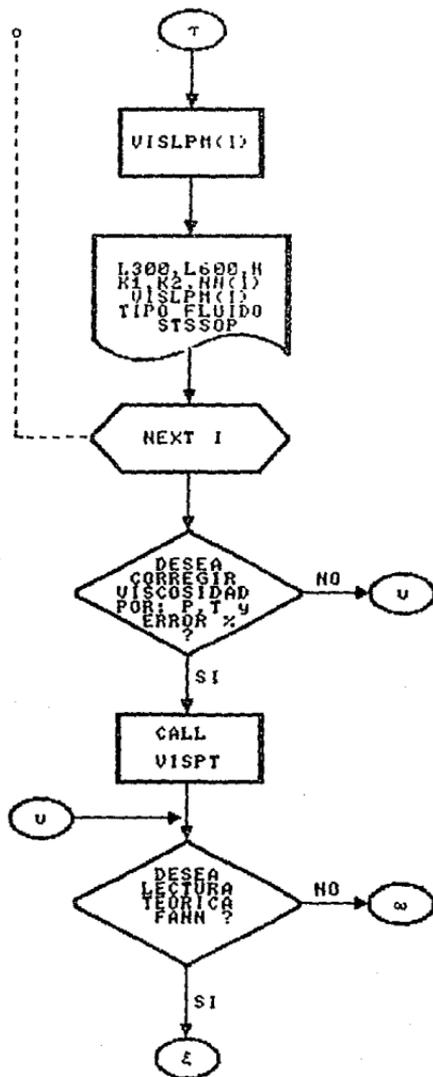
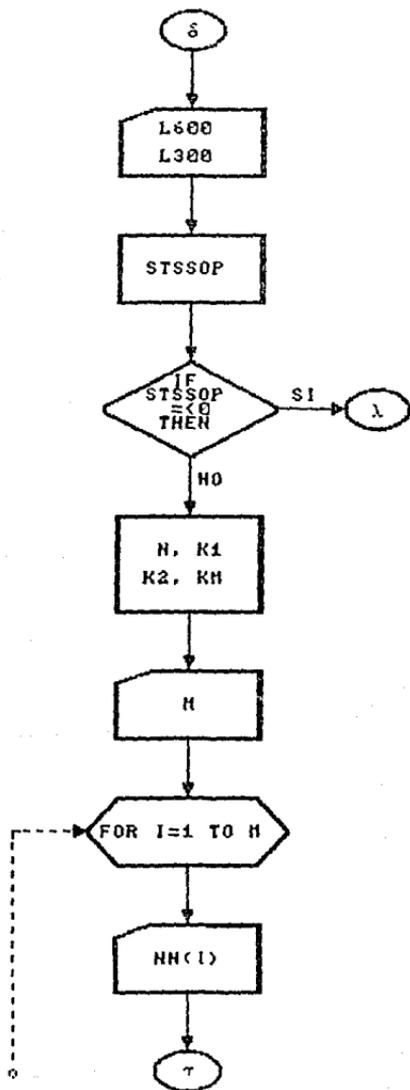
MODELO DE NEWTON



METODO DE MINIMOS CUADRADOS

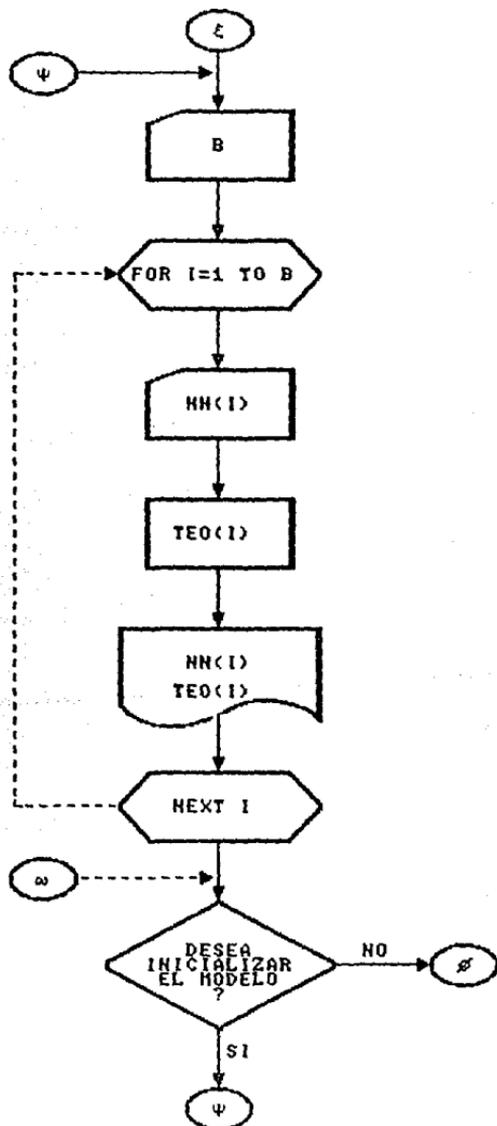


MODELO LEY DE POTENCIA MODIFICADA

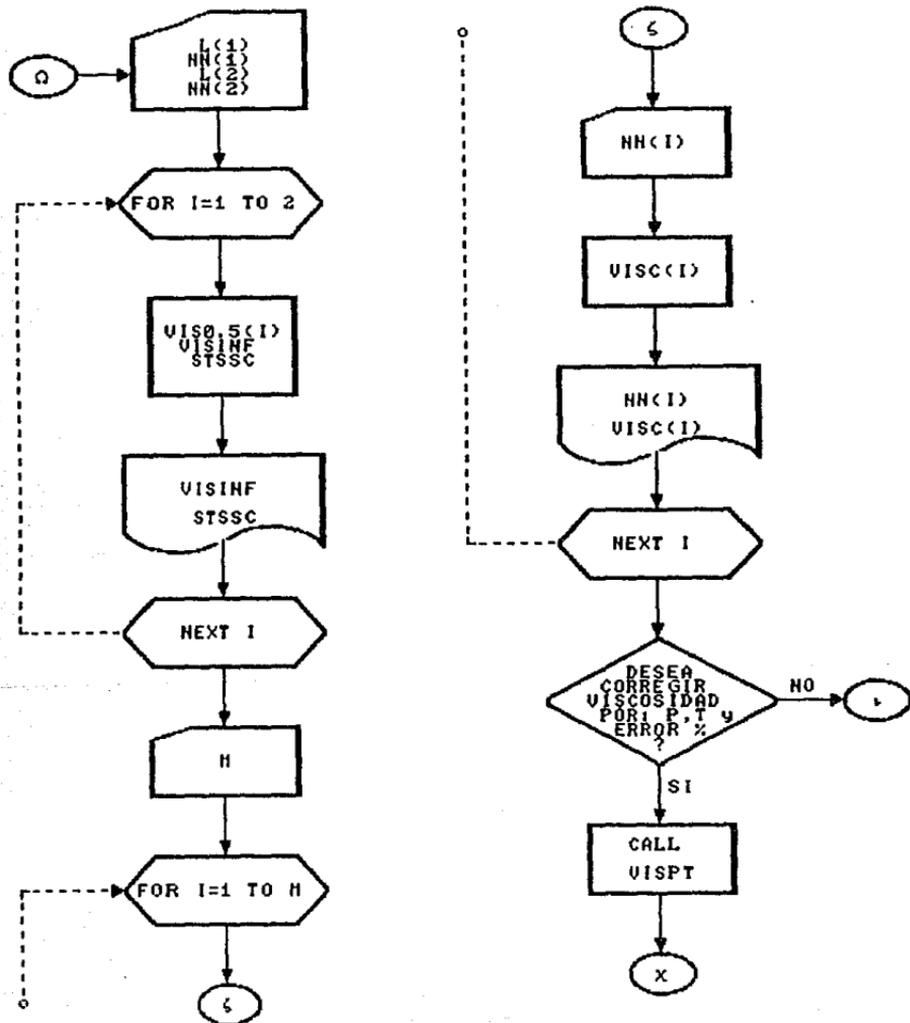


LEY DE POTENCIA MODIFICADA

(CONTINUACION)

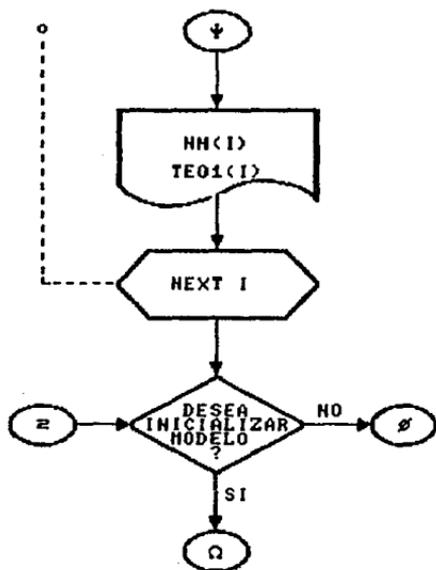
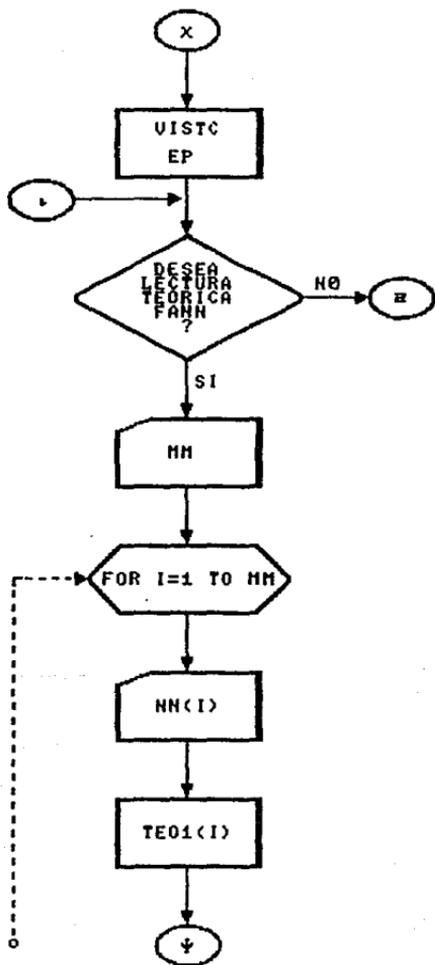


MODELO DE CASSON

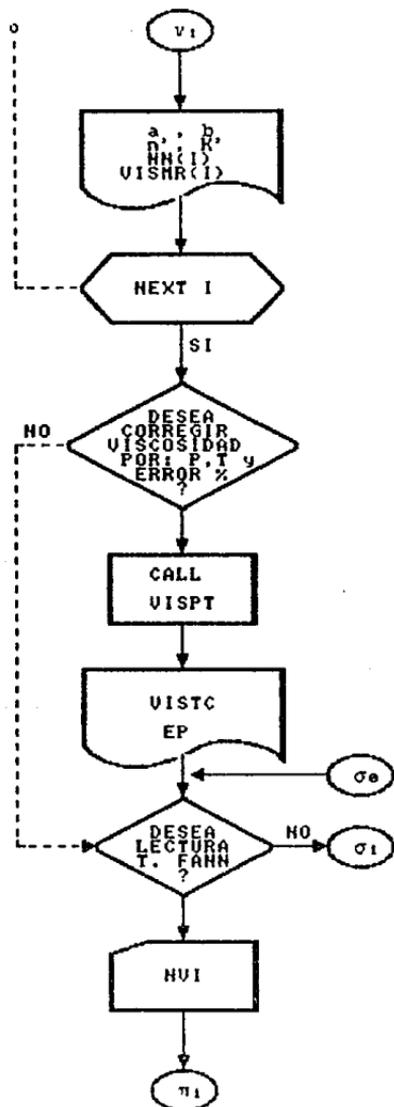
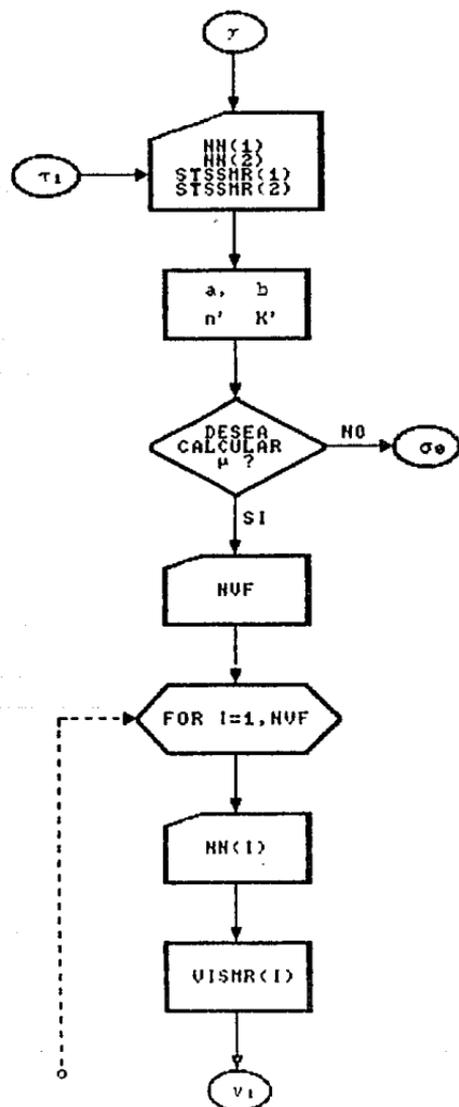


MODELO DE CASSON

(CONTINUACION)

