

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ADICION DEL COMPUESTO Z – TROL 60 COMO EMULSIFICANTE Y HUMECTANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE”**

Trabajo Especial de Grado presentado ante  
la ilustre Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título de  
Ingeniero de Petróleo

Por el Br. David Alvarez García.

Caracas, Noviembre del 2002.

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ADICION DEL COMPUESTO Z – TROL 60 COMO EMULSIFICANTE Y HUMECTANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE”**

Tutor Académico: Prof. Griselda Zorrilla de Mora

Trabajo Especial de Grado presentado ante  
la ilustre Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título de  
Ingeniero de Petróleo

Por el Br. David Alvarez García.

Caracas, Noviembre del 2002.

Caracas, Noviembre de 2002

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Petróleo, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller David Alvarez García:

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ADICION DEL COMPUESTO Z – TROL 60  
COMO EMULSIFICANTE Y HUMECTANTE EN FLUIDOS DE PERFORACIÓN  
BASE ACEITE**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Petróleo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

---

Prof. Ovidio Suarez

Jurado

---

Prof. Armando Azpurua

Jurado

---

Prof. Griselda Zorrilla de Mora

Tutor

## AGRADECIMIENTOS

Yo no se donde queda el límite entre el cielo y la tierra, pero quisiera llegar allí para abrazarte y darte un beso, pero ahora solo tengo esto para decirte que te extraño y amo por todo lo que hiciste por mí; a ti especialmente papá, gracias.

A mi mamá, que todos los días me ha dado las más grandes demostraciones de amor y tolerancia.

A mis hermanos Edu, Franci y Mary que siempre me han mostrado su apoyo y su solidaridad.

A la profesora Griselda por ofrecerme la oportunidad y creo que esta justa y bonita pero corta para agradecerle.

A mi pana el Q – Lón y su novia Mariana (ella me dijo que la pusiera), que sin su paciencia no hubiera logrado nada.

A todos los Griselda's boys: El Loro, El Topo, Perro Maluco, Rausi, Rolinga, Thurix, Jorge Jiménez y Darwin (yo no me doy mala vida viejo).

A los mosqueteros: El Calvo, Frank y el líder Dagtañan (Carlitos Sánchez), por las exigentes tardes – noches de estudio.

A la más grande hilera de sin vergüenzas que siempre han estado a mi lado en las situaciones buenas como en las malas: Consin, Birro, Bolivia, Cochino, Laure, Chaco, Puma, Chispa, Chichón, Niño, Tablo, Perete, Marulanda, Denikin, Stalin, Lenin, Zamuro, Kufat, Reo, Yim, Henry Atencio Llaguno (Juan

Dario), Guerino, Licón, Luigi, Veronico, Peolo, Sofrita, Verónica, Barbara y a cualquier persona que se me pueda haber escapado.

También a mi compadrito por su patrocinio desinteresado, el apoyo, la amistad y el consejo sincero que en su persona nunca me faltó.

**Álvarez G. David**

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA ADICION DEL COMPUESTO Z  
TROL 60 COMO EMULSIFICANTE Y HUMECTANTE EN FLUIDOS  
DE PERFORACION BASE ACEITE.**

**Tutor Académico: Prof. Griselda Zorrilla de Mora. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad  
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleo. Año 2002, 122 pag.**

**Palabras Claves:** Emulsificante, Humectante, Emulsiones Inversas.

**Resumen.** Cada día, la industria petrolera enfrenta un nuevo reto, el cual consiste en integrar de manera exitosa cada una de las infinitas ramas del conocimiento basado en la investigación sobre las nuevas propuestas, con el fin de optimizar cada una de las operaciones que se desarrollan en la actualidad.

De la investigación no se escapan los fluidos de perforación que forman parte vital y ofrecen un medio seguro, eficaz y acorde con el medio ambiente para cada una de las operaciones de perforación.

Las propiedades óptimas de los lodos de perforación son obtenidas por la combinación de ciertos aditivos, estos generalmente son de fabricación extranjera haciendo que el costo se vea incrementado, considerando que en un proceso de perforación el gasto por concepto del fluido de perforación está asociado a un 10% del total, se puede tomar como punto crítico la disminución del costo por barril con la sustitución de aditivos importados, por unos de fabricación nacional que nos permita obtener un sistema, que cumpla con las funciones básicas de un lodo de perforación.

Debido a esto el uso de aditivos nacionales cobra una mayor importancia ya, que en la actualidad se encuentra con el apoyo de políticas económicas que estimulan al consumo de manufacturas producidas en nuestro país.

Es de aquí donde surge el objetivo general de esta investigación donde se estudiaron las variaciones de las propiedades fisicoquímicas en distintos lodos de perforación base aceite,

con la adición del producto de fabricación nacional **Z-TROL 60**, utilizándolo como sustituto de emulsivos y humectantes de uso tradicional en operaciones de perforación, se evaluará su comportamiento en emulsiones inversas O/W 70/30, 80/20 y 90/10, con fase continua aceite mineral y el éster extraído de la palma aceitera, diseñándolas a diferentes concentraciones del producto a fin de optimizar su función y costo, además de fluidos 100% aceite mineral. Estos fluidos posteriormente fueron sometidos a envejecimiento, simulando condiciones internas del pozo, con el fin de determinar la variación de sus propiedades a estas condiciones críticas de trabajo para luego comparar sus propiedades con las de fluidos de operados en el campo.

Después de realizadas todas las pruebas se puede concluir que el aditivo es realmente capaz de cumplir con las propiedades mínimas de los fluidos de perforación, y con ello catalogarlo como un aditivo capaz de sustituir productos comerciales, tradicionalmente de fabricación extranjera, por uno de fabricación nacional, sobre todo cuando es usado en lodos base aceite mineral.

Este producto podría contribuir a disminuir los costos por concepto de gastos de un fluido de perforación base aceite, es necesario seguir las investigaciones e incentivar a nuestra industria nacional a fin de encontrar aditivos compatibles, capaces de satisfacer las necesidades de la industria petrolera; siempre y cuando se equilibren las variables involucradas como calidad, beneficio, costo y sinergia con el medio ambiente.

LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABLAS.....	VIII
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II MARCO TEÓRICO.....	2
II.1 FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	2
II.1.1 FUNCIONES BÁSICAS DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	3
II.1.2 COMPOSICIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN.....	6
II.1.3 PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION.....	8
II.2 PROPIEDADES REOLOGICAS DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN.....	12
II.2.1 VISCOSIDAD.....	13
II.2.1.1 VISCOSIDAD PLÁSTICA.....	13
II.2.1.2 VISCOSIDAD APARENTE.....	13
II.2.2 PUNTO DE CEDENCIA.....	14
II.2.3 FUERZA DE GELATINIZACIÓN.....	15
II.2.4 MODELOS REOLÓGICOS.....	17
II.3 FORMULACIÓN DE LOS FLUIDOS BASE ACEITE.....	21
II.4 ADITIVOS PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN TIPO BASE ACEITE.....	23
II.5 TEORÍA DE LAS EMULSIONES.....	29
II.5.1 EMULSIONES.....	29
II.5.2 COMPOSICIÓN DE UNA EMULSIÓN.....	30
II.5.3 TIPO DE EMULSIONES ELÁSTICO.....	31
II.5.3.1 EMULSIONES DE ACEITE EN AGUA.....	31



II.5.3.2 EMULSIONES DE AGUA EN ACEITE.....	32
II.6 SURFACTANTES.....	32
II.6.1 FORMACIÓN DE EMULSIONES.....	34
II.6.2 ESTABILIDAD DE LAS EMULSIONES.....	35
II.6.3 VISCOSIDAD DE LAS EMULSIONES.....	36
III METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	38
III.1 MATERIALES UTILIZADOS.....	38
III.2 Z-TROL 60.....	39
III.3 EQUIPOS.....	40
III.4 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	41
III.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	49
IV DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	52
IV.1 EMULSIÓN ACEITE MINERAL / AGUA 80/20.....	52
IV.1.1 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD.....	53
IV.1.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	54
IV.1.2.1 VISCOSIDAD PLÁSTICA.....	54
IV.1.2.2 PUNTO CEDENTE.....	55
IV.1.2.3 FUERZA DE GEL.....	56
IV.1.2.4 ESTABILIDAD ELÉCTRICA.....	56
IV.1.2.5 PÉRDIDA DE FILTRADO.....	57
IV.1.2.6 CONTENIDO DE SÓLIDOS.....	58
IV.1.3 RESULTADOS VARIANDO LA CONCENTRACIÓN DE Z-TROL 60....	58
IV.1.3.1 PUNTO CEDENTE.....	59
IV.1.3.2 VISCOSIDAD PLÁSTICA Y APARENTE.....	60

IV.1.3.3 FUERZA DE GEL.....	61
IV.1.3.4 ESTABILIDAD ELÉCTRICA.....	62
IV.1.3.5 PÉRDIDA DE FILTRADO.....	63
IV.1.4 RESULTADOS VARIANDO LA CONCENTRACIÓN DE ARCILLA ORGANOFÍLICA EN EMULSIONES INVERSAS 80/20.....	64
IV.1.5 RESULTADOS VARIANDO EL ORDEN DE AGREGACIÓN DE LOS ADITIVOS EN EMULSIONES INVERSAS 80/20.....	67
IV.1.6 RESULTADOS VARIANDO LA CONCENTRACIÓN DE ARCILLA ORGANOFÍLICA EN EMULSIONES INVERSAS 80/20.....	72
IV.1 EMULSIÓN ACEITE MINERAL / AGUA 90/10.....	75
IV.2.1 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD.....	76
IV.2.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	77
IV.2.2.1 VISCOSIDAD PLÁSTICA.....	77
IV.2.2.2 PUNTO CEDENTE.....	78
IV.2.2.3 FUERZA DE GEL.....	79
IV.2.2.4 ESTABILIDAD ELÉCTRICA.....	79
IV.2.2.5 PÉRDIDA DE FILTRADO.....	80
IV.2.2.6 CONTENIDO DE SÓLIDOS.....	81
IV.3 EMULSIÓN ACEITE MINERAL 100%.....	81
IV.3.1 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD.....	82
IV.3.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	82
IV.3.2.1 VISCOSIDAD PLÁSTICA.....	83
IV.3.2.2 PUNTO CEDENTE.....	84
IV.3.2.3 FUERZA DE GEL.....	84