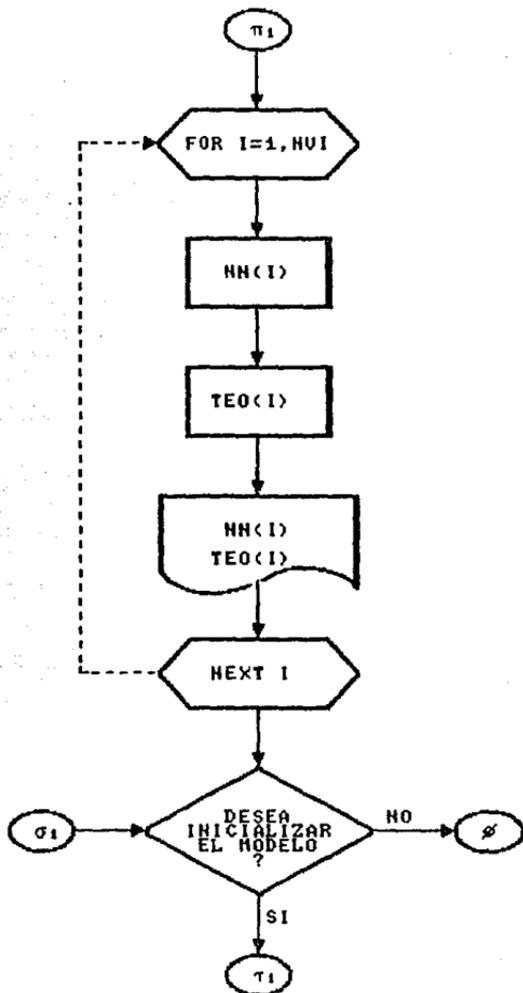


MODELO DE METZNER AND REED

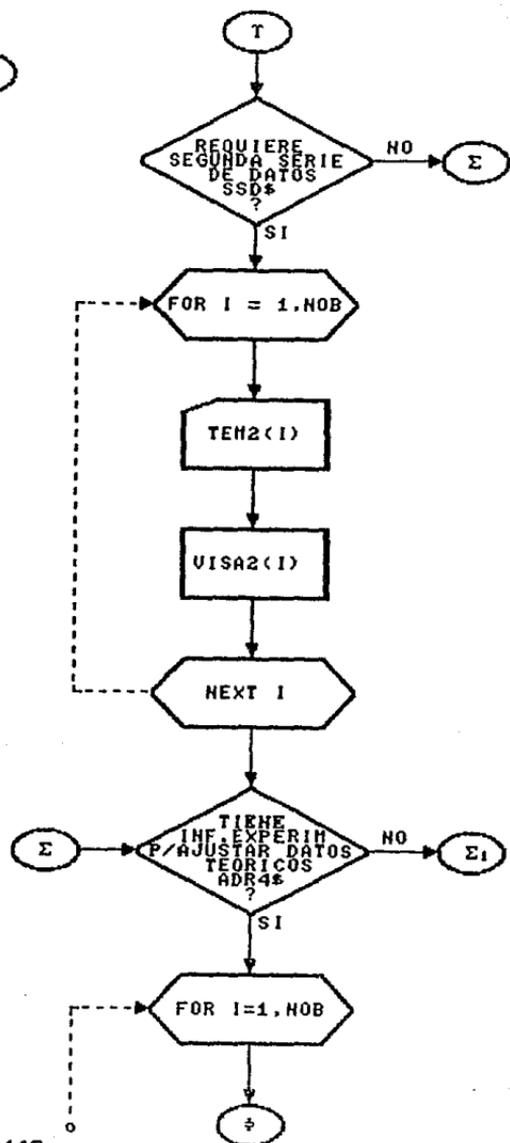
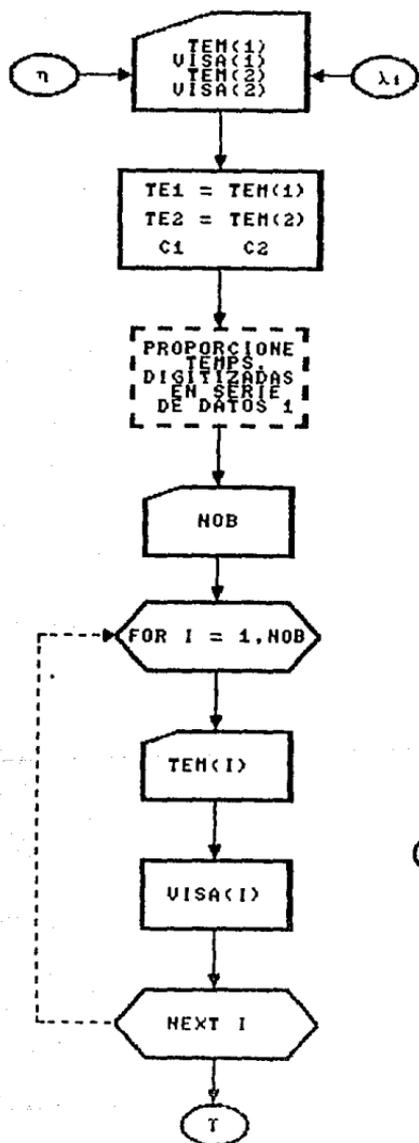


MODELO DE METZNER AND REED

(CONTINUACION)

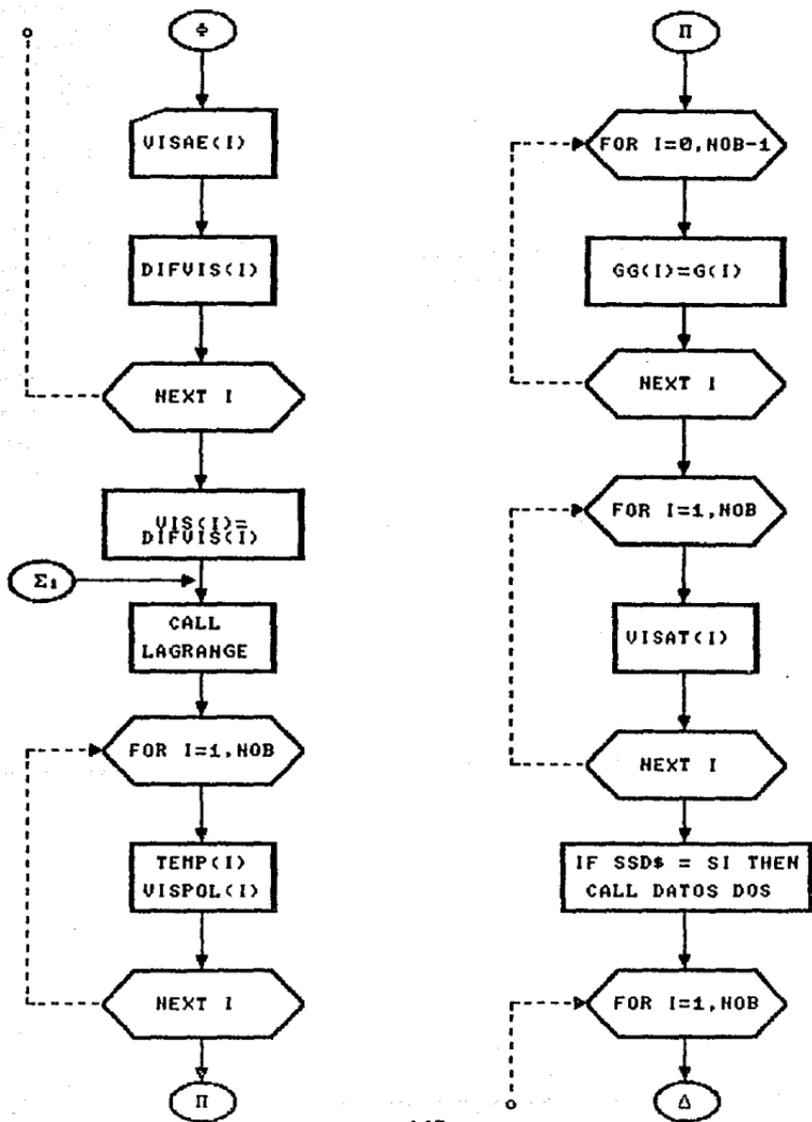


MODELO DE ANDRADE



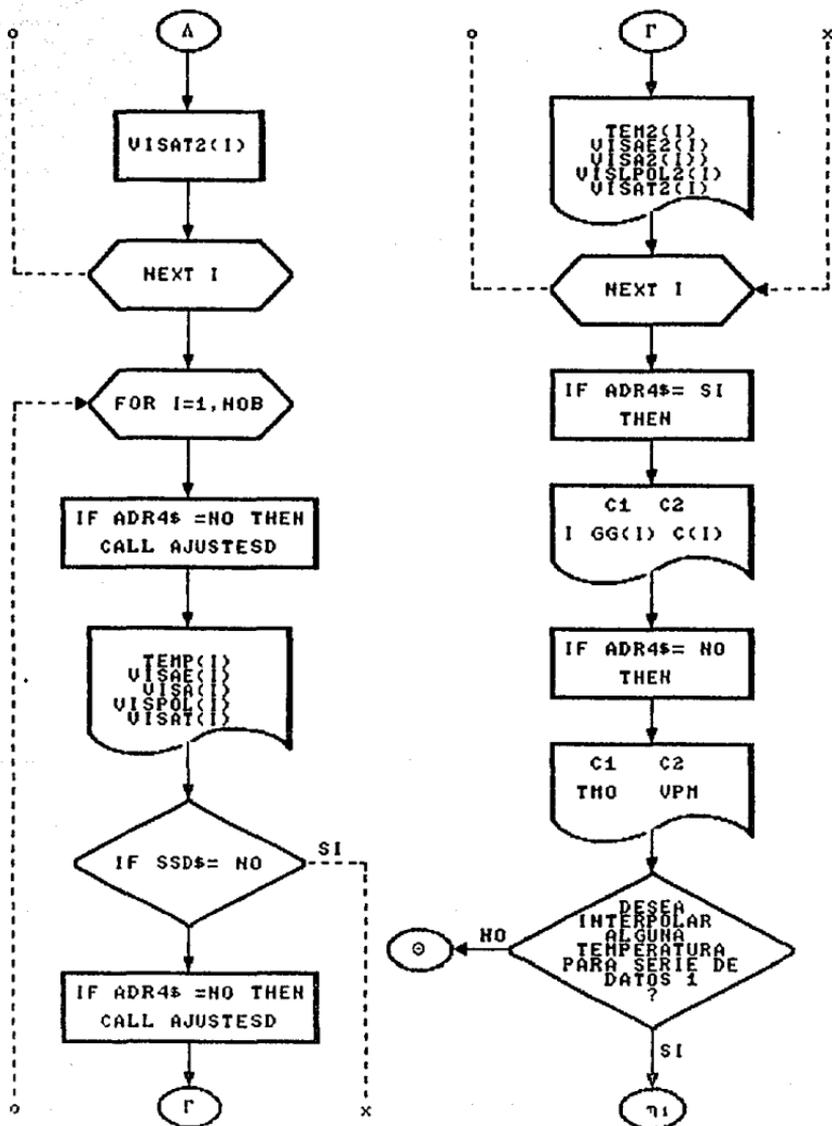
MODELO DE ANDRADE

(CONTINUACION) 1



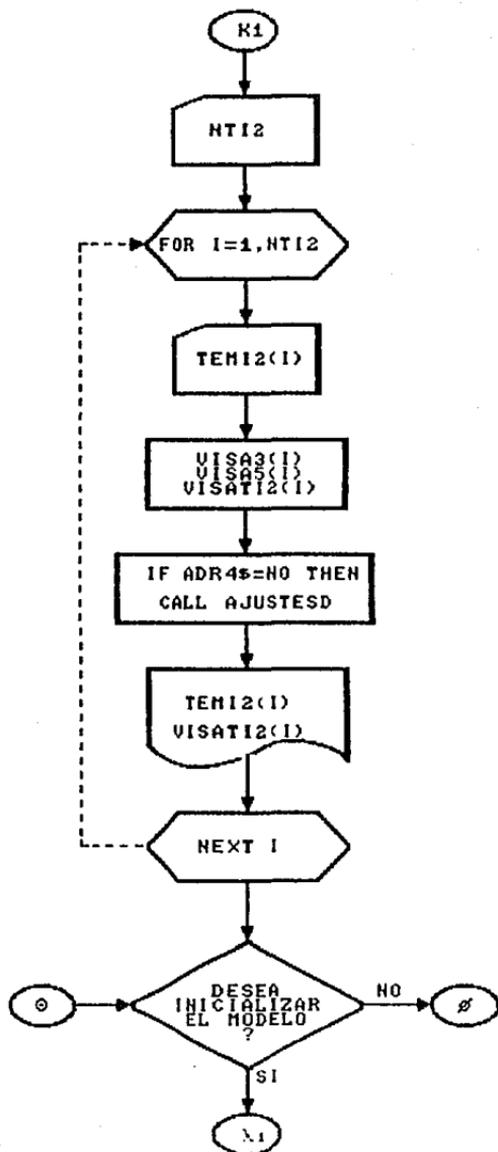
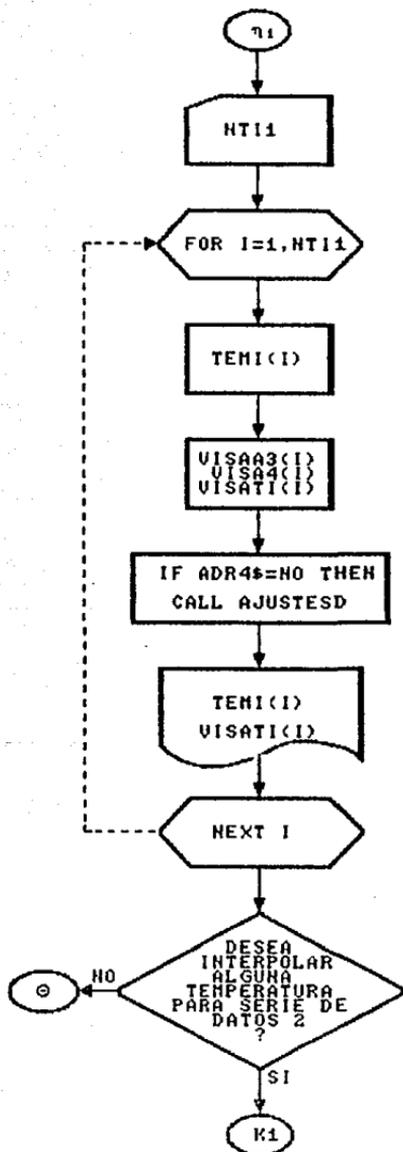
MODELO DE ANDRADE

(CONTINUACION) 2

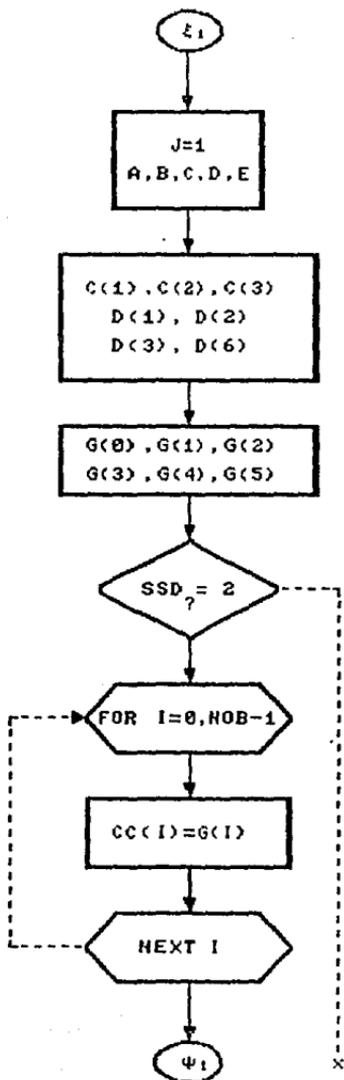
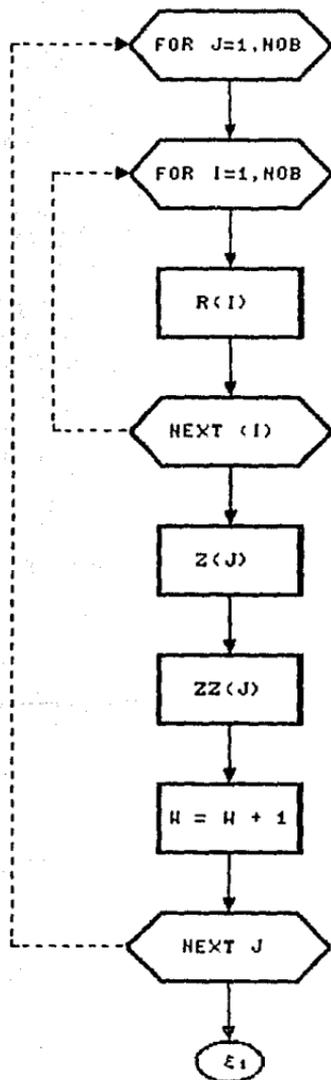


MODELO DE ANDRADE

(CONTINUACION)₃

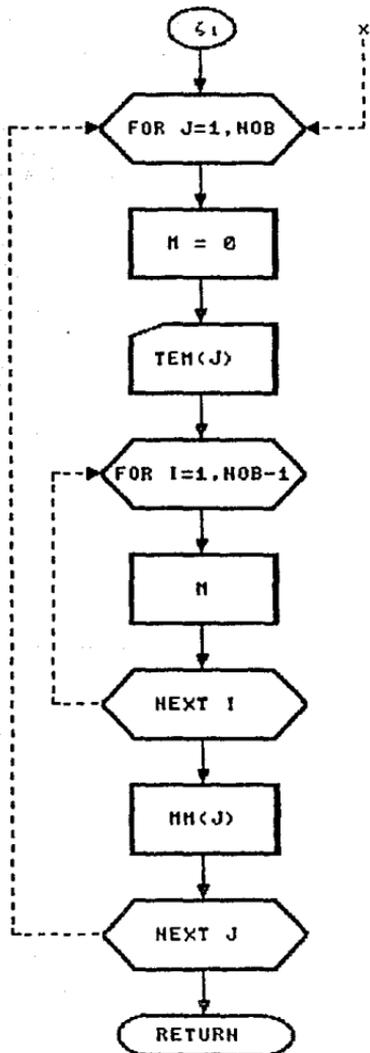


SUBROUTINA LAGRANGE

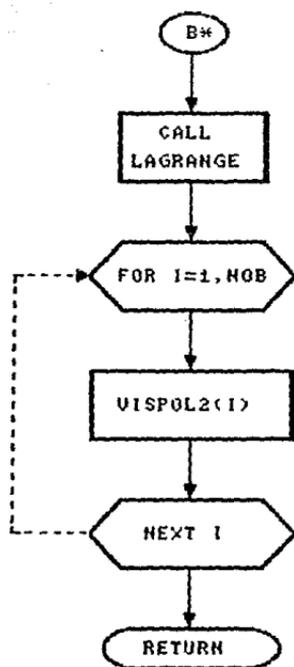
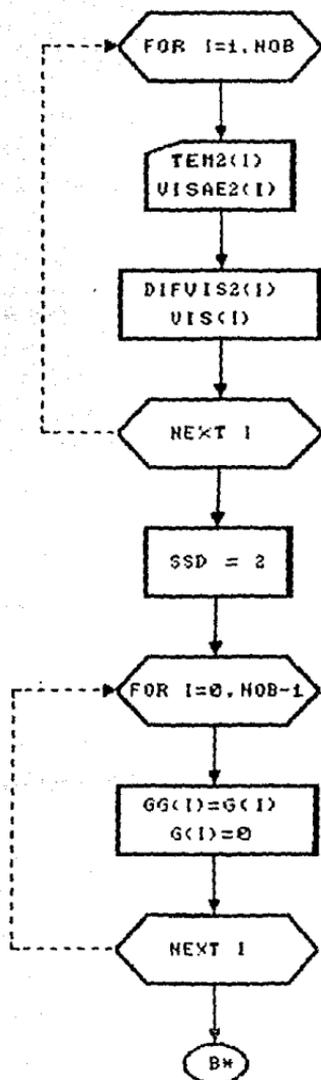


SUBROUTINA LAGRANGE

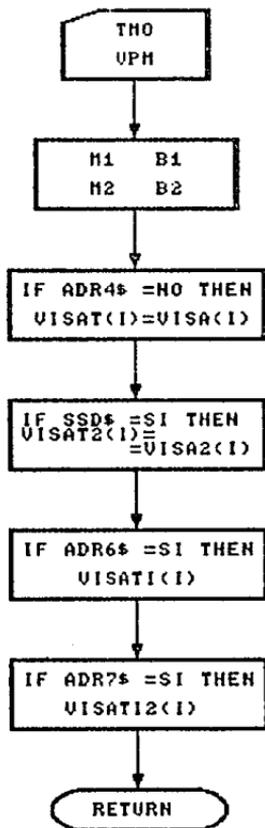
(CONTINUACION)



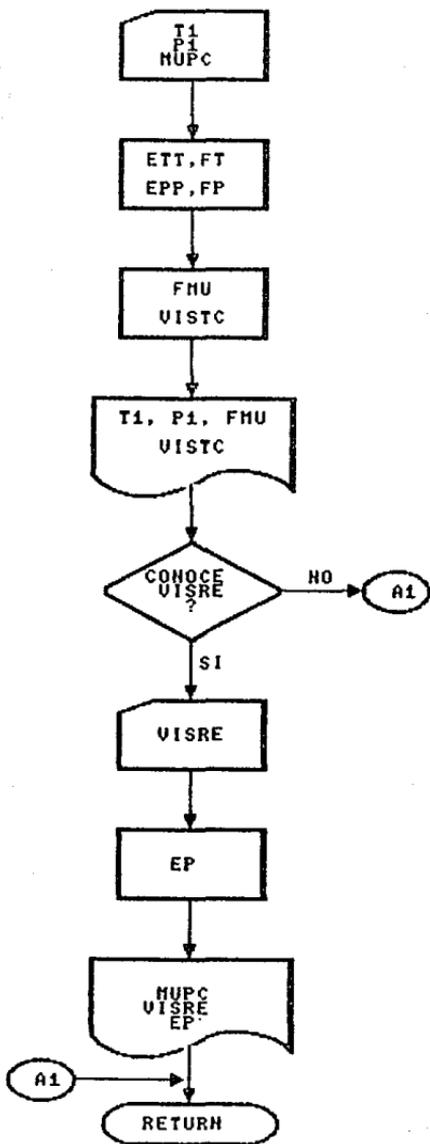
SUBROUTINA DATOS DOS



SUBROUTINA AJUSTESD



SUBROUTINA VISPT



IV.4 Presentación de Resultados

Se presenta la impresión de los datos de entrada así como los resultados arrojados por el programa de cómputo al haber efectuado diferentes corridas en cada una de las opciones del menú principal del mismo.

La información que alimenta al programa fue dividida en dos partes, en el primer caso se considera a la velocidad de corte que específicamente es utilizada en los modelos 1, 2, 3, 4 y 5. En el segundo caso se maneja a la variable temperatura empleada en el modelo 6.

Debido a la poca disponibilidad de información reológica completa, fue necesario seleccionar cuatro artículos técnicos donde cada uno de ellos satisfacen en cierta medida los requerimientos de información de alguna de las opciones del menú principal.

Las publicaciones a las que se está haciendo mención son las siguientes:

- . S.S. Okrajni and J.J. Azar²⁸.
- . Referencia⁵
- . Bottai A. et al.¹⁴
- . T.J. Bailey et al.³⁰

Obviamente cada artículo técnico maneja lodos de perforación diferentes.

En la Ref.²⁸ se experimentó con 15 fluidos de perforación diferentes, con sus correspondientes lecturas Fann, medidas a sus respectivas velocidades de corte. Como fluido de estudio se eligió al lodo 6, mismo que en nuestro trabajo será identificado como lodo 1, con densidad de 8.45 de lbm/gal (1.014 grm/cm³). El lodo es un sistema base agua bentonítico / polimérico.

En la Ref.³ se emplea un sistema de lodo base agua donde se muestran las lecturas Fann a diversas velocidades de corte. En el artículo se puede observar que hay una aplicación práctica para la determinación de viscosidades en diferentes partes del sistema de

circulación, específicamente en el espacio anular y en la barrena. Por lo que se estarán involucrando velocidades de corte diferentes a las Fann y el fluido será identificado como lodo 2.

En la Ref.¹⁶ fue "corrido" en un viscosímetro Fann 50 un lodo de perforación base agua con bentonita Bentsund Aus al 7.6 % con una formulación polimérica llamada Az, con una velocidad de corte de 100 rpm, a una presión de 500 lbr/pg², exponiéndolo a un rango de temperatura de [25, 216] °C, un tiempo de calentamiento de 72 minutos y un tiempo total de prueba de 180 minutos. Dicha información identificará al lodo 3 al correrlo en el programa de cómputo.

En la Ref.³⁰ se utiliza una emulsión inversa en base a un aceite mineral de baja toxicidad no densificado. Con pruebas de laboratorio HT/HP se modificó la temperatura en un rango de valores de [25, 200] °C, mientras que con la presión se varió de [1,1000] bar. Para estos datos el fluido de perforación será nombrado lodo 4.

Respecto a la presentación de resultados el tratamiento de la información es el siguiente:

- Para el primer tipo de información (velocidad de corte) se empleará la Ref.²⁰ y Ref.⁵. Se efectuará una corrida para los lodos 1 y 2 para cada opción considerada (1, 2, 3, 4 y 5).
- Para el segundo tipo de información (temperatura) se emplearán las referencias 16 y 30. Se harán tres corridas con el modelo 6:
 - la primera corrida será con información de la Ref.¹⁶, lodo 3.
 - la segunda corrida será con información de la Ref.³⁰, lodo 4.
 - la tercera corrida es hecha con la mínima información requerida por el modelo 6, también de la Ref.³⁰ donde puede considerarse que no se cuenta con información reológica disponible, para ello se efectuará un auto-ajuste del modelo de Andrade, con el fin de comparar resultados.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de cada una de las opciones del menú principal del programa de cómputo.

=====

MODELO DE NEWTON

=====

DATOS DE ENTRADA

LODD NO. 1

=====

| VELOCIDAD DE CORTE (rpm) | LECTURA FANN (grados) |
|-----------------------------|--------------------------|
| 600 | 12.00 |
| 300 | 9.00 |
| 200 | 8.00 |
| 100 | 6.00 |
| 6 | 2.00 |
| 3 | 1.00 |

=====

RESULTADOS

=====

| SRT1 (rpm) | SRT (1/seg) | STSS (grados) | VIS-NEWTON (cp) |
|---------------|----------------|------------------|--------------------|
| 600 | 1021.8 | 12.0 | 6.0 |
| 300 | 510.9 | 9.0 | 9.0 |
| 200 | 340.6 | 8.0 | 12.0 |
| 100 | 170.3 | 6.0 | 18.0 |
| 6 | 10.2 | 2.0 | 100.0 |
| 3 | 5.1 | 1.0 | 100.0 |

=====

DATOS DE ENTRADA

LODD NO. 2

=====

| VELOCIDAD DE CORTE (rpm) | LECTURA FANN (grados) |
|-----------------------------|--------------------------|
| 600 | 38.00 |
| 300 | 28.00 |
| 200 | 23.00 |
| 100 | 17.00 |
| 6 | 5.50 |
| 3 | 4.50 |

=====

RESULTADOS

=====

| SRT1 (rpm) | SRT (1/seg) | STSS (grados) | VIS-NEWTON (cp) |
|---------------|----------------|------------------|--------------------|
| 600 | 1021.8 | 38.0 | 19.0 |
| 300 | 510.9 | 28.0 | 28.0 |
| 200 | 340.6 | 23.0 | 34.5 |
| 100 | 170.3 | 17.0 | 51.0 |
| 6 | 10.2 | 5.5 | 275.0 |
| 3 | 5.1 | 4.5 | 450.0 |

=====

=====

M E T O D O D E M I N I M O S C U A D R A D O S

=====

DATOS DE ENTRADA

LODO NO. 1

=====

| | |
|--------------------|--------------|
| VELOCIDAD DE CORTE | LECTURA FANN |
| (rpm) | (grados) |
| 600 | 12.0 |
| 300 | 9.0 |

=====

RESULTADOS

=====

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| COORDENADAS | NATURALES |
| ===== | ===== |
| VISCOSIDAD PLASTICA | PUNTO DE CEDENCIA |
| (CP) | (LBF/100 PIE ²) |

| | |
|------|------|
| 3.00 | 6.00 |
|------|------|

| | |
|-------------|--------------|
| COORDENADAS | LOGARITMICAS |
| ===== | ===== |

| | |
|-----|---|
| N | K |
| (-) | (LBF.S ⁿ /100 PIE ²) |

| | |
|---------|---------|
| 0.41505 | 0.67680 |
|---------|---------|

=====

DATOS DE ENTRADA

LODO NO. 2

=====

| | |
|--------------------|--------------|
| VELOCIDAD DE CORTE | LECTURA FANN |
| (rpm) | (grados) |
| 600 | 38.0 |
| 300 | 28.0 |