---

IV.3.2.4 PÉRDIDA DE FILTRADO .....	85
IV.4 EMULSIÓN ACEITE MINERAL / AGUA 70/30.....	85
IV.4.1 COMPORTAMIENTO DE LA DENSIDAD.....	86
IV.4.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS.....	87
IV.4.2.1 VISCOSIDAD PLÁSTICA.....	87
IV.4.2.2 PUNTO CEDENTE.....	88
IV.4.2.3 FUERZA DE GEL.....	88
IV.4.2.4 ESTABILIDAD ELÉCTRICA.....	89
IV.4.2.5 PÉRDIDA DE FILTRADO.....	90
IV.5 COMPARACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE LOS LODOS DISEÑADOS EN EL LABORATORIO BASE ACEITE MINERAL CON UN FLUIDO APLICADO EN CAMPO.....	90
IV.5.1 LODOS 100% ACEITE.....	90
IV.5.1 LODOS EMULSIÓN INVERSA ACEITE MINERAL / AGUA 90/10.....	92
IV.6 LODOS BASE ACEITE VEGETAL.....	93
IV.6.1 LODOS ACEITE VEGETAL-AGUA 70/30.....	93
IV.6.2 LODOS ACEITE VEGETAL-AGUA 80/20.....	96
V. CONCLUSIONES.....	102
VI. RECOMENDACIONES.....	103
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
VIII. GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	106
IX APÉNDICES.....	110

**LISTA DE FIGURAS**

Figura II.1. Tipos de geles	17
Figura II.2. Clasificación de los modelos reológicos	19
Figura II.3. Tipos de emulsiones	31
Figura II.4. Micela	33
Figura III.1. Balanza electrónica	41
Figura III.2. Balanza para lodos	42
Figura III.3. Agitadores multimixer	43
Figura III.4. Viscosímetro FANN	44
Figura III.5. Equipo de filtrado ATAP	46
Figura III.6. Celda contenedora de lodo para equipo ATAP	46
Figura III.7. Medidor de estabilidad eléctrica	47
Figura III.8. Retorta	48
Figura III.9. Celda de envejecimiento	49
Figura III.10. Horno de envejecimiento	49
Figura III.11. Procedimiento experimental utilizado	51
Figura IV.1. Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10 lb/bbl de Z-Trol 60	54
Figura IV.2. Comportamiento del punto cedente en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10lb/bbl de Z-Trol 60	55
Figura IV.3 Comportamiento de la fuerza de gel en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10lb/bbl de Z-Trol 60	56
Figura IV.4 Comportamiento de la estabilidad eléctrica en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10lb/bbl de Z-Trol 60	56

Figura IV.5. Comportamiento de la pérdida de filtrado en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10lb/bbl de Z-Trol 60	57
Figura IV.6 Comportamiento del punto cedente a distintas concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas 80/20	59
Figura IV.7 Comportamiento de la viscosidad plástica a distintas concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas 80/20	60
Figura IV.8 Comportamiento de la viscosidad aparente a distintas concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas 80/20	61
Figura IV.9 Comportamiento de los geles a distintas concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas 80/20	61
Figura IV.10 Comportamiento de la estabilidad eléctrica a distintas concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas 80/20	62
Figura IV.11 Comportamiento de la pérdida de filtrado a distintas concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas 80/20	63
Figura IV.12 Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer	77
Figura IV.13 Comportamiento de la viscosidad del punto cedente en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer	78
Figura IV.14 Comportamiento de la fuerza de gel en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer	79
Figura IV.15 Comportamiento de la estabilidad eléctrica en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer	79
Figura IV.16 Comportamiento de la pérdida de filtrado en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer	80
Figura IV.17 Comportamiento de la viscosidad plástica en lodos 100% aceite antes y después de envejecer	83
Figura IV.18 Comportamiento del punto cedente en lodos 100% aceite antes y después de envejecer	84
Figura IV.19 Comportamiento de la resistencia al gel en lodos 100% aceite antes y después de envejecer	84
Figura IV.20 Comportamiento de la pérdida de filtrado en lodos 100% aceite antes y después de envejecer	85

Figura IV.21 Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer	87
Figura IV.22 Comportamiento del punto cedente en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer	88
Figura IV.23 Comportamiento de la fuerza de gel en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer	88
Figura IV.24 Comportamiento de la estabilidad eléctrica en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer	89
Figura IV.25 Comportamiento de la pérdida de filtrado en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer	90
Figura IV.26 Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas aceite-vegetal / agua 70/30, variando la concentración de arcilla organofílica	94
Figura IV.27 Comportamiento del punto cedente en emulsiones inversas aceite-vegetal / agua 70/30, variando la concentración de arcilla organofílica	95

**LISTA DE TABLAS**

Tabla N° II.1. Clasificación de la fase sólida dentro de los fluidos de perforación	7
Tabla N° II.2. Propiedades del aceite vegetal	24
Tabla N° II.3. Especificaciones del aceite vegetal utilizado para elaborar lodos invertidos	26
Tabla N° III.1. Materiales usados	38
Tabla N° III.2. Propiedades fisicoquímicas del Z-Trol 60	39
Tabla N° IV.1. Formulación del sistema aceite mineral/agua (80/20) con peso de 12 lpg	52
Tabla N° IV.2. Resultados de la prueba aceite mineral/agua (80/20) con 10 lbs/bbl de Z-Trol 60	53
Tabla N° IV.3. Lodos de perforación (80/20) a diferentes concentraciones de Z-Trol 60 en emulsiones inversas (80/20)	58
Tabla N° IV.4. Propiedades de los fluidos de perforación (80/20) con diferentes concentraciones de Z-Trol 60	59
Tabla N° IV.5. Lodos de perforación 80/20 a diferentes concentraciones de arcilla organofílica en emulsiones inversas (80/20)	64
Tabla N° IV.6. Propiedades de los fluidos de perforación (80/20) a diferentes concentraciones de arcilla organofílica	65
Tabla N° IV.7. Formulación aceite mineral/agua 80/20 con 100000 ppm de NaCl	67
Tabla N° IV.8. Formulación aceite mineral/agua (80/20) con 200000 ppm de NaCl	68
Tabla N° IV.9. Propiedades de los fluidos de perforación (80/20) con diferentes concentraciones de NaCl.	68
Tabla N° IV.10. Formulación aceite mineral/agua (80/20) con 200000 ppm de CaCl <sub>2</sub>	69
Tabla N° IV.11. Formulación aceite mineral/agua 80/20 con 300000 ppm de CaCl <sub>2</sub>	70
Tabla N° IV.12. Propiedades de los fluidos de perforación (80/20) con diferentes concentraciones de CaCl <sub>2</sub>	71

Tabla N° IV.13. Formulaci3n aceite mineral/agua (80/20) variando el orden de agregaci3n de la arcilla organofilica lodo 1	73
Tabla N° IV.14. Formulaci3n aceite mineral/agua (80/20) variando el orden de agregaci3n de la arcilla organofilica lodo 2	73
Tabla N° IV.15. Propiedades de los fluidos de perforaci3n (80/20) variando el orden de agregaci3n de la arcilla organofilica	74
Tabla N° IV.16. Formulaci3n aceite mineral/agua (90/10) con un peso de 12 lpg	75
Tabla N° IV.17. Resultados de las pruebas aceite mineral/agua (90/10) con un peso de 12 lpg	76
Tabla N° IV.18 Formulaci3n de un fluido de perforaci3n 100% aceite mineral	81
Tabla N° IV.19 Resultados de las pruebas 100% con peso de 12 lpg	82
Tabla N° IV.20 Formulaci3n del sistema aceite mineral/agua (70/30) con un peso de 12 lpg	86
Tabla N° IV.21. Resultados de las pruebas aceite mineral/agua (70/30) con un peso de 12 lpg	86
Tabla N° IV.22. Comparaci3n entre los lodos 100% aceite operativo en campo y 100% aceite mineral envejecido	91
Tabla N° IV.23. Comparaci3n de las propiedades entre la emulsi3n inversa (90/10) y la emulsi3n (90/10) envejecido	92
Tabla N° IV.24. Formulaciones de fluidos tipo emulsi3n inversa aceite vegetal/agua (70/30) con diferentes concentraciones de arcilla organofilicas	93
Tabla N° IV.25. Propiedades de fluidos tipo emulsi3n inversa aceite vegetal/agua (70/30) con diferentes concentraciones de arcilla organofilicas	94
Tabla N° IV.26. Lodos de emulsi3n inversa aceite vegetal/agua (80/20), variando la concentraci3n de Z-Trol 60	96
Tabla N° IV.27. Propiedades de los lodos emulsi3n inversa aceite vegetal/agua (80/20) antes y despu3s de ser envejecidos, variando la concentraci3n de Z-Trol 60	97



Tabla N° IV.28. Formulación de los lodos emulsión inversa aceite vegetal/agua (80/20), variando la concentración de arcilla organofílica	98
Tabla N° IV.29. Propiedades de los fluidos de perforación tipo emulsión inversa aceite vegetal/agua (80/20), variando la concentración de arcilla organofílica	99
Tabla N° IX.1 Formulación de lodo 100% Aceite utilizado en campo	118
Tabla N° IX.2 Formulación de lodo 90/10 Aceite mineral - agua utilizado en campo.	119

## I. INTRODUCCIÓN

Los fluidos de perforación base aceite se utilizan principalmente en pozos profundos con altas presiones y altas temperaturas, estos fluidos representan grandes costos en las operaciones de perforación, siendo éste uno de los puntos críticos que nos lleva a diseñar fluidos de perforación para lograr un equilibrio entre las operaciones de perforación, costos y conservación ambiental.

Venezuela como país petrolero tiene un alto mercado nacional de aditivos para fluidos de perforación. Es de sumo interés para el país la búsqueda de insumos nacionales que puedan sustituir los componentes o aditivos de lodos, generalmente importados, minimizando costos y ofreciendo óptimos resultados en operaciones de perforación de pozos de petróleo y gas natural. En la actualidad existen industrias nacionales incentivadas por la nueva ley de hidrocarburos, que han desarrollado productos que se enfilan en este sentido, pero que necesitan ser validados para competir dentro del mercado. Es a partir de esta situación que surge el objetivo principal de este trabajo de investigación para estudiar el comportamiento que posee el producto Z – Trol 60 en función de un fluido de perforación base aceite, para ser utilizado en sustitución del agente emulsivo y del agente humectante.

Se realizarán pruebas de emulsiones inversas con distintas relaciones aceite/agua utilizando como fase continua aceite mineral y éster extraído de la palma aceitera, de igual forma se realizará un lodo 100 % aceite mineral.

Para lograr este objetivo se estudiarán las propiedades físico - químicas de los fluidos de perforación, diseñados con el aditivo Z Trol 60 y su aplicabilidad en operaciones de campo.