=====

RESULTADOS

=====

| | |
|---------------------|-----------------------------|
| COORDENADAS | NATURALES |
| ===== | ===== |
| VISCOSIDAD PLASTICA | PUNTO DE CEDENCIA |
| (CP) | (LBF/100 PIE ²) |

| | |
|-------|-------|
| 10.00 | 18.00 |
|-------|-------|

| | |
|-------------|--------------|
| COORDENADAS | LOGARITMICAS |
| ===== | ===== |

| | |
|-----|---|
| N | K |
| (-) | (LBF.S ⁿ /100 PIE ²) |

| | |
|---------|---------|
| 0.44058 | 1.79578 |
|---------|---------|

=====

=====

LEY DE POTENCIA MODIFICADA

=====

DATOS DE ENTRADA

LODO NO. 1

=====

LECTURA 600 (rpm) = 12

LECTURA 300 (rpm) = 9

=====

=====

RESULTADOS

=====

| LECTURA 600 300 [grados] | N [adim] | K1 | K2 | VELOCIDAD [rpm] | VISLPM [cp] |
|--------------------------------|-------------|-------|-------|--------------------|----------------|
| 12 9 | 0.448 | 0.503 | 0.503 | 600.0 | 6.00 |
| | | | | 300.0 | 9.00 |
| | | | | 200.0 | 11.45 |
| | | | | 100.0 | 17.41 |
| | | | | 6.0 | 110.14 |
| | | | | 3.0 | 182.25 |

=====

EL FLUIDO TIENE UN COMPORTAMIENTO;
PSEUDOPLASTICO CON STSSO = 0.778

=====

LECTURAS TEORICAS FANN POR LEY DE POTENCIA MODIFICADA

=====

| VELOCIDAD DE CORTE [rpm] | LECTURA TEORICA FANN [grados] |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 600.0 | 12.0 |
| 300.0 | 9.0 |
| 200.0 | 7.6 |
| 100.0 | 5.8 |
| 6.0 | 2.2 |
| 3.0 | 1.8 |

=====

=====

LEY DE POTENCIA MODIFICADA

=====

DATOS DE ENTRADA

LDDO NO. 2

=====

LECTURA 600 (rpm) = 38

LECTURA 300 (rpm) = 29

=====

=====

RESULTADOS

=====

| LECTURA 600 300 [grado] | N [adim] | K1 | K2 | VELOCIDAD [rpm] | VISLPM [cp] |
|-------------------------------|-------------|-------|-------|--------------------|----------------|
| 38 29 | 0.458 | 1.543 | 1.542 | 58824.0 | 1.53 |
| | | | | 600.0 | 18.99 |
| | | | | 300.0 | 28.00 |
| | | | | 200.0 | 35.20 |
| | | | | 100.0 | 52.30 |
| | | | | 48.9 | 79.24 |
| | | | | 6.0 | 286.03 |
| | | | | 3.0 | 450.70 |

=====

EL FLUIDO TIENE UN COMPORTAMIENTO:
PSEUDOPLASTICO' CON STSSD' = 1.255

=====

LECTURAS TEORICAS FANN POR LEY DE POTENCIA MODIFICADA

=====

| VELOCIDAD DE CORTE [rpm] | LECTURA TEORICA FANN [grados] |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 600.0 | 38.0 |
| 300.0 | 28.0 |
| 200.0 | 23.5 |
| 100.0 | 17.4 |
| 6.0 | 5.7 |
| 3.0 | 4.5 |

=====

=====

MODELO DE CASSON

=====

DATOS DE ENTRADA

LQDO NO. 1

=====

| VELOCIDAD [rpm] | LECTURA FANN [grados] |
|--------------------|--------------------------|
| 600 | 12 |
| 100 | 6 |

=====

=====

RESULTADOS

=====

!

VISINF = 1.46947

STSSC = 3.26704

=====

VELOCIDADES INTERPOLADAS POR MODELO DE CASSON

=====

| NN [rpm] | VISC [cp] |
|-------------|--------------|
| 58824.0 | 1.79 |
| 600.0 | 6.00 |
| 300.0 | 8.77 |
| 200.0 | 11.26 |
| 100.0 | 18.00 |
| 6.0 | 184.56 |
| 3.0 | 350.08 |

=====

LECTURAS TEORICAS FANN POR MODELO DE CASSON

=====

| VELOCIDAD DE CORTE [rpm] | LECTURA FANN [grados] |
|-----------------------------|--------------------------|
| 600.0 | 12.00 |
| 300.0 | 8.77 |
| 200.0 | 7.51 |
| 100.0 | 6.00 |
| 6.0 | 3.69 |
| 3.0 | 3.50 |

=====

=====

MODELO DE CASSON

=====

DATOS DE ENTRADA

LODD NO. 2

=====

| VELOCIDAD [rpm] | LECTURA FANN [grados] |
|--------------------|--------------------------|
| 600 | 38 |
| 100 | 17 |

=====

=====

RESULTADOS

=====

VISINF = 5.94850

STSSC = 7.86684

=====

=====

VELOCIDADES INTERPOLADAS POR MODELO DE CASSON

=====

| NN [rpm] | VISC [cp] |
|-------------|--------------|
| 58824.0 | 6.93 |
| 600.0 | 19.00 |
| 300.0 | 26.57 |
| 200.0 | 33.23 |
| 100.0 | 51.01 |
| 49.0 | 83.86 |
| 6.0 | 468.24 |
| 3.0 | 875.68 |

=====

=====

LECTURAS TEORICAS FANN POR MODELO DE CASSON

=====

| VELOCIDAD DE CORTE [rpm] | LECTURA FANN [grados] |
|-----------------------------|--------------------------|
| 600.0 | 38.00 |
| 300.0 | 26.57 |
| 200.0 | 22.15 |
| 100.0 | 17.00 |
| 6.0 | 9.36 |
| 3.0 | 8.76 |

=====

=====

MODELO DE METZNER AND REED

=====

DATOS DE ENTRADA

LODO NO. 1

=====

| VELOCIDAD (rpm) | LECTURA FANN (grados) |
|--------------------|--------------------------|
| 600 | 12 |
| 300 | 9 |

=====

=====

RESULTADOS

=====

| a | b | n' [adim] | K' [LB S ⁿ /100ft ²] | VELOCIDAD [rpm] | VISM'R [cp] |
|-------|-------|--------------|--|--------------------|----------------|
| 2.565 | 4.409 | 0.4150 | 0.7666 | | |
| | | | | 600 | 6.0 |
| | | | | 300 | 9.0 |
| | | | | 200 | 11.4 |
| | | | | 100 | 17.1 |
| | | | | 5 | 88.7 |
| | | | | 3 | 133.1 |

=====

LECTURA TEORICA FANN CON MODELO DE METZNER AND REED

=====

| VELOCIDAD DE CORTE [rpm] | LECTURA TEORICA FANN [grados] |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 600.0 | 12 |
| 300.0 | 9 |
| 200.0 | 8 |
| 100.0 | 6 |
| 6.0 | 2 |
| 3.0 | 1 |

=====

=====

MODELO DE METZNER AND REED

=====

DATOS DE ENTRADA

LODO NO. 2

=====

| VELOCIDAD (rpm) | LECTURA FANN (grados) |
|--------------------|--------------------------|
| 600 | 38 |
| 300 | 28 |

=====

=====

RESULTADOS

=====

| a | b | n' [adim] | K' [LB S ⁿ /100ft ²] | VELOCIDAD [rpm] | VISMR [cp] |
|-------|-------|--------------|--|--------------------|---------------|
| 0.265 | 4.270 | 0.4406 | 2.0262 | | |
| | | | | 58824 | 1.5 |
| | | | | 600 | 19.0 |
| | | | | 300 | 28.0 |
| | | | | 200 | 35.1 |
| | | | | 100 | 51.8 |
| | | | | 48.9 | 77.2 |
| | | | | 6 | 249.7 |
| | | | | 3 | 368.0 |

=====

LECTURA TEORICA FANN CON MODELO DE METZNER AND REED

=====

| VELOCIDAD DE CORTE [rpm] | LECTURA TEORICA FANN [grados] |
|-----------------------------|----------------------------------|
| 600.0 | 38 |
| 300.0 | 28 |
| 200.0 | 23 |
| 100.0 | 17 |
| 6.0 | 5 |
| 3.0 | 4 |

=====

=====

MODELO DE ANDRADE AJUSTADO CON LAGRANGE
 LODO NO. 3

=====

| TEMP [oC] | VISAE [cp] | VISA [cp] | DIFVIS [cp] | VISAT [cp] |
|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| 28.13 | 10.00 | 10.000 | -0.0000 | 10.000 |
| 43.75 | 9.45 | 11.034 | -1.5841 | 9.450 |
| 56.56 | 9.00 | 11.486 | -2.4860 | 9.000 |
| 87.50 | 8.65 | 12.056 | -3.4067 | 8.650 |
| 98.44 | 9.00 | 12.176 | -3.1762 | 8.999 |
| 103.75 | 9.50 | 12.225 | -2.7255 | 9.499 |
| 124.69 | 12.25 | 12.379 | -0.1279 | 12.251 |
| 135.63 | 13.75 | 12.441 | 1.3096 | 13.751 |
| 165.06 | 15.50 | 12.569 | 2.9355 | 15.504 |
| 190.66 | 16.25 | 12.648 | 3.6089 | 16.257 |
| 202.02 | 14.00 | 12.677 | 1.3296 | 14.007 |
| 211.92 | 12.70 | 12.700 | 0.0010 | 12.701 |

=====

C1 = 13.1732 C2 = -7.752618

| (I) | GG(I) | CC(I) |
|-----|-------------|-------------|
| 0 | -945.62E-03 | -707.43E+01 |
| 1 | 333.35E-03 | 218.79E+00 |
| 2 | -183.78E-04 | -268.17E-02 |
| 3 | 352.16E-06 | 162.74E-04 |
| 4 | -304.19E-08 | -488.70E-07 |
| 5 | 100.34E-10 | 580.76E-10 |

=====

VALORES INTERPOLADOS POR MODELO GENERAL DE ANDRADE

=====

| TEMPERATURA [oC] | VISCOSIDAD [cp] |
|---------------------|--------------------|
| 28.1 | 10.00 |
| 35.0 | 9.83 |
| 49.0 | 9.24 |
| 60.0 | 8.92 |
| 71.0 | 8.74 |
| 81.0 | 8.65 |
| 93.0 | 8.75 |
| 103.0 | 9.41 |
| 120.0 | 9.97 |
| 129.0 | 13.27 |
| 148.0 | 13.85 |
| 171.0 | 16.26 |
| 195.0 | 15.52 |
| 206.0 | 13.23 |
| 211.0 | 12.71 |

=====

MODELO DE ANDRADE AJUSTADO CON LAGRANGE

LODO NO. 4

=====

| TEMP [oC] | VISAE [cp] | VISA [cp] | DIFVIS [cp] | VISAT [cp] |
|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| 25.00 | 23.50 | 23.500 | 0.0000 | 23.500 |
| 30.00 | 22.00 | 16.772 | 5.2278 | 22.000 |
| 40.00 | 20.00 | 11.003 | 8.9974 | 20.000 |
| 60.00 | 16.00 | 7.218 | 8.7823 | 16.000 |
| 80.00 | 12.20 | 5.846 | 6.3543 | 12.200 |
| 100.00 | 10.50 | 5.151 | 5.3490 | 10.500 |
| 120.00 | 8.50 | 4.735 | 3.7659 | 8.501 |
| 140.00 | 7.20 | 4.458 | 2.7418 | 7.200 |
| 160.00 | 6.10 | 4.261 | 1.8380 | 6.099 |
| 180.00 | 4.85 | 4.114 | 0.7332 | 4.847 |
| 190.00 | 4.43 | 4.054 | 0.3737 | 4.427 |
| 200.00 | 4.00 | 4.000 | -0.0042 | 3.996 |

=====

C1 = 3.106002 C2 = 50.5916

| (I) | GG(I) | CC(I) |
|-----|-------------|-------------|
| 0 | -130.62E+00 | 128.78E+01 |
| 1 | 114.78E-01 | -405.12E-01 |
| 2 | -371.72E-03 | 507.48E-03 |
| 3 | 594.69E-05 | -315.25E-05 |
| 4 | -469.85E-07 | 970.26E-08 |
| 5 | 145.69E-09 | -118.40E-10 |

=====

VALORES INTERPOLADOS POR MODELO GENERAL DE ANDRADE

=====

| TEMPERATURA [oC] | VISCOSIDAD [cp] |
|---------------------|--------------------|
| 27.0 | 22.71 |
| 35.0 | 21.06 |
| 47.0 | 18.41 |
| 58.0 | 16.32 |
| 69.0 | 14.56 |
| 83.0 | 11.44 |
| 100.0 | 10.50 |
| 114.0 | 9.58 |
| 129.0 | 7.70 |
| 151.0 | 6.66 |
| 170.0 | 5.43 |
| 183.0 | 4.71 |
| 195.0 | 4.23 |

=====

=====

MODELO DE ANDRADE AJUSTADO CON LAGRANGE

LODO NO. 4

=====

| TEMP [oC] | VISAE [cp] | VISA [cp] | DIFVIS [cp] | VISAT [cp] |
|--------------|---------------|--------------|----------------|---------------|
| 25.00 | 23.50 | 23.500 | 0.0000 | 23.500 |
| 30.00 | 0.00 | 20.965 | 0.0000 | 20.965 |
| 40.00 | 0.00 | 19.254 | 0.0000 | 19.254 |
| 60.00 | 0.00 | 13.737 | 0.0000 | 13.737 |
| 80.00 | 0.00 | 10.372 | 0.0000 | 10.372 |
| 100.00 | 0.00 | 8.475 | 0.0000 | 8.475 |
| 120.00 | 0.00 | 7.179 | 0.0000 | 7.179 |
| 140.00 | 0.00 | 6.184 | 0.0000 | 6.184 |
| 160.00 | 0.00 | 5.361 | 0.0000 | 5.361 |
| 180.00 | 0.00 | 4.645 | 0.0000 | 4.645 |
| 190.00 | 0.00 | 4.315 | 0.0000 | 4.315 |
| 200.00 | 4.00 | 4.000 | 0.0000 | 4.000 |

=====

C1 = 3.106002 C2 = 50.5916

TMO = 45 VPM = 1

=====

VALORES INTERPOLADOS POR MODELO GENERAL DE ANDRADE

=====

| TEMPERATURA [oC] | VISCOSIDAD [cp] |
|---------------------|--------------------|
| 27.0 | 22.25 |
| 35.0 | 19.77 |
| 47.0 | 18.11 |
| 58.0 | 14.24 |
| 69.0 | 11.93 |
| 83.0 | 10.03 |
| 100.0 | 8.47 |
| 114.0 | 7.53 |
| 129.0 | 6.70 |
| 151.0 | 5.71 |
| 170.0 | 4.99 |
| 183.0 | 4.54 |
| 195.0 | 4.16 |

=====

CAPITULO V

DISCUSION DE RESULTADOS

TEMAS CONTENIDOS EN EL CAPITULO:

- . Observaciones al Programa de Cómputo
- . Validación del Programa de Cómputo
- . Alternativas al Programa de Cómputo
- . Aplicaciones del Programa de Cómputo

V.1 Observaciones al Programa de Cómputo

Las observaciones generales a cada una de las opciones del menú de trabajo están hechas en base a los resultados arrojados por el programa de cómputo y básicamente se le dará un enfoque cualitativo.