## **II.-MARCO TEÓRICO**

### **II.1.- FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

Los fluidos utilizados durante la perforación rotatoria de un pozo, son denominados como fluidos de perforación. Este fluido tiene como propósito fundamental hacer más rápida y segura la perforación de pozos, garantizando que al ser circulados a través del hoyo, cumplan con los requisitos mínimos de eficiencia en la limpieza del hoyo. Los fluidos de perforación entre otras cosas deben permitir la extracción de los sólidos provenientes de los cortes hechos por la mecha, estabilizar las paredes del hoyo e impedir la entrada de los fluidos hacia la formación perforada.

Los lodos de perforación así llamados por su aspecto, no deben ser corrosivos, tóxicos, ni inflamables y deben permanecer inertes a la contaminación de sales solubles o minerales, además conservar sus condiciones estables a las temperaturas de fondo del pozo.

El determinar las propiedades adecuadas de un lodo de perforación esta sujeto a determinarlas en análisis previos en ensayos y pruebas de laboratorio, además de repetir y comparar estas, antes de entrar y salir del hoyo, con la finalidad de mantener las propiedades mínimas de trabajo y ajustarlas en caso de ser necesario.

El lodo de perforación es un fluido de características físicas y químicas apropiadas, con la virtud necesaria para adaptarse a diversas condiciones hasta las que pueden considerarse las más complejas, debido a esto se ha requerido que su composición sea variada y cumpla con el requerimiento de la perforación de un pozo.

Estas situaciones indican que la optimización es el proceso lógico del análisis de los efectos e interacciones de las variables de perforación a través del modelaje matemático para obtener el máximo rendimiento de la perforación. El proceso las variables controlables seleccionadas en las cuales están incluidas el tipo del lodo, la hidráulica, tipo de mecha, peso en la mecha y velocidad de rotación. Al final, un programa de optimización es

preparado e implementado en campo con la conjugación de todos estos factores y variables involucradas en la perforación de un pozo.

### **II.1.1-FUNCIONES BASICAS DE UN FLUIDO DE PERFORACION**

#### **a) Transportar los ripios o recortes de perforación desde el fondo del hoyo hacia la superficie.**

Una de las vitales funciones de un fluido de perforación es transportar los cortes hechos por la mecha a la superficie a través del anular del pozo. Este proceso de traslado es dependiente principalmente de la velocidad del fluido en el anular, densidad del fluido, punto cedente y fuerza de gel. Otros factores los cuales afectan la remoción de ripios o recortes son la inclinación del hoyo, la excentricidad del anular, la densidad y el tamaño de los cortes (Azar, J.J.; Lummus, J.L.1986).

Los cortes hechos por la mecha o bien los pedazos de formación provenientes de las paredes por algún derrumbe deben continuamente ser evacuados del fondo del hoyo hasta la superficie, en la mayoría de los casos el mantener una velocidad en el anular del fluido da como resultado un movimiento neto hacia arriba de los cortes. Un incremento en la viscosidad, particularmente en el punto cedente, debe resultar en una mejor limpieza del hoyo.

Cuando la velocidad de asentamiento de los ripios es mayor que la velocidad del fluido en el anular, las partículas tienden a asentarse en el hoyo. Para disminuir esta velocidad es necesario aumentar la viscosidad del lodo (Chenevert, M. 1993).

#### **b) Enfriar, lubricar la mecha y la sarta de perforación.**

En la perforación, un considerable calor y fricción son generados por el contacto entre la mecha, la tubería de perforación y la formación. El fluido de perforación disipa el calor del fondo del pozo hasta llegar a la superficie (Azar J. J.; Lummus,J.L.1986).

El fluido de perforación también ejerce un efecto lubricante para la mecha, la sarta y el revestimiento durante el proceso de perforación (Manual IMCO). Dando como beneficios mayor tiempo de vida útil a la mecha, disminución de los esfuerzos de torsión en la sarta y la tubería de revestimiento.

**c) Mantener en sitio y estabilizada la pared del hoyo.**

El soporte lateral de las paredes del pozo es realizado con el fluido de perforación, hasta que sea colocada la tubería de revestimiento, si no fuera por esto la formación se derrumbaría.

Un buen fluido de perforación debe depositar un revoque que sea liso, delgado, flexible y de baja permeabilidad minimizando el problema de derrumbes y atascamiento de la tubería, además de consolidar la formación y retardar el paso de fluidos hacia la misma, ejerciendo una presión sobre las paredes del hoyo abierto.

**d) Controlar las presiones de las formaciones perforadas.**

Los fluidos que se encuentran en el espacio poroso están bajo una gran presión; esta gran presión debe ser monitoreada para evitar flujo incontrolado de estos hacia el interior del pozo. El control de estas presiones puede lograrse manteniendo una presión hidrostática adecuada y puede determinarse usando los gradientes de la formación.

**e) Mantener en suspensión los ripios y material densificante cuando se interrumpe circulación.**

Cuando se interrumpe circulación, el fluido pierde su poder de levantamiento. Las propiedades tixotrópicas del lodo permiten mantener en suspensión las partículas sólidas para luego llevarlas a la superficie cuando la circulación de fluido se inicia.

Bajo condiciones estáticas la resistencia o fuerza de gelatinización debe evitar la precipitación del material densificante y los sólidos de perforación.

**f) Soportar parte del peso de la sarta de perforación o de revestidor.**

Con el aumento en las profundidades perforadas el peso a soportar por los equipos de superficies es cada vez mayor. Este peso para la sarta de superficie es cada vez mayor. Este peso tanto para la sarta de perforación como para la tubería de revestimiento, será igual a su peso en el aire multiplicado por un factor de flotación.

**g) Proveer un medio adecuado para llevar a cabo los perfilajes de cable.**

La presencia de los fluidos de perforación proporciona un medio adecuado para llevar a cabo los perfiles que nos permiten la evaluación de las formaciones perforadas. El uso de estos perfiles y su funcionamiento óptimo requiere de que el lodo aporte buenas propiedades de conducción eléctrica y estas propiedades sean diferentes a los fluidos encontrados en la formación.

**h) Minimizar daños a la formación.**

La selección de un fluido de perforación implica asegurar un mínimo de modificación (daño) sobre las formaciones que se están siendo atravesadas, sobre todo las zonas productoras donde se pueden causar daños irreversibles, implicando por ejemplo, la reducción de permeabilidad, traduciéndose en altos costos en tratamientos de reparación y en pérdidas de producción.

**i) Facilitar la máxima obtención de información sobre las formaciones geológicas perforadas.**

El diseño del lodo en un programa de perforación en ocasiones implica alterar o más bien sacrificar sus propiedades físico-químicas con tal de permitir obtener la máxima información geológica con la intención de reproducir la arquitectura de las formaciones perforadas, esta situación se presenta casi obligatoriamente en pozos exploratorios donde en

la búsqueda de esto se ve mermada la tasa de penetración en beneficio de obtener la fidedigna data.

#### **j) Transmitir potencia hidráulica a la mecha**

El lodo de perforación es un medio para transmitir la potencia hidráulica disponible a través de las boquillas de la mecha a gran velocidad, ayudando así a perforar la formación y eliminar debajo de la superficie de la mecha los recortes hechos por esta. Si estos no son removidos disminuirán la velocidad de penetración haciendo menos efectivo el proceso de perforación. La remoción eficiente de los recortes que se forman depende de la consideración de la potencia en el programa de lodos y diseño de la hidráulica, además de las propiedades de flujo (viscosidad plástica, punto cedente, etc.) que deben ser controladas en valores apropiados.

### **II.1.2.-COMPOSICION DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION**

La composición del fluido de perforación depende de los requerimientos de una operación o de un programa de perforación. En rasgos generales estos fluidos (base agua y base aceite) se componen de dos fases, una líquida y otra sólida (Prieto, O. Ali.1993). Existen también fluidos de perforación compuestos por aire y gas; estos son llamados especiales o también neumáticos. (Manual IMCO).

#### **1. Fase líquida:**

La fase líquida en los fluidos de perforación base agua es el agua dulce o salada; y cuando es aceite pueden ser aceite mineral, sintético y aceite vegetal, tanto en fase continua de emulsiones inversas, como en lodos 100% aceite.

- Agua dulce: Esta es la fase continua ideal cuando estamos perforando zonas donde existan bajas presiones de formación, además de la presencia de arcillas

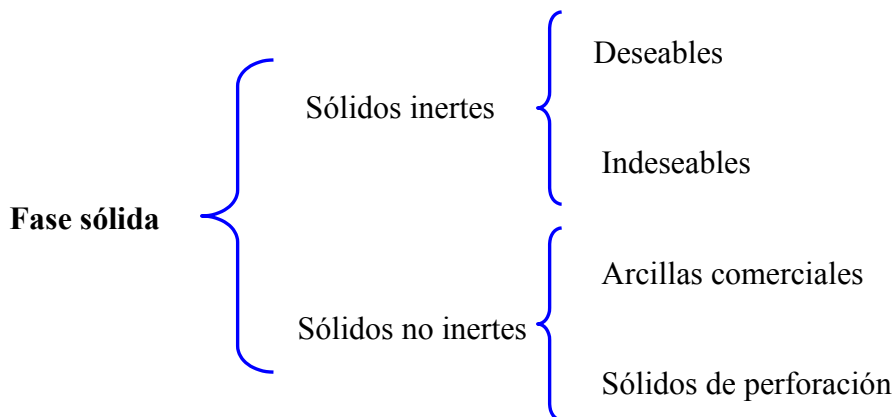
hidratable. Es económica, abundante y es el mejor dispersante químico para controlar sólidos por dilución. (Prieto, O. Alí 1993).

- Agua salada: Generalmente se usa en lodos parcialmente saturados con sal cuando se realizan operaciones de costa afuera, debido a la abundancia de esta (Prieto, O. Alí 1993).
- Aceite: El aceite cuando se usa como fase continua en lodos de perforación, permite entre otras cosas mejorar la estabilidad del hoyo, mantener las arcillas hidratables inhibidas, y un mejor comportamiento en altas temperaturas (Prieto, O. Alí 1993). Además de ser el fluido ideal cuando se esta perforando en zonas productoras. Un tratamiento especial en este trabajo será dado a las fases continuas, en la sección de preparación de los fluidos de perforación .Explicándose de forma mas detallada los diferentes tipos de aceite usados como fase continua en lodos de perforación.

## 2. Fase Sólida:

La fase sólida de los fluidos de perforación se puede esquematizar de la siguiente forma (tabla I.1).

**Tabla N° II.1 Clasificación de la fase sólida dentro de los fluidos de perforación (Prieto, Ali 1993)**





- Sólidos inertes deseables: Son aquellos que debido a su alta gravedad específica sirven para darle peso al lodo para alcanzar los valores de densidad requeridos, algunos de los sólidos usados comúnmente como densificantes se pueden considerar: la barita ( $\text{BaSO}_4$ ), carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), Hematina ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), etc.
- Sólidos inertes indeseables: Son sólidos perforados, tales como arena, caliza, dolomita, etc. Este tipo de sólidos debe ser removido tan rápidamente como sea posible ya que ellos son extremadamente abrasivos y si estos llegasen a ser recirculados a través del sistema causaría daños a los pistones y cilindros de las bombas; es de suma importancia tratar de mantener en la línea de flujo una cantidad no mayor de 0,5% de estos sólidos; y en el tanque de succión solamente un reporte de trazas de los mismos (Prieto, O., Alí 1993).
- Sólidos reactivos: Los sólidos reactivos son llamados así, porque son arcillas que poseen cargas eléctricas, ellos pueden formar parte de la formulación original del lodo o pueden incorporarse a este durante la perforación de la formación (Prieto, O., Alí 1993).

### **II.1.3.PROPIEDADES FUNDAMENTALES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN**

#### **II.1.3.1 Densidad.**

Los lodos de perforación base aceite se pueden preparar en valores de densidad entre 7 y 22 lbs/gal. Los productos usados generalmente como material densificante son la barita, hematita, carbonato de calcio, entre otros.

La alta densidad en los lodos base aceite es más fácilmente controlada mientras se perfora, porque los recortes se desintegran menos en aceite que en agua y son de esta manera eliminados en la superficie con una malla fina (Silva, Leonardo 1989).

### **II.1.3.2. Reología.**

La reología consiste en el estudio de la deformación y del flujo de la materia, describiendo el comportamiento de perforación en el espacio anular (Prieto, O., Alí 1993).

Los fluidos de perforación no cumplen con la ecuación de fluidos Newtonianos, y por ello son llamados no Newtonianos y la diferencia esencial depende del esfuerzo de corte a vencer, al momento de iniciar el flujo (Vernard, J. y Street, R. 1979).

Alguno de los fluidos como gases, agua, gasolina, glicerina, etc. Pertenecen a la categoría de los fluidos Newtonianos, es decir, que en presencia de un esfuerzo de corte dado, no varían su viscosidad (Prieto, O., Alí 1993).

Algunos sistemas polifásicos como dispersiones gas-liquido, liquido-liquido o sólido-liquido, pueden pertenecer a la categoría de fluidos reologicamente complejos, con la condición de que su comportamiento pueda ser representado por un fluido homogéneo de propiedades equivalentes. Cada uno de estos fluidos puede reportar un número impresionante de respuestas mecánicas frente a esfuerzos de corte dados, y estas respuestas pueden depender de la escala de tiempo considerada, así como del tipo e intensidad del esfuerzo de corte aplicado, y la inclusión de los fluidos de perforación en esta categoría de complejos, invita al conocimiento de su conducta frente a las deformaciones, sobre todo cuando el lodo es sometido al proceso de perforación.

### **Factores que afectan la reología**

#### **Temperatura**

Generalmente la viscosidad de los fluidos decrece generalmente a medida que aumenta la temperatura (Manual IMCO). Existe algunas excepciones en casos de alta temperatura, donde a valores de mayores de 300°F empieza a producirse la gelatinificación del lodo.

Al aumentar la temperatura disminuyen las fuerzas cohesivas que tienden a mantener las moléculas adyacentes unidas unas con otras, resistiéndose al movimiento relativo, traduciéndose en una disminución de la velocidad de flujo.

### **Presión**

La presión es un factor mas sensible en los lodos base aceite que en los lodos base agua. Existen instrumentos de laboratorio que son capaces de medir la reología bajo ciertas condiciones de presión, aunque con ciertas limitaciones operativas, estos instrumentos no han sido adaptados a condiciones de presión real de campo.

### **Tiempo**

La reología de un lodo depende del tiempo. Es como si el lodo recordara las velocidades de corte que han experimentado en el pasado y permitiera que su tensión de corte actual sea influida parcialmente por esa memoria. La resistencia de gel solo se desarrolla después de un periodo de tiempo en el cual el lodo ha sido sometido a una velocidad de corte igual a cero.

#### **II.1.3.3. Contenido de sólidos**

En los fluidos de perforación existen los llamados sólidos deseables y los no deseables, como ripios y arena, o en general recortes de perforación, que alteran las propiedades del lodo por lo cual hay que eliminarlos del sistema a través de técnicas químicas o mecánicas.

En la perforación rotatoria se clasifica como sólido indeseable, a cualquier partícula que no pueda atravesar un cedazo estándar 200 ASTM (orificios de 5 micrones) (Salas, G. 1961). Estos tipos de sólidos por lo general son extremadamente abrasivos; si son mantenidos en el lodo pueden causar severos daños a los pistones y cilindros de las bombas del sistema de circulación del equipo de perforación.

El alto contenido de ripios en los fluidos de perforación, trae como consecuencia un aumento en la viscosidad plástica, en su densidad y en general en todas las propiedades del lodo. El aumento de la viscosidad, traerá como consecuencia un aumento de la presión de funcionamiento de las bombas para mantener un caudal establecido.

#### **II.1.3.4. Estabilidad eléctrica**

La estabilidad eléctrica es un indicativo de cuan bien emulsionada se encuentra una emulsión, o cuan bien esta dispersa el agua en el aceite, esta prueba no indica necesariamente que una emulsión inversa este en buenas o malas condiciones, solo indica la tendencia que tiene un fluido a mantener estable la emulsión.

Generalmente una estabilidad eléctrica de 400 voltios se puede considerar aceptable en densidades entre 8 y 12 lbs/gal. Para lodos mas pesados se pueden esperar valores entre 450 y 2000 voltios, asegurando que el material densificante y los sólidos estén adecuadamente humedecidos en el aceite.

#### **II.1.3.5 Pérdida de filtrado**

La pérdida de filtrado que ocurre durante la operación de perforación hacia la perforación pueden ser: filtrado dinámico, filtrado estático.

El filtrado dinámico ocurre mientras el lodo esta siendo circulado, y el filtrado estático es la perdida de fluido en condiciones estáticas a la formación permeable a través del revoque. La tasa de la pérdida de fluido es descrita y gobernada por la ley de Darcy de flujo a través de un medio poroso, la cual ha sido modificada incluyendo los efectos de la filtración a través del revoque. El filtrado dinámico varía con las condiciones de flujo en el fluido de perforación, laminar o turbulento. Bajo condiciones laminares de flujo, el revoque se construye de forma similar que en condiciones estáticas. En flujo turbulento, el revoque esta expuesto a grandes fuerzas de erosión lo que disminuye el tamaño del revoque e incrementa la perdida de filtrado. Se han realizado estudios de laboratorio, y existe una

correlación que asocie la data de campo con los resultados de laboratorio. La medición de esta propiedad se apega a los procedimientos de A.P.I. (RP13B-2).

Los factores que afectan la pérdida de filtrado incluyen la temperatura, tipo, cantidad y tamaño de los sólidos presentes; además de la compresibilidad del revoque.

El tipo, cantidad, y tamaño de los sólidos en fluidos de perforación juega un papel importante en producir baja permeabilidad del revoque, la distribución, el arreglo y el tamaño de las partículas de submicrones a partículas sobre 10 micrones, es esencial para formar un sello con pocas aperturas y llenar el espacio entre las partículas mas grandes sobre formaciones permeables.

El grado de compresibilidad en revoques formados para evitar la pérdida de filtrado dependen de: presión diferencial, cambios en la permeabilidad y porosidad del revoque, además de las características de los sólidos que lo forman. Los revoques que son compresibles (se forman bajo presión) pueden ser compactados si la presión diferencial es aumentada. Esta compactación reduce la permeabilidad y la porosidad reduciendo el paso de flujo a la formación (Azar J. J.y Lummus, J.L.1986).

En realidad en los lodos base aceite la filtración estática ATAP, simulará la pérdida de filtrado hacia la formación a condiciones de pozo.

## **II.2 PROPIEDADES REOLÓGICAS DE UN FLUIDO DE PERFORACIÓN**

Las propiedades de los fluidos base aceite, deben ser controladas, si se espera que el lodo dentro de un proceso de perforación se comporte de forma apropiada e idónea, según las necesidades que se estén presentando.

Las propiedades reologicas son en parte consecuencia de la reología del fluido, recordando que esta estudia la relación existente entre el esfuerzo y la tensión de corte a las cuales están sometidos los lodos de perforación.

## II.2.1 Viscosidad

Todos los fluidos poseen viscosidad y, por lo tanto, presentan fenómenos friccionales entre sus partículas cuando ocurre movimiento. La viscosidad resulta básicamente de la cohesión y del intercambio del momentum molecular entre las capas de fluidos y, al ocurrir el flujo, estos aparecen como esfuerzos tangenciales o de corte entre esas capas en movimiento (Vennard, J y Street, R 1999).

### II.2.1.1 Viscosidad plástica

La viscosidad plástica es la porción de la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica. Es principalmente afectada por los siguientes factores:

- Los sólidos incluidos intencional o no intencionalmente al sistema.
- La forma de las partículas. Cuando una partícula es plana su superficie total respecto a otra partícula será mayor, que si ésta fuese de forma esférica, lo que minimizaría el contacto.
- El tamaño de los sólidos presentes en el sistema.

$$VP \text{ (cps)} = (\text{Lectura } 600 \text{ rpm}) - (\text{Lectura } 300 \text{ rpm}) \quad \text{Ecuación I.2}$$

### II.2.1.2 Viscosidad aparente

Para un fluido dado, la viscosidad aparente se define como la viscosidad que un fluido parece tener en un instrumento dado y a una tasa definida de corte. Es función de la viscosidad plástica y del punto cedente.

Su medición es en centipoises hecha en un viscosímetro rotacional, con su tasa de corte previamente establecida, esta medida denota los efectos simultáneos de todas las propiedades de flujo. Su valor puede estimarse de la siguiente forma (Prieto, Ali 1995):

$$VA \text{ (cps)} = \frac{(\text{Lectura } 600 \text{ rpm})}{2}$$

Ecuación I.3

2

### II.2.2 Punto de cedencia

Esta propiedad se define como la porción a la resistencia al flujo causada por las fuerzas de atracción electroquímicas entre las partículas. Estas fuerzas de atracción son consecuencia de las cargas eléctricas sobre las partículas dispersas en la fase líquida. La magnitud de esa fuerza puede ser medida a condiciones dinámicas y es dependiente de los siguientes factores (Manual IMCO):

- El tipo de sólidos y las cargas eléctricas asociadas a ellos.
- Cantidad de sólidos
- La concentración iónica de las sales contenidas en la fase líquida del lodo.