Para cada una de las corridas del programa de cómputo se consideró conveniente incluir a las velocidades del viscosímetro rotacional Fann: 600, 300, 200, 100, 6, 3 rpm y hacerlas comunes a cada modelo para tener de esta manera un nivel de comparación adecuado, excepto el último modelo ya que se varió la temperatura.

El modelo de Newton si se analiza de una manera global se puede decir que su aplicación a lodos de perforación es inadecuado ya que éste tiene un comportamiento no Newtoniano, pero si se observa de una manera puntual los resultados arrojados serán bastante precisos. Lo anterior se puede explicar fácilmente si se considera que se está obteniendo la derivada del esfuerzo de corte con respecto a la velocidad de corte y la viscosidad viene a representar la pendiente de la recta en el punto de interés.

En cuanto a los resultados de los lodos 1 y 2 se puede decir que la velocidad de corte es proporcional al esfuerzo de corte, observándose que a una velocidad de corte máxima correspondió una viscosidad mínima, mientras que a una velocidad de corte mínima no correspondió una viscosidad mínima única. Lo anterior es debido a la naturaleza del fluido y por ende a su comportamiento reológico.

En el método de Mínimos Cuadrados se observó que al incluir bajas velocidades de corte como son 6 y 3 rpm ocasionan desviaciones graves en los valores de la pendiente de la recta y modificando consecuentemente la ordenada al origen. Lo anterior se debe a que en menor o mayor grado se conserva la estructura gel del lodo de perforación. Por ello se recomienda emplear altas

velocidades de corte, donde dicha estructura ha desaparecido. Los mejores resultados fueron obtenidos aplicando las lecturas de 600 y 300 rpm.

Al comparar resultados se observa que las lecturas Fann y la viscosidad plástica en el lodo 2 son mayores que en el lodo 1, lo que indica que el contenido de sólidos es mayor en dicha muestra y seguramente tiene mayor densidad.

Otra observación a considerar es que los parámetros que tienen valores pequeños (menores que la unidad) las estimaciones son más susceptibles de cometer errores, más aún si se están empleando operaciones logarítmicas, como es el caso del índice de comportamiento de flujo y del índice de consistencia. Este último fue el que presentó mayor desviación respecto a los otros parámetros.

El modelo de Ley de Potencia Modificada verifica la tendencia en los valores de los índices reológicos calculados en el método anterior, lo cual indica que se está trabajando con fluidos pseudoplásticos, característico en sistemas base agua y soluciones poliméricas.

En la predicción de las lecturas Fann se observó una buena estimación a velocidades de corte altas, deteriorándose la predicción a bajas velocidades, especialmente a la velocidad de 3 rpm. Se recomienda su uso para fluidos de perforación de mediana densidad.

En lo que respecta al modelo de Casson en cuanto a la predicción de viscosidades se observó que a velocidades de corte Fann altas (600, 300, 200, 100 rpm) la estimación es precisa, mientras que a velocidades de corte bajas (6, 3 rpm) los valores tienden a dispararse en forma alarmante.

En cuanto a la predicción de la viscosidad en la barrena se puede decir que el valor es muy alto y la viscosidad obtenida a una velocidad equivalente de $100,000 \text{ seg}^{-1}$ también es mala.

En las predicciones de las lecturas teóricas Fann se

observaron resultados aceptables a altas velocidades de corte, pero a velocidades de corte bajas los valores tienden a dispararse dramáticamente. Lo anterior puede ser explicado si se considera que el modelo fue diseñado para el manejo de velocidades de corte Fann altas.

El modelo de Metzner and Reed al emplear la información de los lodos 1 y 2 se obtuvieron predicciones mucho muy aceptables al estimar las viscosidades y lecturas teóricas Fann. En general para estas últimas especialmente por las bajas velocidades de corte fue necesario introducir en el programa de cómputo una variable entera para el manejo de los cálculos correspondientes, lo que vino a reducir el error en las mismas. Si se desea conocer el gel inicial, es posible obtener una buena aproximación con la lectura teórica de 3 rpm, obviamente es probable que haya cierto error debido a que no se está considerando la variable tiempo.

Por lo anteriormente expuesto se recomienda utilizar el presente modelo al requerir alguna lectura Fann específica para lodos base agua de baja y mediana densidad. Si se utilizan lodos con elevado contenido de sólidos el error de estimación será mayor.

Los modelos 3, 4 y 5 tienen la opción de utilizar a la subrutina VISPT, para ello se requiere de la determinación de los denominadores exponenciales D1 y D2. Como se explicó anteriormente es posible hacerlo resolviendo un sistema de ecuaciones generado a partir de condiciones iniciales y finales de viscosidad y temperatura. Los referencias consultadas que alimentaron tales modelos varían exclusivamente las velocidades de corte, siendo vital también la variación de temperaturas. Por ello no fue posible determinar numéricamente los denominadores exponenciales para los datos requeridos. Dada tal situación se consideró conveniente utilizar información de la referencia del lodo 4, donde se varía la temperatura pero no las velocidades de corte. En

primer término se sustituyeron valores en la ecuación de viscosidad para corregirla por temperatura y presión. Al resolver el sistema de ecuaciones se verificó pero sólo puntualmente, las predicciones a diferentes condiciones dieron resultados nada alagadores. Debido a lo anterior se propone determinar los mismos por ensaye y error; como consideraciones generales se tiene que:

- D1 y D2 son números positivos
- D2 es mayor que D1

Las primeras dos corridas hechas en el modelo de Andrade son los casos en que los lodos 3 y 4 cuentan con información reológica disponible.

En el caso del lodo 3 se observa que el comportamiento reológico del fluido no es un comportamiento típico, pues la viscosidad presenta hasta tres cambios de concavidad al ir aumentando la temperatura. A partir de cierto valor la temperatura tiende a estabilizarse presentandose un proceso isotérmico, aunado a ello no hay variación en la presión, composición y velocidad de corte; sin embargo se observan cambios en la viscosidad, de donde se concluye que la variación es provocada por la variable tiempo.

En general si se presenta el caso en que cualquiera de las dos variables reológicas permanezcan constantes entonces el método no es aplicable, más aún el método no permite que ambas variables se incrementen y decrezcan, la opción es que alguna de las dos deba ser ascendente, mientras que la otra puede presentar variación alternante.

En cuanto a las estimaciones de viscosidades totales de Andrade se observaron resultados muy satisfactorios al ser comparados con la información experimental, mientras que los valores interpolados se encuentran dentro de los rangos requeridos.

Los datos de entrada del lodo 4 respetan el comportamiento reológico típico, donde se observó que las viscosidades teóricas son menores o iguales que las viscosidades experimentales.

También se observaron muy buenas estimaciones en las viscosidades totales de Andrade así como en las viscosidades interpoladas.

El tratamiento de datos se hizo de acuerdo a la complejidad del reograma, para el lodo 3 en primer termino se digitizó éste por concavidades, incluyendo a los puntos críticos como son los máximos y mínimos, tanto relativos como absolutos, así como los puntos de inflexión. Para el lodo 4 no hubo ningún problema pues los datos siguieron el comportamiento esperado y lo único que se tuvo que hacer fue leer diversos puntos del reograma y dividir el comportamiento en dos partes iguales.

Si al interpolar alguna temperatura el valor de viscosidad obtenido queda fuera de rango, entonces el modelo se puede ajustar digitizando un mayor número de datos en el intervalo de interés y / o variando alguno de los puntos leídos con anterioridad, (dicha situación aconteció en la corrida de los datos del lodo 3 y se le dió la solución respectiva).

Si se requieren interpolar valores entre las dos series de datos, lo mejor fue usar el polinomio de ajuste de la serie de datos dos, pero si los resultados no fuerán satisfactorios será necesario forzar a que el valor final de la serie de datos uno sea igual al valor inicial de la serie de datos dos.

Al efectuar la tercera corrida en el modelo de Andrade se hizo con la información mínima requerida del lodo 4 ya que como se mencionó anteriormente al incrementar la temperatura se observó una disminución en la viscosidad. La información arrojada por el programa (sin ajuste) fue comparada con los resultados arrojados por el modelo al ser respaldado con información experimental del mismo lodo. Se recomienda que a cada temperatura se calcule el error relativo correspondiente a cada viscosidad, con ello fue posible determinar a la vez el máximo error (VPM) cometido por el modelo al estimar la viscosidad a la temperatura correspondiente (TMD). Al correr el modelo y al hacer el ajuste de datos se observa que los resultados no fueron corregidos en la magnitud

esperada, posiblemente por no tratarse de una función lineal. Por tal razón el primer valor (VPM) representará una aproximación a la solución y deberá variarse hasta encontrar el mejor ajuste.

Para distinguir la presentación de resultados cuando el modelo es corrido con la mínima información reológica requerida se observará lo siguiente:

- . La columna VISAE presenta únicamente el valor inicial y final de viscosidad, los valores intermedios son nulos.
- . La columna DIFVIS está constituida por valores nulos.
- . La columna VISA y VISAT son iguales y con valores diferentes de cero.

V.2 Validación del Programa de Cómputo

En el análisis cuantitativo de los resultados arrojados por cada opción del menú principal del programa de cómputo, son presentados los errores porcentuales correspondientes. Dichos errores se decidió determinarlos aplicando el criterio de media geométrica ponderada, ya que es un valor promedio más real que la media aritmética, J. O. Andria²¹.

Lo anterior fue posible hacerlo al comparar la información reológica experimental disponible de cada una de las referencias consultadas.

El estudio se inició con respaldo en el artículo técnico de S.S Okrajni and J.J Azar²⁸ el cual tiene los datos que representan al lodo 1.

Como se puede observar el primer bloque de información no incluye al método de mínimos cuadrados ya que no calcula ninguna viscosidad efectiva ni tampoco alguna lectura teórica Fann. Cabe señalar que en el segundo bloque de información los índices reológicos de los modelos Ley de Potencia Modificada y Metzner and Reed utilizan parámetros equivalentes pero estrictamente son diferentes.

LODO 1

| Opción del menú | Error μ | Error θ |
|----------------------------|-------------|----------------|
| Modelo de Newton | 0.05 % | -- |
| Ley de Potencia Modificada | 3.42 % | 4.86 % |
| Modelo de Casson | 8.14 % | 8.31 % |
| Metzner and Reed | 4.59 % | 0.00 % |

| Opción del menú | Error K | Error n | Error Yp | Error μ_p |
|------------------------|---------|---------|----------|---------------|
| Mínimos Cuadrados | 17.2 % | 0.0 % | 0.0 % | 0.0 % |
| Ley de Potencia Modif. | 38.5 % | 7.9 % | -- | -- |
| Metzner and Reed | 6.3 % | 0.0 % | -- | -- |

En el análisis del lodo 2 se consultó la Ref.⁵ donde es posible comparar viscosidades y velocidades de corte Fann, así como las viscosidades en el espacio anular y en la barrena. En el mencionado artículo no se determinan los parámetros reológicos manejados en el método de Mínimos Cuadrados por ello no se incluye este último, pero con los porcentajes obtenidos del lodo 1 se puede tener una buena idea acerca de la predicción en las estimaciones de los parámetros reológicos antes mencionados.

LODO 2

| Opción del menú | Error μ | Error θ | Error μ_{EA} | Error μ_B |
|------------------------|-------------|----------------|------------------|---------------|
| Modelo de Newton | 0.0 % | -- | -- | -- |
| Ley de Potencia Modif. | 1.2 % | 1.6 % | 4.3 % | 2 % |
| Modelo de Casson | 8.9 % | 10.5 % | 8.6 % | 296 % |
| Metzner and Reed | 4.6 % | 2.6 % | 1.6 % | 0 % |

En cuanto al modelo de Andrade se observa que se cumplen perfectamente los valores estimados para aquellas corridas que fueron respaldadas con información reológica.

En la corrida hecha con datos del lodo 3 éstos tuvieron que ser digitizados del reograma de la referencia Bottai A. et al.¹⁰; las estimaciones hechas por el modelo al correr el programa de cómputo verifican los datos de entrada, observándose un error máximo del 0.01 %, lo que indica que prácticamente no hay error.

Para el lodo 4 se consultó la referencia T. J. Bailey et al.²⁰ también se efectuaron las lecturas de datos correspondientes en el reograma. La corrida del modelo con respaldo de información reológica completa arrojó muy buenos resultados, pues el error porcentual fue del orden de 0.1 %.

En la segunda corrida del programa (auto-ajuste) con la mínima información requerida por el programa, al tratar el lodo 4 se encontró lo siguiente:

- Error % mínimo: 0.0 %
- Error % máximo: 19.28 %
- Error geométrico: 5.98 %
- Error aritmético: 8.79 %

Al correr el modelo bajo las mismas condiciones anteriores del lodo 4 sin efectuar auto-ajuste se observaron estimaciones no muy precisas:

- Error aritmético: 33.85 %
- Error geométrico: 37.96 %

Comparando estas dos últimas corridas se detecta una diferencia contrastante en los resultados, de ahí la necesidad de efectuar un auto-ajuste al hacer la corrida.

Como puede observarse entre los modelos que manejan a la velocidad de corte se puede afirmar que el modelo más completo que estima y predice resultados es el de Metzner and Reed, este

Último se recomienda aplicarlo especialmente a todos base agua de baja densidad (no densificados), en tanto que el modelo Ley de Potencia Modificada deberá aplicarse a todos base agua de mediana densidad.