El punto de cedencia esta íntimamente asociado con la capacidad de limpieza del lodo en el fondo del hoyo, o sea su capacidad de transportar los ripios hasta la superficie donde deberán ser tratados y removidos en equipos de superficie.

Los puntos de cedencia excesivamente altos pueden ser ocasionados por la presencia de sólidos reactivos provenientes de la formación, además de la agregación excesiva de un viscosificante comercial. En algunos de estos casos, un incremento importante en el punto cedente, puede producir la floculación, lo cual conduciría a una situación indeseada y un retraso dentro del proceso de perforación tales como socavamiento del hoyo, atascamiento de la tubería, altas presiones en las bombas.

El punto de cedencia se relaciona muy directamente con la velocidad de asentamiento de los ripios, parámetro que depende de la forma y tamaño del sólido de perforación; a medida que el punto cedente aumenta la velocidad de asentamiento de los ripios disminuye, y este valor llega a un punto donde por más que aumente el punto cedente ya no será

influyente en el asentamiento de los ripios, y es allí donde se debe tener el valor máximo de cedencia ya que podría ocasionar daño al hoyo como los nombrados anteriormente.

$$PC \text{ (lb/100pie}^2\text{)} = (\text{Lectura 300 rpm}) - VP \text{ (cps)} \quad \text{Ecuación I.4}$$

### II.2.3 Fuerza de gelatinización

Cuando un lodo ha sido sometido a velocidades de corte de cero o cercana a esta durante cierto tiempo, el fluido tiende a desarrollar una estructura de gel rígida o semi-rígida. Esta propiedad es denominada tixotropía (Manual IMCO).

La fuerza de gelatinización como su nombre lo indica, es una medida del esfuerzo de ruptura o de resistencia del gel formado, después de un periodo de reposo. La tasa de gelatinización se refiere al tiempo requerido para formar gel. Si esta se forma lentamente, después que el lodo esta en reposo, se dice que la tasa de gelatinización es baja y es alta en caso contrario (Salas, G.1961). Un amplio margen entre una lectura inicial de gel y la lectura de 10 minutos se denomina gel progresivo, si no existe tal margen de diferencia se puede decir que los geles formados son denominados instantáneos (Manual IMCO).

El viscosímetro FANN, con sus seis diferentes tasa de corte, nos permite calcular de manera directa los valores de la gelatinosidad. Para periodos de 10 segundos, y de diez minutos. La fuerza de gel se reporta a estos tiempos en unidades de lb/100 pies<sup>2</sup>. (Frank W.1995).

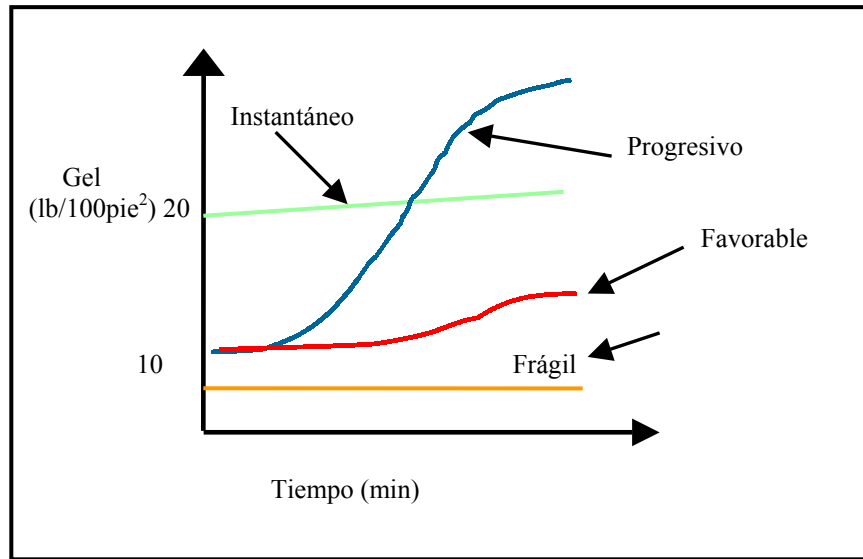
La resistencia de gel y el punto de cedencia son medidas de las fuerzas de atracción de un sistema o de un lodo de perforación, cabe destacar que la fuerza de gel mide las fuerzas de atracción estáticas, mientras que el punto cedente mide las fuerzas de atracción en condiciones dinámicas. (TECNOLOGÍA APLICADA DE LODOS,” IMCO service a Halliburton Company).



Las fuerzas de gel no deben ser muy bajas, ya que no podrían mantener eficientemente los ripios desprendidos durante las conexiones y los viajes de tubería. Si esta es muy alta, la presión requerida para recircular el fluido puede fracturar la formación y favorecer las condiciones para una arremetida (Azar, J.J.; Lummus, J.L.1986). A continuación se presenta una clasificación de los tipos de geles

- Geles frágiles poseen valores extremadamente bajos, donde los geles a los 10 segundos y a los 10 minutos son casi idénticos, por ejemplo 1/1, 2/2 y 2/3 etc.
- Geles favorables son aquellos que tienen valores bajos a los 10 segundos, pero luego van incrementándose hasta valores de casi el doble a los 10 minutos, por ejemplo 2/4, 3/6 y 4/8 etc.
- Geles progresivos tienen valores intermedios a los 10 segundos, luego se incrementan rápidamente hasta valores muy elevados a los 10 minutos por ejemplo 3/20, 6/35, 8/50.
- Los geles invariables o instantáneos tienen valores casi idénticos a los 10 segundos y a los 10 minutos, sin embargo estos valores, en algunos casos pueden ser muy elevados, por ejemplo 20/21, 30/32.

Todo esto puede ser visualizado a través de la siguiente gráfica (Lummus, J 1986) :



**Figura II.1 Tipos de geles [Lummus, J. (1986)]**

#### II.2.4 Modelos reológicos

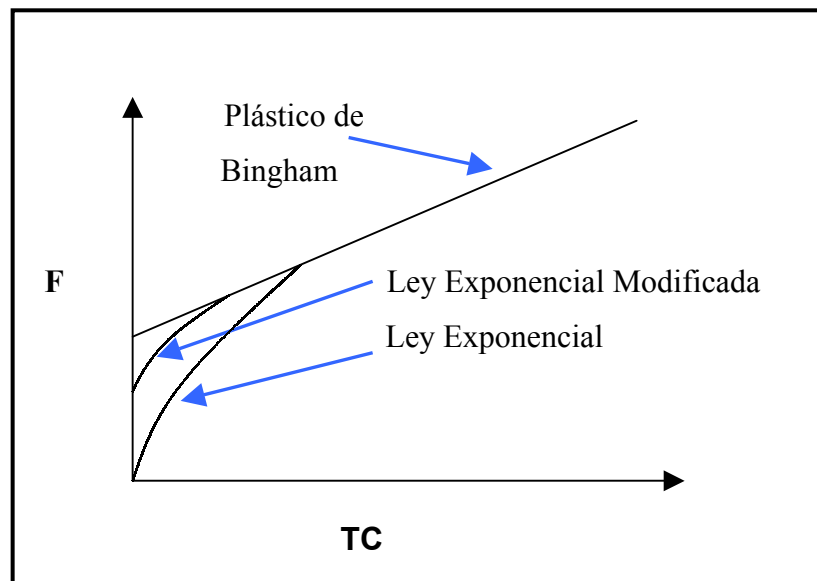
La medición de los fluidos de perforación y el monitoreo de sus propiedades reológicas nos permite determinar la capacidad de limpieza, su poder para levantar los sólidos de la perforación y analizar el comportamiento de sus propiedades cuando están presentes contaminantes, sustancias químicas y los cambios de temperatura.

Las propiedades del lodo durante las operaciones de perforación deben ser controladas con el fin de asegurar un desempeño adecuado, sobre todo las asociadas a sus propiedades de flujo, específicamente las de reología básica, asociadas a las relaciones tensión de corte-velocidad de corte.

La graficación de esta relación para un fluido dado recibe el nombre de reograma. En estos reogramas se observan las diferencias existentes entre los fluidos Newtonianos y los no Newtonianos. De aquí se observa que, la relación está dada por una curva y no por una línea recta, y el fluido exhibe una tensión de cedencia. Como la viscosidad es definida como la tensión de corte dividida por la velocidad de corte, se puede diferenciar que el reograma perteneciente a un fluido no Newtoniano, la viscosidad no es constante con respecto a la velocidad de corte, tal como ocurre para los fluidos Newtonianos.

Con el fin de determinar exactamente los reogramas de los fluidos de perforación no Newtonianos, es necesario el uso de un viscosímetro FANN 35. No existen ecuaciones matemáticas que reproduzcan la reología de los lodos en su totalidad, pero se han propuesto ciertas ecuaciones que en cierta manera se aproximan a las complejas relaciones entre tensión de corte y la velocidad de corte. Estas ecuaciones reciben el nombre de modelos reológicos. En esta sección se consideran tres de ellos:

- El Modelo Plástico de Bingham
- La Ley Exponencial
- La Ley Exponencial Modificada



**Figura II.2 Clasificación de los modelos reológicos**

### **El Modelo Plástico de Bingham**

Es el modelo más utilizado en el campo, y en el tratamiento del lodo por su simplicidad. Este modelo se apoya en los datos suministrados por el uso de un viscosímetro FANN, y las lecturas en su dial a 600 RPM y 300 RPM, estas lecturas se grafican en coordenadas

rectangulares y se unen en una línea recta, la cual viene dada por el valor de la pendiente y su corte con la ordenada en el origen.

Los parámetros considerados en este modelo son la viscosidad plástica (VP) y el punto de cedencia (PC). Estos valores se determinan fácilmente de las lecturas en el dial del viscosímetro FANN,  $F_{600}$  y  $F_{300}$  a 600 y 300 revoluciones por minuto respectivamente, las ecuaciones viene dada por:

$$VP = F_{600} - F_{300} \quad \text{Ecuación I.2}$$

$$PC = F_{300} - VP \quad \text{Ecuación I.4}$$

El viscosímetro utilizado es diseñado de manera que las unidades en estas ecuaciones vengan dadas para la VP en centipoise y el punto cedente en lb/100 pies<sup>2</sup>.

La ecuación de la recta antes mencionada que describe el modelo puede expresarse en términos de los parámetros señalados:

$$F = PC + (VP/300) R \quad \text{Ecuación 1.5}$$

Donde PC representa el corte con el eje vertical y VP representa la pendiente de la recta.

### **La Ley Exponencial**

El estudio del punto cedente y la viscosidad plástica han demostrado ser los parámetros más importantes para determinar el comportamiento de los lodos, y en los cuales puede basarse su tratamiento. El Modelo Plástico de Bingham presenta algunas imprecisiones, sobre todo a bajas velocidades de corte, donde los valores sobre las tensiones exceden a veces las verdaderas tensiones de corte verificadas en los lodos.

La Ley Exponencial logra disminuir el inconveniente a bajas velocidades de corte del modelo de Bingham. En lugar de graficar en coordenadas rectangulares los datos de las lecturas a 300 y 600 rpm del viscosímetro, se grafican estas, en un papel log-log y de esta manera obtener una línea recta que pasa muy cerca de los puntos restantes, representándolos con una menor incertidumbre con respecto a los valores reales.

En la grafica de papel log-log se obtiene una curva exponencial, con una ecuación algebraica de forma:

$$F = K * R^n \qquad \text{Ecuación I.6}$$

Este modelo es conocido como la ley exponencial, sus parámetros son n y K.

El parámetro n es el índice de comportamiento del flujo laminar. Para un fluido Newtoniano n = 1; para los lodos de perforación es siempre menor a 1. Cuanto más bajo sea el valor de n, menos Newtoniano es el fluido.

El parámetro K es el factor de consistencia del flujo laminar. Se le considera como similar a la viscosidad plástica dado que un aumento de K significará un aumento en la concentración de sólidos o disminución en el tamaño de las partículas. Para mantener los valores de K bajos es necesario un control de sólidos eficiente o la dilución del fluido de perforación.

### **Ley Exponencial Modificada**

La ley exponencial modificada es realizada con el fin de tomar en consideración la tensión de cedencia (cierto grado de resistencia interna que debe ser vencida para que un lodo empiece a fluir). La ley exponencial modificada es similar a la ley exponencial, exepto que toma en cuenta una tensión de cedencia positiva, Go.

Con el uso de un viscosímetro en el laboratorio,  $G_0$  debe tomarse como la lectura estable de 3 revoluciones por minuto. La ley Exponencial modificada viene dada por la ecuación:

$$F = G_0 + K \cdot R^n \quad \text{Ecuación I.7}$$

Como ocurre en la ley exponencial, de donde es parcialmente fundamentada la Ley Exponencial Modificada,  $n$  es una medida de la capacidad del fluido para reducir la viscosidad por efectos de corte y  $K$  es una medida del contenido de sólidos. Estos valores raramente son iguales para las dos leyes exponenciales.

La Ley Exponencial Modificada es un modelo un poco mas complejo pero es la que describe de manera mas eficaz el comportamiento reológico de la mayoría de los lodos

### **II.3 FORMULACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE ACEITE**

Existen ciertos factores que siempre deben tenerse en cuenta al momento de formular un fluido de perforación, esto con el fin de obtener un funcionamiento óptimo y su uso para cada caso específico; se deben tener en cuenta muchos factores con el fin de seleccionar el material a mezclar para obtener propiedades adecuadas como: densidad requerida, hoyo desnudo o revestido, presencia de gas, equipos de superficie, equipos de mezclado, etc. Es importante considerar también el ciclo del lodo y la forma en que se mezcla el material.

Se debe considerar que un lodo con propiedades óptimas para su funcionamiento pueden ser afectadas por una práctica de perforación equivocada. (Prieto, O. Alí 1993).

Los agentes químicos que forman parte en un sistema o de la formulación del lodo pueden clasificarse a grandes rasgos según la función que ellos desempeñan, éstas son:

- a) Dispersantes

- b) Gelificantes: Son los agentes encargados de proporcionar al sistema o al lodo propiedades tixotrópicas (adquirir estructura de gel si se deja en reposo, pero reversible por agitación mecánica) (Manual IMCO).
- c) Controlador de filtrado: Son los materiales que disminuyen la cantidad de filtrado que pasa a la formación cuando el lodo está sometido a una presión diferencial.
- d) Agentes emulsificantes (Surfactantes): Son materiales que van a modificar la tensión interfacial entre sólidos / líquido, estabilizando una fase dispersa en una continua las cuales son inmiscibles, manteniendo estable la fase dispersa en pequeñas gotas.
- e) Humectantes: Su función es evitar la floculación de partículas sólidas dispersas manteniéndolos humedecidos proporcionándole una afinidad con la fase continua y evitando la sedimentación del material densificante.
- f) Material densificante: Son materiales que gracias a su elevada gravedad específica son utilizados para incrementar la densidad del fluido.
- g) Lubricantes: La función es la de reducir el arrastre y el torque en la sarta cuando se realizan operaciones de perforación.
- h) Material de control reológico: Son utilizados con miras de aumentar la habilidad de los mismos de remover los ripios y de suspenderlos cuando se realizan maniobras de perforación. La reología generalmente se logra controlar mediante la concentración del viscosificante primario, aunque en ocasiones es necesario el uso de materiales adelgazantes, dispersantes o desfloculantes, minimizando la atracción, incrementando la dispersión y reduciendo su resistencia al flujo. Como función secundaria de estos materiales es disminuir el filtrado, además de reducir el espesor del revoque.

#### II.4 ADITIVOS PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN TIPO BASE ACEITE (Prieto, O. Alí 1993).

La formulación de emulsiones inversas de tipo W/O, dependen de la combinación de ciertos aditivos para la obtención de condiciones de trabajo requeridas y deseadas para cumplir el plan adjunto de perforación del pozo. En forma general los aditivos y la secuencia en que son incluidos al sistema se presenta a continuación:

Orden preferible de agregado de los materiales (Manual IMCO):

- Aceite(fase dispersante)
- Emulsificante primario
- Controlador de filtrado
- Cal
- Humectante
- Mezcla de cloruro de calcio y agua(Salmuera)
- Arcilla Organofílica
- Barita

El uso de alguno de estos aditivos es opcional y dependerá de la necesidad y la naturaleza de cada uno de ellos.

- **Aceite:** Este aditivo representa la fase continua o fase dispersante, existen en la industria diferentes tipos, entre ellos se encuentran:
- **Aceite Vegetal y ésteres** (Zorrilla, G. 1999): El aceite vegetal es una mezcla de ésteres cuya materia prima es la palma africana, caracterizándose por ser mucho más amigable al medio ambiente por su condición de biodegradable. Los aceites esterificados, además de ser no tóxicos y biodegradables aeróbicamente, se biodegradan bajo condiciones anaerobias. Esta propiedad los distingue de otros aceites usados como fase continua en lodos base aceite. El aceite vegetal es una

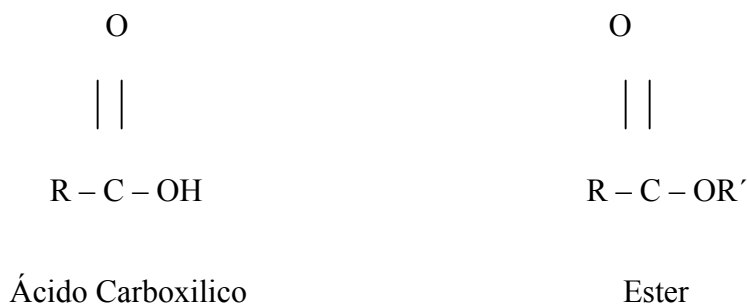


nueva alternativa para ser utilizado en perforaciones con la mayor sinergia con el ambiente y las exigencias sobre este a nivel mundial. Esta mezcla de esteres se obtiene al esterificar los ácidos grasos presentes en el aceite de palma con alcohol isobutílico en un medio ácido con altas temperaturas. Las propiedades del aceite vegetal para preparar losod base aceite se vienen dadas en la tabla I.1.

**Tabla II.2: Propiedades del aceite vegetal (Zorrilla, G. 1999)**

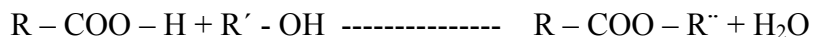
Color	Vino tinto
Gravedad especifica	0,86
Punto de inflamación	363°F
Contenido de aromáticos	Ninguno
Punto de Ebullición	420,8°F
Punto de anilina	547°F

Dentro del concepto de aceite vegetal debemos tener en cuenta lo que son los ésteres, que son derivados funcionales de los ácidos carboxílicos. Estos derivados en los que el grupo oxidrilo (-OH) de un grupo carboxilo es reemplazado por un grupo -OR'. (Morrison y Boyd, 1990).



El comportamiento químico característico de los ácidos carboxílicos está determinado, evidentemente, por su grupo funcional, el carboxilo (-COOH); este grupo se compone de un grupo carbonilo (-CO), y un grupo hidroxilo (-OH). El (-OH) es el que experimenta realmente casi todas las reacciones (perdiendo el H<sup>+</sup> o reemplazo por otro grupo), pero lo hace de un modo que solo es posible gracias a la presencia del (-CO). (Morrison y Boyd, 1990).

Los ésteres son formados por la unión de un ácido carboxílico y un alcohol con eliminación de agua, conteniendo el grupo acilo (-COOR). La reacción típica de esterificación es:



Todos los ésteres se descomponen en agua y, por ello, la reacción de formación entre el ácido y el alcohol no es nunca completa, a menos que se separe el agua que se produce en ella. En muchos casos es suficiente agregar un gran exceso de alcohol para obtener un buen rendimiento en éster; en otros se acostumbra añadir un líquido como el benceno o el tetracloruro de carbono para destilar con él agua. La reacción entre el alcohol y el ácido es muy lenta a la temperatura ordinaria, pero el éster se forma más rápidamente si se opera a temperaturas altas y en presencia de pequeñas cantidades de un ácido como el sulfúrico, el clorhídrico o el bencenosulfónico. (Miall, S. 1956).

- **Aceite Mineral:** Los aceites minerales son destilados de petróleo altamente refinados. Químicamente están compuestos de hidrocarburos alifáticos y aromáticos. Las variedades alifáticas predominan y típicamente existen como cadenas lineales de C<sub>12</sub> a C<sub>20</sub>. El contenido de aromáticos está alrededor de un 20%, lo cual es considerado un valor relativamente bajo comparado con los valores considerados en el diesel, haciendo al aceite mineral un medio menos irritante. En la tabla No. I. 4, se presentan las propiedades del aceite mineral utilizado en los fluidos de perforación.