En general y a excepción del modelo de Casson se puede decir que el programa de cómputo ha sido validado, pues la diferencia entre valores estimados y experimentales ha sido satisfactoria.

Como comentario adicional se puede decir que la validación del programa a nivel artículo técnico es buena pero estrictamente debería verificarse a nivel campo, esto se hace extensivo a todos y cada uno de los métodos y modelos reológicos propuestos.

V.3 Alternativas al Programa de Cómputo

Los resultados obtenidos por cada una de las opciones de estudio dependen directamente de la información con que van a ser alimentadas cada una de ellas. Como se ha observado hasta este momento para aquellos modelos que emplean velocidades de corte es fundamental el uso de las dos lecturas básicas Fann.

Haciendo referencia a lo anterior se ha observado que no son pocos los artículos técnicos que cuentan con buena información reológica tal como: viscosidad plástica, viscosidad aparente y punto de cedencia entre otros. Pero no proporcionan ninguna lectura Fann, por tal motivo no es posible acceder al programa de cómputo a ninguna de las opciones.

Para poder correr el programa de cómputo se propone utilizar el modelo de Bingham y hacer un planteamiento inverso a lo que habitualmente se hace. Quedando las siguientes alternativas para la determinación de las lecturas básicas Fann:

$$\theta_{300} = \gamma_p + \mu_p$$

$$\theta_{600} = 2 \mu_p + \gamma_p$$

$$\theta_{600} = 2 \mu_a$$

Donde:

$$\gamma_p \quad [\text{lbf}/100 \text{ pie}^2]$$

$$\mu_p, \mu_a \quad [\text{cp}]$$

$$\theta \quad [\text{grados}]$$

En primera instancia se tendrá la posibilidad de calcular las constantes características de cada modelo, las viscosidades y lecturas teóricas Fann a diferentes velocidades de corte.

Se podrán comparar los datos de entrada y salida del programa cómputo para verificar la precisión de cada opción.

V.4 Aplicaciones del Programa de Cómputo

El programa de cómputo es una herramienta que sirve para la determinación rápida de propiedades y parámetros reológicos característicos de cada lodo de estudio. Entre sus funciones está el servir de apoyo en el cálculo al ejecutar operaciones prácticas de campo.

El primer paso será alimentar al programa de cómputo con información del lodo con que se estén efectuando las operaciones de perforación, tanto a la entrada como a la salida del mismo.

Con ello será posible llevar un registro de los parámetros reológicos más importantes a diferentes tiempos, además será posible detectar los cambios y variaciones que sufra el lodo de perforación. Claro está que habrá que determinar la causa del problema y darle su respectiva solución.

También se está en la posibilidad de hacer predicciones de la viscosidad en el sistema de circulación al hacer diferentes operaciones de campo como por ejemplo al efectuar cementaciones de tuberías y circulación del lodo. Para cada caso se estaría circulando el fluido de perforación a diferentes condiciones de flujo. Por ende forzosamente tiene que haber un cambio en alguna de las propiedades reológicas del fluido "in - situ". Claro está que al querer hacer la predicción habrá que alimentar al programa con las nuevas condiciones existentes, en particular modificar a la velocidad de corte.

No hay que perder de vista que los datos que alimentan al programa de cómputo han sido obtenidos con el uso de un viscosímetro rotacional, ésto a nivel laboratorio, con el propósito de simular las condiciones existentes de perforación en el pozo.

Una comparación importante de lo que sucede en laboratorio y en el campo es que en el primero se varían velocidades de corte definidas para la obtención de lecturas Fann y a partir de ellas calcular las viscosidades correspondientes. En el segundo caso la

velocidad de corte quedará definida a partir de la geometría del pozo y del gasto proporcionado por la bomba.

Ambos casos pueden ser considerados con la aplicación del análisis gráfico el cual fue explicado en el subcapítulo 3.4.2 y con la aplicación del programa de cómputo.

Con lo expuesto anteriormente es posible establecer una relación más directa entre la información de laboratorio y la de campo, así como la estimación con mayor precisión de las propiedades y parámetros reológicos medidos a condiciones de flujo más reales. Si se desea consultar las relaciones existentes entre las ecuaciones que rigen el flujo en un viscosímetro de cilindros coaxiales y una tubería cilíndrica recta puede verificarse Ref.²⁵.

Una aplicación importante que no hay que olvidar es la determinación de la viscosidad en el espacio anular y en la barrena, indicativos de la limpieza en el fondo del agujero y de los valores de penetración, en forma respectiva.

El contar con la viscosidad "in-situ" en cualquier punto del sistema de circulación es una información muy valiosa ya que ayudaría en los cálculos que se efectúan para determinar las caídas de presión en las tuberías en un sistema de circulación al efectuar el diseño hidráulico correspondiente.

Obviamente para ello sería necesario involucrar puntos tales como:

- . Número de Reynolds
 - . Factor de fricción de Fanning
 - . Tipo de flujo: laminar, turbulento, zona de transición, flujo en el interior de la tubería y por espacio anular.
- Involucrar cada uno de estos puntos queda fuera del alcance de este trabajo debido a su extensión.

En cuanto a la variable temperatura el programa de cómputo puede encontrar la viscosidad del lodo a cualquier profundidad de interés. Conociendo el gradiente de temperatura del yacimiento y contando con la información de laboratorio necesaria.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

La importancia del programa de cómputo desarrollado radica en el cálculo directo de parámetros y propiedades reológico-tixotrópicas básicas, que caracterizan a un lodo de perforación, permitiendo definir la viscosidad plástica, viscosidades efectivas de circulación, punto de cedencia, aproximación al gel inicial, tipo de comportamiento reológico y lecturas teóricas Fann, a diferentes velocidades de corte requeridas. Así como la determinación de las constantes de cada uno de los métodos y modelos reológicos empleados en el programa de cómputo. Con ello se estará contando con un modelo matemático definido que permita predecir las propiedades y el comportamiento reológico de un fluido de perforación en particular.

De acuerdo a los datos bibliográficos se pudo verificar la viabilidad del programa de cómputo para predecir viscosidades y esfuerzos de corte en lodos base agua de baja densidad y mínimo contenido de sólidos. Donde los modelos de Metzner and Reed y Ley de Potencia Modificada mostraron los mejores resultados con errores del orden de 2.11 y 2.86 % respectivamente.

Dentro de las aplicaciones prácticas del programa de cómputo se encuentra el cálculo de la viscosidad del fluido "in-situ" en cualquier parte del sistema de circulación a condiciones de flujo, pudiendo involucrarse la geometría del pozo y la presión de bombeo con que se esté trabajando. Con ello es posible optimizar diseños de programas hidráulicos y la determinación de las caídas de presión en el sistema de circulación con el fin de reducirlas al mínimo.

También se da la posibilidad de corregir dichas viscosidades por efectos de temperatura y presión, mediante la subrutina VISPT, bajo la consideración que la viscosidad decrece al aumentar la temperatura y se incrementa al aumentar la presión. La validación de esta subrutina fue hecha sólo parcialmente, debido a la poca

disponibilidad de información reológica, que involucre altas temperaturas y variación de presión. Por tal motivo su uso queda limitado a dicha información, y será necesario reproducir las condiciones existentes al perforar un yacimiento geotérmico.

De ahí la importancia de tener un control adecuado en las propiedades reológicas y tixotrópicas de un lodo de perforación pues permitirá que éste cumpla eficientemente sus funciones y simultáneamente reducir costos y tiempo, tanto de tratamiento como de perforación.

N O M E N C L A T U R A

| SÍMBOLO | SIGNIFICADO | DIMENSIONES |
|-----------------|---|------------------------------------|
| Å | Angström | [L] |
| ADT | análisis diferencial térmico | |
| AM | acrilomida | |
| c | concentración (lb/bl) | [%] |
| C | compresibilidad (lbr/pg ²) ⁻¹ | [L ² /F] |
| °C | grados Celcius o centígrados | [°T] |
| d1 | deformación elástica | [adim] |
| D | gradiente de velocidad (1/seg) | [1/t] |
| D1 | denominador exponencial de temperatura | [adim] |
| D2 | denominador exponencial de presión | [adim] |
| Dh | diámetro del agujero (pg) | [L] |
| Dn | diámetro de las toberas (pg) | [L] |
| E | módulo de elasticidad (lbr/pie ²) | [F/L ²] |
| Ev | actividad de energía (kcal) | [FL] |
| e _r | energía de ruptura (kcal) | [FL] |
| e _s | energía al punto de fusión (kcal) | [FL] |
| F _μ | fuerza viscosa (lbr) | [F] |
| F _b | fuerza de flotación (lbr) | [F] |
| F _I | fuerza de inercia (lbr) | [F] |
| f | frecuencia de esfuerzo (ciclos/seg) | [1/t] |
| °F | grados farengheit | [°T] |
| g _c | constante gravitacional (lbm pie/lbrseg ²) | [ML/Ft ²] |
| G | módulo de corte (lbr/100pie ²) | [F/L ²] |
| G [*] | módulo complejo (dina/cm ²) | [F/L ²] |
| G ['] | módulo de elasticidad (dina/cm ²) | [F/L ²] |
| G ^{''} | módulo de viscosidad (dina/cm ²) | [F/L ²] |
| l | longitud (pie) | [L] |
| K | índice de consistencia (lbr-sec ⁿ /pie ²) | [Ft ⁿ /L ²] |
| K ['] | parámetro de Metzner-Reed (lbr-sec ⁿ /pie ²) | [Ft ⁿ /L ²] |
| K _o | factor preexponencial (lbr-sec ⁿ /pie ²) | [Ft ⁿ /L ²] |

| | | |
|--------------------|--|------------------------------------|
| k | constante de Boltzman (kcal/ °C) | [FL/ °T] |
| M | peso molecular (lbm/lbmol) | [M/Mmol] |
| n | índice de comportamiento reológico | [adim] |
| n' | parámetro de Metzner and Reed | [adim] |
| N _R | número de Reynolds | [adim] |
| P | presión (lbr/pg ²) | [F/L ²] |
| pH | potencial hidrógeno | [adim] |
| q _m | ritmo de calor en la mezcla (kcal) | [FL] |
| Q _{bomb} | gasto de la bomba (bl/min) | [L ³ /t] |
| RP | relación de Poisson | [adim] |
| R | constante universal de los gases | [FL/°T] |
| ssu | segundos Saybolt universal | [t] |
| T | temperatura (°F, °C) | [°T] |
| T _f | temperatura de fusión (°F, °C) | [°T] |
| t | tiempo (seg) | [t] |
| V _{EA} | velocidad anular (pie/min) | [L/t] |
| V _n | velocidad en las toberas (pie/seg) | [L/t] |
| V _{bomba} | volumen (bl/min) | [L ³ /t] |
| YP | punto de cedencia (lbr/100pie ²) | [F/L ²] |
| Yp' | punto de cedencia logarítmico | [Ft ⁿ /L ²] |
| β | relación de radios | [adim] |
| Δ | indicativo de cambio (incremento, decremento) | |
| ΔE | energía de flujo (kcal) | [FL] |
| ΔP | caída de presión (lbr/pg ²) | [F/L ²] |
| ρ | densidad (gr _m /cm ³) | [M/L ³] |
| γ | velocidad de corte (1/seg, rpm) | [1/t] |
| ⊥ | indicativo de perpendicularidad | |
| μ | coeficiente de viscosidad (cp) | [Ft/L ²] |
| μ _a | viscosidad aparente (cp) | [Ft/L ²] |
| μ _B | viscosidad en la barrena (cp) | [Ft/L ²] |
| μ _{EA} | viscosidad anular (cp) | [Ft/L ²] |
| μ _m | viscosidad de la mezcla (cp) | [Ft/L ²] |
| μ _p | viscosidad plástica (cp) | [Ft/L ²] |

| | | |
|----------------|---|----------------------|
| μ_{∞} | viscosidad infinita de Casson (cp) | [Ft/L ²] |
| ν | viscosidad cinemática (cstoke) | [L ² /t] |
| ν_m | viscosidad cinemática de mezcla (cstoke) | [L ² /t] |
| λ | tiempo de relajación (seg) | [t] |
| σ | esfuerzo (lbr/pg ²) | [F/L ²] |
| τ | esfuerzo de corte (lbr/100pg ²) | [F/L ²] |
| τ_0 | tensión original (lbr/100pg ²) | [F/L ²] |
| τ_{oc} | punto de cedencia de Casson (lbr/100pg ²) | [F/L ²] |
| ϕ | diámetro (micrones) | [L] |
| θ | lectura Fann (grados) | [adim] |

Nota:

F = fuerza. L = longitud. t = tiempo. M = masa. °T = temperatura

VOCABULARIO REOLOGICO

A continuación se presenta un listado de las palabras de mayor uso dentro de la rama de la reología, que pueden servir como una guía para este trabajo escrito, así como para efectuar cualquier consulta al tratar artículos reológicos. Se incluyen algunos términos de uso frecuente en inglés. Si se desea mayor información al respecto se pueden consultar las referencias J. Harris¹² y D. F. Tver and Berry²⁴.

ACIDO

Cualquier componente químico que contenga hidrógeno y sea capaz de ser reemplazado por elementos positivos o radicales para formar sales. Es un componente que en disociación en una solución produce un exceso de iones hidrógeno.

ADELGAZAMIENTO AL CORTE (shear thinning)

Es una reducción temporal de la viscosidad al verse sometida a un incremento de la velocidad de corte en flujo estacionario.

ADELGAZANTE (thinner)

Cualquiera de varios agentes orgánicos e inorgánicos, dentro de los primeros se tienen a los taninos, lignitos y lignosulfonatos, mientras que en los segundos se encuentran los pirofosfatos, tetrafosfatos, que son añadidos al fluido de perforación para controlar sus propiedades reológicas y tixotrópicas.

AGAR

Producto gelatinoso extraído de ciertas algas rojas, utilizado fundamentalmente como agente gelificante.

ANISOTROPICO

No tiene las mismas propiedades en todas las direcciones

BASE

Un metal con hidrógeno y oxígeno en proporción para formar un

radical OH ionizado en una solución acuosa para producir un exceso de iones hidroxilo.

COEFICIENTE DE VISCOSIDAD

El valor constante y único de la relación de esfuerzo de corte y la velocidad de corte para flujo estacionario, característico del comportamiento del fluido de Newton.

COLOIDE

Es un estado de subdivisión de materia que consiste de la agregación de pequeñas moléculas físicamente dispersas, en una fase continua al grado que las fuerzas superficiales llegan a ser un factor importante en la determinación de sus propiedades. El tamaño de partículas es menor que 0.1 micrones. El tamaño y la carga eléctrica de las partículas determinan los diferentes fenómenos observados en el coloide, como en el movimiento Browniano un coloide es intermedio entre una suspensión física y una solución química; mostrando propiedades de cada una de ellas.

COMPORTAMIENTO ELASTICO IDEAL

El aquel comportamiento elástico que no presenta histéresis.

COMPRESIBILIDAD

Es la disminución del volumen relativo, causado por un incremento de presión. Es el recíproco del módulo volumétrico.

CUERPO FALSO

Aquel material que presenta un comportamiento pseudoplástico o tixotrópico.

DEFORMACION (strain)

Es el cambio de forma de un cuerpo, pudiendo ser en longitud, área o volumen. Ocasionada por un esfuerzo aplicado al mismo. La medición de la deformación relativa respecto a la configuración de referencia.

DEFORMACION AL CORTE (Shear strain)

El cambio de forma debido a un esfuerzo de corte; conocido también como shear.

DEFORMACION IRREVERSIBLE

Corresponde a la transformación de la energía mecánica en

calor. El trabajo empleado en mantener el flujo es disipado como calor y no es mecánicamente recuperable.

DEFORMACION PLASTICA (strain plastic)

Desde un punto de vista de estado sólido es la ruptura o fractura de un material.

DEFORMACION RESIDUAL

Es una deformación retenida después de remover un esfuerzo externo.

DEFORMACION REVERSIBLE

La energía mecánica es recuperable, el cuerpo vuelve a su estado original. Es recuperable el trabajo empleado en la deformación de un cuerpo perfectamente elástico.

DISOCIACION

La división o separación de un componente o elemento en dos o más moléculas, átomos o iones simples, aplicando usualmente el efecto de la acción del calor, solventes, o sustancias disolventes. La reacción puede ser reversible o no tan permanente como la descomposición; cuando el solvente es removido los iones pueden recombinarse.

DISPERSION

Suspensión permanente de partículas finamente divididas, indisolubles en el fluido.

ECUACION CONSTITUTIVA

(Ecuación reológica de estado) es la ecuación que relaciona al esfuerzo de corte, deformación, tiempo y otras variables tales como presión y temperatura.

ECUACIONES DE NAVIER STOKES

Son las ecuaciones de movimiento del modelo del fluido de Newton, que describen el balance de las fuerzas de inercia, de presión, viscosas y cualquier tipo de fuerzas interactuantes en cuerpos.

ELASTICIDAD

Es una propiedad característica de los sólidos; cuando el esfuerzo es removido, el sólido regresa a su volumen y forma

original. Es un comportamiento reversible esfuerzo - deformación.

ELASTICIDAD DE VOLUMEN

Es la respuesta elástica a cambios de volumen debido a un esfuerzo aplicado.

ELASTICIDAD RETARDADA

Es una deformación reversible dependiente del tiempo, la cual no es manifestada al instante de aplicar un esfuerzo.

ELECTROLITO

Una disociación en una sustancia de iones positivos y negativos en solución, capaces de conducir una corriente eléctrica. Los electrolitos comunes son: ácidos, bases y sales.

ENERGIA DE DEFORMACION (strain energy)

Es la energía almacenada en un material por efecto de la deformación.

ESFUERZO

Es una fuerza aplicada por unidad de área; no es una presión.

ESFUERZO CORTANTE (shear stress)

Es un esfuerzo tangencial, la componente de esfuerzo paralelo a la tangente del área considerada.

FACTOR DE FRICCIÓN

En el flujo a través de una tubería, es el esfuerzo de corte dividido por la energía cinética del flujo por unidad de volumen.

En flujo laminar $f = 64 / NR$ se relaciona el radio hidráulico de la tubería. El factor de fricción en este caso es independiente de la rugosidad de la tubería.

El factor de fricción de fanning esta definido por:

$f = 16 / NR$ relaciona el radio de la tubería.

En flujo turbulento el factor de fricción depende muy poco del NR, pero fuertemente de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería.

FASE DISPERSA

Fase (sólido, líquido, gas) distribuída en forma uniforme en una dispersión, las partículas están completamente rodeadas por la fase continua.

FLUIDO

Toda sustancia que se deforma al ser sometida a esfuerzo de corte. Indistintamente de que sea un líquido o gas.

FLUIDO IDEAL

Un líquido idealizado es aquel que es incompresible y no viscoso.

FLUJO

Desplazamiento volumétrico por unidad de tiempo (para fluidos), o una deformación plástica (para sólidos), donde ninguna partícula tiende a recuperar su posición original.

FLUJO LAMINAR

Es aquel flujo sin turbulencia.

FLUJO NO NEWTONIANO

Cualquier flujo laminar que no es caracterizado por las ecuaciones de Navier Stokes.

FLUJO COUETTE

Flujo de corte en el espacio anular entre dos cilindros coaxiales en rotación relativa.

FLUJO ESTACIONARIO

Un flujo en que la velocidad en cada punto no varía con el tiempo

FLUJO PLASTICO

Un flujo arriba del punto de cedencia

FLUJO POISEUILLE

Flujo laminar en una tubería cuya sección transversal circular está sometido a un gradiente de presión constante.

FUNCION DE ENERGIA ALMACENADA

La energía elástica en un cuerpo expresada en términos de esfuerzo o deformación.

FUNCION RELAJACION

El esfuerzo como una función del tiempo en un sistema de deformación. (función memoria).

GEL

Un estado de suspensión coloidal en el que el esfuerzo de

corte es inferior a un valor finito para producir una deformación permanente. El gel comunmente ocurre cuando las partículas dispersas coloidales tienen una gran afinidad al medio dispersante. No se alcanza una estructura cristalizada.

GRADIENTE DE VELOCIDAD

La derivada de la velocidad de un elemento del fluido respecto a las coordenadas de espacio.

HISTERESIS

Es un proceso irreversible en el cual parte de la energía aplicada es perdida como trabajo no aprovechable, por lo que las condiciones iniciales y finales del material son diferentes.

En el campo reológico comúnmente se aplica al esfuerzo - deformación o esfuerzo - velocidad de corte.

INDICE DE VISCOSIDAD

La cantidad numérica comprendida en una escala de [0, 100] que indica la velocidad de cambio de la viscosidad con respecto a la temperatura. Un índice de 100 indica que es un aceite que no tiende a llegar a ser viscoso a baja temperatura.

INTERCAMBIO IONICO

Es un intercambio reversible de iones, entre una solución y otra solución.

ION

Es un átomo desbalanceado con un número de electrones o protones, tomados de una carga electrostática. Cuando los ácidos, bases y sales (electrólitos) son disueltos en solventes, especialmente en agua, son por lo normal en mayor o en menor grado disociados en iones cargados eléctricamente o fragmentos de moléculas cargadas, debido a la pérdida o ganancia de uno o más electrones. La pérdida de electrones da como resultado una carga positiva, produciendo un catión. Una ganancia de electrones resulta la formación de un anión con carga negativa. La valencia de un ion es igual al número de electrones ganados o perdidos.

ISOTROPICO

Se tienen las mismas propiedades en diferentes direcciones.

LIMITE ELASTICO

Es el máximo esfuerzo que posee un material (sólido) sin exhibir deformación plástica (o ruptura).

LIQUIDO

Aquella fase de materia que fluye bajo un leve esfuerzo de corte uniforme. Tiene la propiedad de adquirir la forma del recipiente que lo contiene, así como de formar una superficie libre (espejo).

LIQUIDO ELASTICO

(Líquido elásticoviscoso o elastoviscoso) es un líquido que presenta las propiedades de elasticidad y viscosidad en condiciones de corte.

MATERIAL ELASTICO PLASTICO

Es un material plástico que muestra alguna elasticidad.

MICRO-REOLOGIA

Es la reología que toma en consideración la microestructura de la materia

MODELO DEL FLUIDO DE NEWTON

Es un modelo caracterizado por un valor constante del cociente del esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

MODELO LEY DE POTENCIA

Caracterizado por una relación lineal entre el logaritmo del esfuerzo de corte y el logaritmo de la velocidad de corte en flujo de corte.

MODULO

En reología es la relación de un componente del esfuerzo a la componente de deformación.

MODULO COMPLEJO

(módulo dinámico) La representación matemática es la suma de una componente real (módulo de almacenamiento) y una componente imaginaria (módulo de pérdida).

MODULO DE CORTE

(módulo de rigidez) es la relación entre el esfuerzo de corte dividido por la correspondiente deformación de corte elástico.

MODULO ELASTICO

También llamado módulo de elasticidad de Young's se define como:

$$E = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformación elástica}} = \frac{1}{\text{complacencia}}$$

MOVIMIENTO BROWNIANO

Movimiento zigzagueante que tienen las pequeñas partículas suspendidas en el seno de un fluido, debido a la agitación térmica de las moléculas del mismo.

NUMERO DE REYNOLDS

Es el producto de una longitud típica por la velocidad representativa del fluido, dividida por la viscosidad cinemática del fluido. Expresa la relación de la fuerza de inercia a las fuerzas viscosas. Cuantitativamente es un número adimensional.

PERFIL DE VELOCIDAD

La distribución de velocidades sobre una sección transversal, normal a la dirección de flujo.

POLIMERO

Un compuesto usualmente de alto peso molecular, formado por ligaduras (enlaces) de simples moléculas o monómeros. Una sustancia en que la molécula original tendrá una ligadura para formar moléculas gigantes. Se usa a menudo como sinónimo de plástico o elastómero.

PSEUDOPLASTICIDAD

Aquel flujo de fluido cuyo corte es independiente del tiempo.

PUNTO O ESFUERZO DE CEDENCIA (yield stress)

Es el punto en la curva esfuerzo - deformación o esfuerzo - velocidad de corte, correspondiente a la transición de deformación elástica a plástica.

RADIO HIDRAULICO

El área de la sección transversal del flujo en una tubería (no necesariamente de la tubería) dividido por el perímetro

mojado.

RECUPERACIÓN

La reversión a una condición reológica inicial, normalmente al suspender el esfuerzo.

RELAJACION DE ESFUERZO

El decremento del esfuerzo con el tiempo en un material deformado.

REODESTRUCCION

(reomalaxis) es una pérdida irreversible de consistencia en el corte del material, inducida por la deformación.

REOGRAMA

Es una gráfica de cualquier relación reológica que involucre dos o más variables.

REOLOGIA

Es la ciencia que estudia la deformación de los materiales (si se trata de sólidos) y el flujo de los mismos (si se trata de fluidos) bajo un esfuerzo aplicado.

REOLOGIA CONTINUA

Trata a los materiales como un continuum, sin explicar consideraciones microestructurales. También llamada macro-reología o reología fenomenológica.

REOPEXIA

Es la aceleración de solidificación de un material por movimiento regular (velocidad de corte).

RESISTENCIA (strength)

La resistencia al flujo plástico o fractura.

SAL

Cualquier clase de componente derivado de un ácido, por reemplazamiento de todos o parte de los hidrógenos por un metal o ligaduras de metal como radical; NaHSO_4 ; NaSO_4 son sales de sodio del ácido sulfúrico H_2SO_4 .

Las sales son formadas por la acción de ácidos o metales u óxidos e hidroxidos.

SOLIDO

Es un material que no fluye al ser sometido a un esfuerzo inferior al de cedencia.

SOLUCION

La mezcla de dos o más componentes que forman una fase homogénea, puede ser sólido disuelto en líquido, líquido en líquido o gas en líquido.

SOLUTO

Sustancia disuelta en un solvente para producir una solución.

SOLVENTE

Una sustancia, usualmente un líquido capaz de absorber otro líquido, gas o sólido para formar una mezcla homogénea. Las dos propiedades más importantes de un solvente son la volatilidad y el poder del solvente. La volatilidad o la tendencia de un líquido a cambiar a vapor puede ser indicada en una prueba de destilación estándar así como la medición de la velocidad de evaporación del mismo.

TERMOPLASTICO

Un material plástico capaz de ser suave por calentamiento y endurecido por enfriamiento.

TIXOTROPIA

La habilidad de un fluido a desarrollar estructura gel con el tiempo. La propiedad del fluido originando una estructura rígida o semi-rígida (gel) al estar en condiciones estáticas, pudiendo regresar a su estado de fluidez al encontrarse en condiciones de flujo (agitación mecánica). El cambio es reversible, esta propiedad la proporciona la presencia de arcillas minerales tales como la bentonita que es altamente plástica.

Un decremento de la viscosidad aparente al ser aplicado un esfuerzo de corte, seguido por la recuperación gradual cuando el esfuerzo es removido. El efecto es dependiente del tiempo.

TURBULENCIA

Una condición de flujo en la que las componentes de la velocidad muestran variaciones aleatorias.

TURBULENCIA ESTRUCTURAL

Una turbulencia estructural inducida por las partículas en suspensión o por moléculas en solución, cuando el flujo es tangente a la dirección de la velocidad en flujo estacionario.

VELOCIDAD DE CORTE (rate shear)

El cambio de deformación de corte por unidad de tiempo.

VISCOSIDAD

Cualitativamente es la propiedad de un material a resistir el flujo con el incremento de la velocidad de deformación. Numéricamente es la cantidad de esfuerzo de corte dividido por la velocidad de corte en flujo estacionario.

VISCOSIDAD APARENTE

La relación del esfuerzo de corte y la velocidad de corte, dependiente de la velocidad de corte.

VISCOSIDAD CINEMATICA

El cociente de la viscosidad dinámica dividido por la densidad del material, ambas medidas a la misma temperatura.

VISCOSIDAD INHERENTE

Es la relación del logaritmo natural de la viscosidad relativa, dividida por la concentración del soluto o de la fase dispersa.

VISCOSIDAD INTRINSECA

El valor limitado de la viscosidad reducida como una aproximación a la concentración cero.

VISCOSIDAD PLASTICA

Para un modelo de Bingham, el exceso del esfuerzo de corte sobrepasa al punto de cedencia. Es la pendiente de la recta correspondiente a dicho modelo.