**Tabla No. II.3 Especificaciones del Aceite mineral utilizado para elaborar lodos invertidos (Prieto, O. Alí 1993)**

Color	Incoloro
Gravedad Especifica	0,80-0,90
Punto de inflamación	150°F
Contenido de aromáticos	<20%
Punto de anilina	302°F

- **Emulsivos:** Dentro de la formulación de los fluidos de perforación es necesario, el agregar una sustancia con características tensoactivas que permitan que el agua se emulsione en aceite formando un sistema de dispersión W/O. Dentro de la segunda sección de este trabajo se comentará más a fondo el comportamiento de estos agentes, su clasificación y una breve descripción de su comportamiento químico.
- **Cal:** La cal es un ingrediente necesario en algunos sistemas base aceite y tiene como función primaria hacer más efectiva la acción del emulsificante y como función secundaria actuar como secuestrador de gas sulfhídrico (H<sub>2</sub>S), y anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>).

La reacción química que se produce con los gases agrios es la siguiente:



Cuando se use un emulsificante se debe agregar cal en una proporción de alrededor 2:1. Es decir, que por cada dos libras del emulsificante se debe agregar una libra de cal. Se debe evitar un exceso de cal en el sistema, debido a que ésta siendo un sólido causa un aumento indeseable de la viscosidad.

El contenido de cal, para operaciones rutinarias de perforación debe ser de 3 a 5 libras por cada barril, pero cuando es usado como protección de posibles arremetidas de H<sub>2</sub>S, los valores varían entre 5 hasta 15 libras por barril para impartir seguridad en la mayoría de los lodos operados en campo. La contaminación masiva con el H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub> consumirá grandes cantidades de cal que generarán cantidades de CaS y CaCO<sub>3</sub> como productos sólidos de la reacción. Por esta razón, cuando se sospeche problemas con H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>, se deben mantener en una concentración de cal adecuada que permita luego su control o su remoción (Prieto, O. Alí 1993).

- **Humectantes:** En un sistema base aceite, es necesario que la superficie de los sólidos se encuentre humedecida con aceite evitando que se formen costras y salgan fuera de la suspensión. Estos materiales tienen terminaciones hidrofílicas que atrapan los sólidos y los envuelven en una película de aceite, haciéndolos preferencialmente humedecidos por aceite.

Es bueno recordar que la mayoría de los minerales son preferencialmente humedecidos por agua, incluyendo la barita que es usada para incrementar la densidad en sistemas base aceite. Este material es especialmente susceptible a la aglomeración o a la formación de costras en sistemas base aceite si el agua no está bien emulsificada y sus partículas no se encuentran envueltas de una película de aceite (Azar J. J. y Lummus, J.L. 1986).

- **Agua:** El agua forma parte de los lodos de perforación base aceite, consiste en pequeñas gotas (generadas por agitación) que se hallan dispersas y suspendidas en el aceite, comportándose como una fase sólida. La adición de emulsificadores hace que el agua se emulsifique en aceite, constituyendo un sistema estable.

La suspensión de agua en lodos base aceite ayuda a aumentar la viscosidad y la fuerza de gel. Esto se debe a que se comporta como un sólido en el sistema (Prieto, O. Alí 1993).

Debe existir un proceso de agitación inicial lo suficientemente eficiente para que el agua se separe en pequeñas gotas y estas se dispersen en la fase continua (aceite). A medida que las gotas poseen un menor tamaño la emulsión se hace más estable y la posibilidad de estas coalescan. Si la cantidad de aceite es aumentada la estabilidad se ve incrementada ya que la distancia existente entre las gotas dispersadas es mayor.

Al agregar agua a un sistema emulsionado, disminuye la estabilidad del sistema debido que la distancia entre las gotas se hace menor, aumentando el riesgo de que las gotas se junten y coalescan.

- **Arcilla Organofílica:** Los lodos base aceite a pesar de que por lo general son viscosos, poseen baja capacidad suspensiva en comparación con los lodos base agua, lo que contribuye al asentamiento del material densificante, en particular si este no está humedecido adecuadamente (Prieto, O. Alí 1993).

Las arcillas tales como montmorilonita, saponita, atapulgita y la illita que son de carácter hidrofílico pueden convertirse en sólidos dispersados en aceite a través de la adsorción de aminas salinas (Azar J. J. y Lummus, J.L. 1986).

Mediante un proceso de intercambio catiónico, la arcilla que es hidrofílica, reacciona con las sales de amina, formando un producto que se dispersa en aceite. Gracias a la agregación de estas aminas se forman las llamadas arcillas organofílicas las cuales son capaces de desarrollar buenos geles, de aumentar la viscosidad y el punto cedente en los lodos base aceite; estas generalmente son preparadas a partir de bentonita o atapulgita, esta última si se necesitan grandes incrementos en la viscosidad (Prieto, O. Alí 1993).

- **Material densificante:** La barita es el principal material densificante usado en los sistemas base aceite (Azar J. J. y Lummus, J.L. 1986). Estos materiales que cuando están suspendidos en un fluido de perforación, incrementan la densidad del fluido, permitiendo el mejor control de la presión de la formación. Otros materiales como óxido de hierro, hematita, tuvieron popularidad como agentes densificantes pero a parte de su gravedad específica es necesario considerar factores como cantidad de sólidos, abrasividad, daño a la formación, costos, disponibilidad, etc.

## II.5 TEORIA DE LAS EMULSIONES

### II.5.1 EMULSIONES

Existen diferentes visiones de cómo debe ser manejada la definición de lo que significa una emulsión, en ocasiones el trato de estos sistemas son considerados dentro de una ciencia aparte, debido a su complejidad y a la diversidad de conclusiones en ciertos trabajos de investigación. Ciertos factores son los puntos de partida para la existencia de estas divergencias, entre las cuales se consideran: tipos de fase dispersa y fase dispersante, tamaños de la partícula, distribución estadística, proceso de formación de la emulsión, viscosidad de agentes activos entre otros.

Una dispersión es un sistema polifásico en el cual una fase se encuentra en forma fragmentada (fase dispersa) dentro de otra (fase continua). Existen varios tipos de sistemas dispersos y cada uno tiene una denominación particular.

Aquí se consideran las dispersiones cuya fase continua es un líquido. Una dispersión de gas en un líquido es una espuma, la dispersión de un sólido en un líquido se llama suspensión, mientras que la dispersión de un líquido en otro líquido inmiscible es una emulsión. (Salager, Jean Luis 1999).

En general una emulsión es una mezcla de dos líquidos inmiscibles mutuamente, o sea, dos líquidos que no se mezclan en condiciones normales, formando un sistema heterogéneo que

esta formado por un líquido íntimamente disperso en otro, en forma de gotas cuyos diámetros en general se encuentran en el rango de  $0,01\mu$  a  $50\mu$  ( $1\mu = 10^{-6}$  m) (García, O 1981). Estas gotas se comportan como sistemas termodinámicamente inestables y su estado puede ser mejorado del punto de vista cinético, mediante la adición de aditivos que sean capaces de absorberse en la interfase líquido – líquido y así mantener la dispersión.

Es importante destacar el tamaño de las partículas de la fase dispersa, ya que el comportamiento de la dispersión y su efecto depende en buena parte del tamaño de las gotas. Si las gotas son de tamaño inferior al micrómetro pero netamente superior al tamaño de una molécula, las dispersiones son llamadas coloides.

Esencialmente la definición de coloides, es el límite superior de tamaño donde a partir de la cual ocurre la sedimentación gravitacional. Si no existe la separación por sedimentación se habla de una solución o suspensión coloidal. Al contrario, los sistemas que se separan por sedimentación (cualquiera sea el tiempo) se denominan espumas, emulsiones o suspensiones (Salager, Jean Luis 1999).

## **II.5.2 COMPOSICIÓN DE UNA EMULSIÓN**

Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales esta dispersa en otra, y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante.

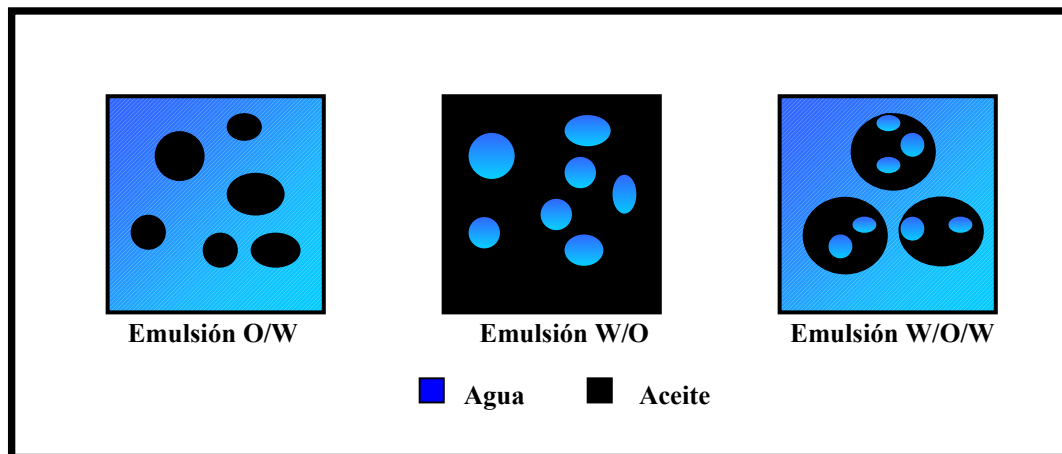
En ausencia de un agente surfactante, la dispersión líquido-líquido coalesce rápidamente. En presencia de un agente emulsionante la segregación gravitacional es notablemente retardada, lo cual podría variar de minutos a algunos años.

### II.5.3 TIPO DE EMULSIONES

En la mayoría de los casos en los cuales se produce una emulsión, uno de los líquidos es una fase acuosa y el otro una fase aceite u orgánica.

Si la emulsión contiene gotas de aceite (O) dispersadas en agua (W), se la llaman emulsiones normales (O/W). Si la fase dispersa es el agua, se le llama emulsión inversa (W/O).

Existen casos más complejos, pero de menos interés para nosotros, como es el caso de cuando las gotas de aceite de una emulsión (O/W) contienen en su interior gotitas de agua, se dice que se tiene una emulsión (W/O/W). Estas generalmente ocurren de forma espontánea y en circunstancias especiales. En la figura II.3 se pueden ver un diagrama de la apariencia de los diferentes tipos de emulsiones.



**Figura II. 3 Tipos de emulsiones**

#### II.5.3.1.- Emulsiones de aceite en agua

La fase interna o fase dispersa esta representada por el aceite y la fase continua o externa por la fase acuosa. Este tipo de emulsiones son dispersables en agua y son producidas por



agentes emulsionantes que son más solubles en la fase externa (fase acuosa) que en la fase aceite.