VISCOSIDAD REDUCIDA

Es la viscosidad específica por unidad de concentración del soluto o de la fase dispersa.

VISCOSIDAD RELATIVA

La relación de la viscosidad dinámica de una solución o de una dispersión a la fase continua, cada una medida a la misma temperatura.

A P E N D I C E A

Partiendo del modelo de Metzner and Reed se tiene que la ecuación de recurrencia es:

$$\tau^2 \gamma = a \tau^b \quad (1)$$

para dos puntos cualesquiera se tiene:

$$\tau_1^2 \gamma_1 = a \tau_1^b \quad (2)$$

$$\tau_2^2 \gamma_2 = a \tau_2^b \quad (3)$$

dividiendo (2) / (3)

$$\left[\frac{\tau_1}{\tau_2} \right]^2 \frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \left[\frac{\tau_1}{\tau_2} \right]^b \quad (4)$$

despejando (b) de (4)

$$b = \frac{\log \left[\frac{\tau_1}{\tau_2} \right]^2 \frac{\gamma_1}{\gamma_2}}{\log \left[\frac{\tau_1}{\tau_2} \right]^2} \quad (5)$$

si $\gamma_1 = 1022$ y $\gamma_2 = 511$ [1/seg]

$$b = 2 + \frac{\log 2}{\log (\tau_{600} / \tau_{300})} \quad (6)$$

despejando (a) de (1)

$$a = \tau^{2-a} \cdot b \quad (7)$$

las ecuaciones (6) y (7) definen los índices de comportamiento de flujo "a" y "b" del modelo de Metzner and Reed.

Para la obtención de los parámetros reológicos de Metzner and Reed se puede consultar S. Din and M. Desouky²⁶ donde se muestran cada uno de ellos, mismos que se presentan a continuación:

$$n' = \frac{1}{b-2} \quad (8)$$

$$K' = \left[\frac{b+1}{4a} \right]^{n'} \quad (9)$$

expresando τ como una función de γ , es decir $\tau = f(\gamma)$ se puede despejar τ de la ecuación (1):

$$\tau = \left[\frac{\gamma}{a} \right]^{\frac{1}{b-2}} \quad (10)$$

pero se sabe que:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (11)$$

despejando τ :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (12)$$

sustituyendo (10) en (11)

$$\mu = \frac{\left[\frac{\dot{\gamma}}{a} \right]^{n'}}{\dot{\gamma}} \quad (13)$$

simplificando términos

$$\mu = \frac{1}{a^{n'}} \dot{\gamma}^{n'-1} \quad (14)$$

la ecuación (14) es la ecuación de recurrencia del modelo Metzner and Reed, que sirve para la obtención de la viscosidad de un lodo de perforación a una velocidad de corte determinada.

A P E N D I C E B

De acuerdo a la ecuación de Guzmán de Andrade se tiene la siguiente ecuación de recurrencia:

$$\mu = C_1 \text{ EXP} (C_2 / T)$$

Donde se puede observar que la $\mu = f(T)$ ya que C_1 y C_2 son constantes características de cada fluido en particular.

Se parte de la suposición de que se conocen dos puntos a diferentes condiciones, es decir $P_1(T_1, \mu_1)$, $P_2(T_2, \mu_2)$.

Sustituyendo P_1 y P_2 en la ecuación de recurrencia:

$$\mu_1 = C_1 \text{ EXP} (C_2 / T_1) \quad \text{Ec. 1}$$

$$\mu_2 = C_1 \text{ EXP} (C_2 / T_2) \quad \text{Ec. 2}$$

despejando C_1 de Ec. 1

$$C_1 = \frac{\mu_1}{\text{EXP} (C_2 / T_1)} \quad \text{Ec. 3}$$

sustituyendo Ec. 3 en Ec. 2

$$\mu_2 = \frac{\mu_1}{\text{EXP} (C_2 / T_1)} \text{ EXP} (C_2 / T_2) \quad \text{Ec. 4}$$

despejando C_2

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = \frac{\text{EXP}(C_2 / T_2)}{\text{EXP}(C_2 / T_1)} = \text{EXP}(C_2/T_2 - C_2/T_1) \quad \text{Ec. 5}$$

sacando logaritmos naturales:

$$\frac{C_2}{T_2} - \frac{C_2}{T_1} = \text{Ln } \mu_2/\mu_1 \quad \text{Ec. 6}$$

factorizando C_2

$$C_2 \left(1 / T_2 - 1 / T_1 \right) = \text{Ln } \mu_2 / \mu_1 \quad \text{Ec. 7}$$

$$C_2 = \frac{\text{Ln } \frac{\mu_2}{\mu_1}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} = \frac{- \text{Ln } \frac{\mu_1}{\mu_2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad \text{Ec. 8}$$

$$\therefore C_2 = \frac{\text{Ln } \frac{\mu_1}{\mu_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad \text{Ec. 9}$$

sustituyendo Ec. 9 en la Ec. 1

$$\mu_1 = C_1 \text{ EXP} \left[\frac{\text{Ln} \frac{\mu_1}{\mu_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \times \frac{1}{T_1} \right] = C_1 \text{ EXP} \left[\frac{\text{Ln} \mu_1/\mu_2}{1 - T_1/T_2} \right]$$

despejando C_1

$$\therefore C_1 = \frac{\mu_1}{\text{EXP} \left[\frac{\text{Ln} \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)}{1 - \frac{T_1}{T_2}} \right]} \quad \text{Ec. 11}$$

Se puede observar que C_1 tiene unidades de viscosidad mientras que C_2 tiene unidades de temperatura. Además C_1 , C_2 (Ec. 9 y Ec. 11) definen perfectamente a la ecuación de recurrencia.

A P E N D I C E C

Tabla Básica de Conversión del Sistema Internacional

Longitud

$$1 \text{ pie} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ pg} = 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ milla} = 1609.3 \text{ m}$$

Volumen

$$1 \text{ pie}^3 = 0.028316 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ bl} = 0.158987 \text{ m}^3$$

Masa

$$1 \text{ lbm} = 453.592 \text{ gm}$$

$$1 \text{ kgm} = 2.2046 \text{ lbm}$$

Densidad

$$1 \text{ grm/cm}^3 = 1000 \text{ kgm/m}^3$$

$$1 \text{ lbm/pie}^3 = 16.018 \text{ kgm/m}^3$$

$$1 \text{ lbm/gal} = 120 \text{ kgm/m}^3$$

$$1 \text{ lbm/bl} = 2.853 \text{ kgm/m}^3$$

$$\rho_r \text{ aceite} = \frac{141.5}{131.5 + ^\circ\text{API}}$$

Viscosidad

$$1 \text{ cp} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$1 \text{ cp} = 6.7197 \times 10^{-4} \text{ lbm/pie}\cdot\text{seg}$$

$$1 \text{ cp} = 0.0403 \text{ lbm/pie}\cdot\text{min}$$

$$1 \text{ stoke} = \text{cm}^2/\text{s}$$

Constantes Reológicas Características

$$1 \text{ lbf s}^n/100 \text{ pie}^2 = 479 \text{ mPa s}^n/\text{cm}^2$$

$$1 \text{ dyn s}^n/\text{cm}^2 = 10 \text{ mPa s}^n/\text{cm}^2$$

Esfuerzo

$$1 \text{ lbf/100pie}^2 = 0.48 \text{ Pa}$$

Presión

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 14.5 \text{ lbf/pg}^2$$

$$1 \text{ lbf/pg}^2 = 6.8748 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ dyn/cm}^2 = 0.1 \text{ Pa}$$

Gradiente de Presión

$$1 \text{ psi/pie} = 22.6 \text{ kPa/m}$$

Temperatura

$$^\circ\text{F} = 1.8 \text{ }^\circ\text{C} + 32$$

$$^\circ\text{K} = \text{ }^\circ\text{C} + 273$$

$$^\circ\text{R} = \text{ }^\circ\text{F} + 460$$

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

Dr. Eduardo González Partida, 1990. Seminario de Exploración Geotérmica, Facultad de Ingeniería UNAM.

Referencias 1 - 4

- 1.- V. M. Arellano, 1988. La Energía Geotérmica en México y en el Mundo. IIE, 1 - 5 pp.
- 2.- James R. Kelsey and Charles C. Carson, 1984. Geothermal Drilling. Sandia National Laboratories, pp. 39 - 57.
- 3.- Dr. T. Casadevall, S. García, Dr. A. Merla, 1978. Metodología de Exploración Geotérmica Fases de Reconocimiento, Prefactibilidad y Factibilidad. OLADE - IIE, Quito Ecuador. 8 - 52.
- 4.- Ing. Antonio Razo Montiel, 1988. Desarrollo de la Exploración Geotérmica en México. IIE, 1 - 6 pp.
- 5.- Fluidos de perforación K / P1 / 74 : I M P, pp. 1-15 / 27- 63 BIMP (manual).
- 6.- Herb Walters, 1991. Dewatering of Drilling Fluids. Petroleum Engineer International, february, 28 - 30.
- 7.- G. Chilingarian and P. Vorabutr, 1981. Drilling and drilling Elsevier, Amsterdam, pp. 44 - 50 / 271 - 293.
BCIIFI : TN 871 : 2
- 8.- L. Eduards, G. Chilingar, H. Rieke III, W. Fertl, 1982. Handbook of Geothermal Energy. Gulf Publishing Company, Houston Texas, pp. 255 - 263. BFI : TJ 280 : 7M36
- 9.- R. H. Houwink and H. de Decker, 1971. Elasticity plasticity and structure of matter. Cambridge Eng. University. Third Edition, pp. 1 - 34 / 97 - 130. BCIIFI : GC189 : H68
- 10.- M.I. Jose Angel Gómez Cabrera, 1988. Cuaderno de ejercicios de manejo de la producción en superficie. Facultad de Ingeniería UNAM. Cap. VIII, 132 - 136 pp.
- 11.- P. H. Goldblatt, 1972. Rheology of thixotropic materials.

- University Microfilms Limited, High Wycomb, England. pp. 1-12
BIMP : No. 14807
- 12.- J. Harris, 1977. Rheology and no Newtonian flow, London, Longman. pp. Xvii - XXXvii / 1 - 8.
BCIIFI : QC 189 : .5: H37
 - 13.- A. W. Sisko and L. C. Brunstum, 1969. Relation of asphalt rheological properties, National Academy of Sciences - National Academy of Engineering. 1 - 15.
BCIIFI : F - HR : NCR . 67
 - 14.- Carlos Rangel Nafaile, Carlos A. Cruz Ramos, 1986. Theoretical and applied development in rheology, Sociedad Mexicana de Reología, pp. 16 - 23 / 107 - 114.
BCIIFI : QC 189 : T44
 - 15.- Ibañez Gómez Luis Angel, 1989. Compendio reológico general, Facultad de Ingeniería, UNAM, pp. 45 - 64.
BFI : No. 24089047.
 - 16.- Bottai, Fabbri, Ricciardulli, Tarquini, Domínguez, Barroso, Santoyo y Morales, 1986. Estudios Sobre Fluidos de Perforación y Cementos para Pozos Geotérmicos, Proyecto 1884 ENEL / CFE - IIE, Informe Final IIE / 11 / 2099 / I 01/P, Larderello, Italia.
 - 17.- Adelina J. Son, 1987. Temperature - stable polymeric fluids - loss reducer tolerant to high electrolyte contamination, SPE Drilling Engineering, Vol. 2 , sept., 209 - 216.
 - 18.- A. C. Perricone, D. P. Enright , J. M. Lucas, 1986. Vinyl Sulfonate Copolymers for High Temperature Filtration Control of Water - Based Muds. SPE Drilling Engineering, october, 358 - 364.
 - 19.- Bill G. Chesser, Dorothy P. Enright, 1980. High Temperature Stabilization of Drilling Fluids with a Low - Molecular - Weight Copolymer, Journal of Petroleum Technology, june, 950 - 956.
 - 20.- J. M. Griffin. A. Ghalambor. 1986. Diseño de balance químico de fluidos de perforación poliméricos, orientados a la

- desestabilización de arcillas. SPE Drilling Engineering, february.
- 21.- Hernández Jiménez Felipe, 1989. Modelos reológicos no Newtonianos, Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 100 - 113. BFI : No. 2489010.
 - 22.- J. V. Fisk and D. E. Jamison, 1989. Physical properties of drilling fluids at high temperature and pressure, SPE Drilling Engineering, Vol. 4, december, 341 - 346.
 - 23.- Rafael Irearte V., Hugo E. Borrás García y Rossynela Duran Cuevas, 1989. Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 117 - 120.
 - 24.- David F. Tver / Berry, 1980. The petroleum dictionary, Van Nostrand Reinhold, New York. ECIIFI : TN865 : P47 (reserva).
 - 25.- Drilling mud and cement slurry rheology manual, 1982. Gulf Publishing Company, Editions Technip, pp. 12, 54 - 56.
 - 26.- Saad El-Din M. Desouky, 1991. Short method calculations for crude trunkline design, International Pipe Line Industry, february, 23 - 24.
 - 27.- Ing. Fco. Garacicochea P. y R. Angel Castro F., 1985. Variables para Programas de Cómputo y Símbolos Aplicables en la Ingeniería de Explotación del Petróleo, Facultad de Ingeniería UNAM, 19 - 21.
 - 28.- S.S. Okrajni and J.J. Azar, 1986. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells, SPE Drilling Engineering, august, 297 - 300.
 - 29.- T. A. Farris, H. O. Ozbelge and S.M. Desouky, 1990. How to calculate flow Behavior of Saudi crude, International Pipe Line Industry, september 1990.
 - 30.- T. J. Bailey, P. A. Bern, F. Mc Ewan, 1986; Low toxicity oil muds: A knowledge of downhole rheological behavior assists successful field application, SPE Drilling Engineering, april pp. 107 - 114.
 - 31.- M.I. J. O. Andria, 1988; Apuntes del curso Geoestadística, distribución lognormal, Facultad de Ingeniería UNAM.

B C I I F I Biblioteca conjunta Instituto de Ingeniería Facultad
de Ingeniería: DEEFI.

B F I Biblioteca de la Facultad de Ingeniería " Antonio
Dovali Jaime "; UNAM

B I M P Biblioteca del Instituto Mexicano del Petróleo

I I E Instituto de Investigaciones Eléctricas