Los surfactantes requeridos para realizar este tipo de emulsiones deben poseer alta hidrofiliidad (afinidad con el agua), son los llamados hidrofílicos.

### **II.5.3.2.- Emulsiones de agua en aceite**

Son una dispersión de agua o una solución acuosa en un líquido inmiscible tipo aceite. Estas son estabilizadas por surfactantes mayormente solubles en la fase continua o externa (aceite), estos tienen poca hidrofiliidad, son los llamados hidrofóbicos.

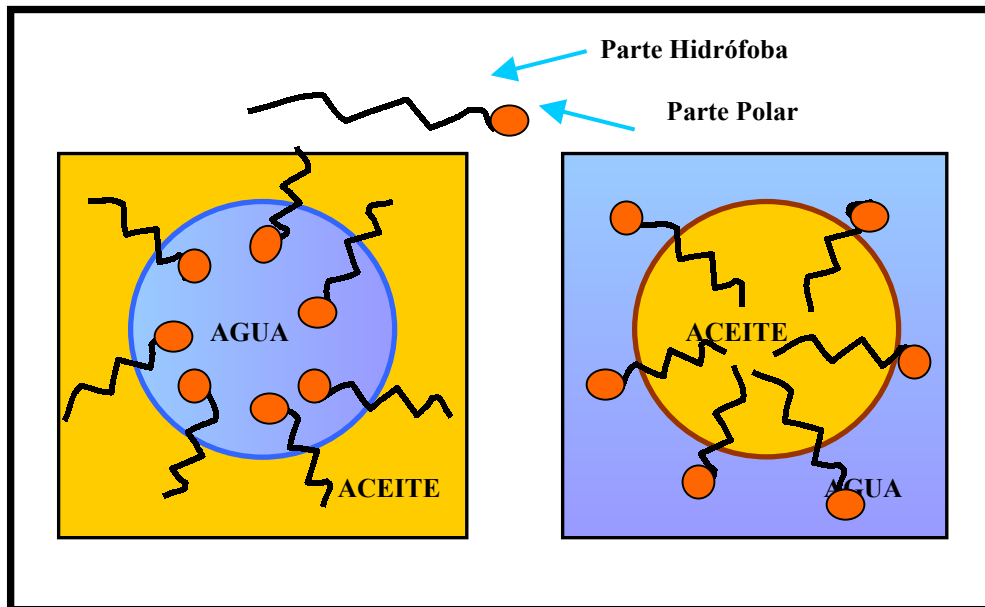
## **II.6 SURFACTANTES**

Como requisito no único para que ocurran las emulsiones mencionadas es necesario que exista un agente que permita las condiciones para que dos líquidos sean capaces de formar un sistema estable.

Estas sustancias son denominadas agentes surfactantes, que poseen un carácter tensoactivo acumulándose o concentrándose en la interfase, provocando una alteración en la tensión interfacial. Su carácter químico los califica como sustancias anfífilas, es decir, que posee poca afinidad y desde el punto de vista físico-químico se define como una dualidad polar-apolar.

La parte polar presenta afinidad por solventes polares, en particular agua, y es la parte hidrofílica; por el contrario el grupo apolar se denomina lipofílica o hidrofóbica y tiene por supuesto afinidad con el aceite.

Las moléculas de tipo anfífila muestran una fuerte tendencia a migrar hacia la interfase y ubicarse de forma tal que su grupo polar se encuentre dentro del agua y su grupo no polar se oriente hacia el componente orgánico.



**Figura II.4 Micela**

La porción más grande de la molécula definirá su carácter y en que medio se solubilizará.

Los surfactantes se pueden clasificar según su afinidad en, hidrofílicos cuando presentan afinidad por el agua y lipofílicos cuando presentan afinidad por el aceite.

Por su naturaleza química se pueden clasificar en iónicos y no iónicos. Dentro de los iónicos están los aniónicos las cuales están compuestas por un anión anfifílico y un catión que generalmente es un metal o un ión cuaternario, y los cationicos donde en solución se disocian en un catión anfifílico y un anión por lo general halogenuro.

Los no iónicos están compuestos por una parte hidrofílicas no ionizada que puede ser un alcohol, éster o éter. Son de gran importancia, se usan como detergentes, agentes humectantes y emulsionantes.

Los anfotéricos se combinan en una sola molécula, un grupo aniónico y otro catiónico, como aminoácidos y fosfolípidos (alto costo).

Se pueden clasificar de acuerdo a su origen en naturales y los comerciales y sintéticos.

Los naturales son aquellos que forman parte de la composición química original de alguna de las dos fases inmiscible y que muestran su actividad interfacial cuando ambos líquidos entran en contacto dada una formulación global.

Los comerciales y sintéticos son los obtenidos por reacciones químicas de funcionalización de hidrocarburos, derivados y aquellos generados en procesos catalíticos y de polimerización.

### **II.6.1.- Formación de emulsiones (Salager, Jean Luis 1999).**

Existen tres componentes básicos en una emulsión agua-petróleo, la fase interna y una fase externa o continua, además del agente emulsificante que logra estabilizar la dispersión. Sin la presencia de alguna de estas sería imposible la formación de una emulsión estable. Las condiciones pueden resumirse en:

- Los líquidos deben ser inmiscibles entre sí.

- Debe existir suficiente agitación para dispersar un líquido en forma de gotas en el otro. Las emulsiones no se forman espontáneamente, por lo que hay que generar cierto trabajo en el sistema, este trabajo es generado por la turbulencia o agitación producida por los equipos de mezclado.

- Presencia de agente emulsificante, que pueden ser una combinación de materiales tenso-activos, cualquiera sea su naturaleza, pero que sea compatible a las fases presentes. Los agentes emulsificantes tienen una atracción natural, la cual resulta en una membrana elástica formada alrededor de las gotas, previniendo que las gotas se unan y se decanten por gravedad.

## II.6.2 Estabilidad de las emulsiones (Salager, Jean Luis 1999)

Para mantener la estabilidad de la emulsión formada es necesario considerar factores como:

- Tamaño de las gotas: El tamaño de las gotas viene determinado por el tipo y severidad de la agitación. Mientras más severa es la agitación en un sistema, mayor será la acción cortante, menor será el tamaño de las gotas y menor será el efecto de tensión superficial a vencer entre las dos fases, contribuyendo así a la estabilidad de la emulsión.

- Tipo de agente: Esta relacionado con la migración de este hacia donde se encuentra la interfase, su forma de distribución, su compatibilidad o afinidad química con las fases presentes.

- Porcentaje de la fase dispersa: La cantidad de la fase dispersa guarda relación directa con la agitación y la estabilidad de la emulsión, al aumentar la cantidad de fase dispersa disminuye la estabilidad de la emulsión.

- Viscosidad de las fases: Una fase externa más viscosa será más capaz de mantener en suspensión gotas más grandes que otro de viscosidad más baja.

- Densidad: A medida que la diferencia en densidad entre los valores de aceite y agua se agranda mayor será la acción de la gravedad disminuyendo la estabilidad de la emulsión.

- Temperatura: Un incremento de la temperatura puede traer varios efectos, un aumento de la temperatura disminuye la viscosidad del aceite ayudando así a la fácil coalescencia de las gotas de agua, además, la membrana que rodea a la gota con el aceite emulsificante es debilitada o rota debido a la expansión del agua y consigo el decrecimiento de la eficiencia del agente emulsificante.

### II.6.3 VISCOSIDAD DE LAS EMULSIONES (Salager, Jean Luis 1999)

La viscosidad de una emulsión depende de numerosos factores, algunos con carácter físico mas o menos determinados, otros de tipo físico-químico que solamente ahora empiezan a entenderse, gracias a nuevos trabajos de investigación y sus innovadores progresos.

- Viscosidad de la Fase Externa: Existe una relación directa de proporcionalidad entre la viscosidad de la fase externa, la cual generalmente contiene al emulsionante. Esta consideración hace que se obvие a bajas proporciones la fase interna, cuando la presencia de las gotas produce solo una interacción adicional.
- Porción de la fase interna: Es perfectamente razonable desde el punto de vista intuitivo, considerar que con un mayor número de gotas, mayores interacciones entre gotas y fase externa aumentando la viscosidad.
- Tamaño de las gotas: El tamaño de las gotas y su distribución tienen una influencia sobre la viscosidad de las emulsiones. Sin embargo estudiar estos factores resulta imposible, ya que para variar estos tamaños o distribución es necesario variar estos factores como la tensión interfacial o el tipo y concentración del surfactante.

En general podría decirse que cuanto menor sea el tamaño de gota, mayor será la viscosidad, y cuanto más amplia sea la distribución del tamaño de gota, menor será la viscosidad.

- Viscosidad de la fase interna: En general si la viscosidad de la fase interna es mucho mayor que la viscosidad de la fase externa, el movimiento es en general despreciable igual que su efecto sobre la viscosidad. Se debe puntualizar que a menor viscosidad de la fase interna en general es menor el diámetro de las gotas (para una agitación dada); por lo tanto puede producirse un efecto de aumento aparente de la viscosidad de la emulsión cuando disminuye la viscosidad de la fase

interna, no por baja viscosidad de fase interna, sino por el menor tamaño de las gotas en la emulsión.

- Efectos electroviscosos: Este viene asociado al presentarse una doble capa eléctrica en el exterior de las gotas, el movimiento entre dos gotas de la fase externa puede venir retrasado por fenómenos electroviscosos.

Podría explicarse como un aumento aparente del volumen de la fase interna hacia el volumen de la fase externa, solvatando a esta última.

### III.- METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los materiales y equipos existentes usados en el Laboratorio de Fluidos de Perforación y Cementación (LFPC), utilizados con el fin de poder analizar las propiedades de los fluidos de perforación y cumplir con los objetivos fijados en este estudio. Se revisarán los pasos para el manejo de cada uno de los equipos y se reseñará la metodología experimental seguida.

#### III.1- MATERIALES UTILIZADOS

Con el fin de realizar el trabajo de investigación planteado, se dispusieron de ciertos materiales que se encuentran a disposición comercialmente por las diferentes compañías proveedoras de los aditivos necesarios para la formulación de un sistema.

**TABLA III.-1: Materiales Usados**

<b>Material</b>	<b>Nombre Comercial</b>	<b>Suministrado</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Función</b>
Aceite Mineral	Vassa	LFPC	0,816	Fase Dispersante
Aceite Vegetal	Green-oil	LFPC	0,86	Fase Dispersante
Controlador de Filtrado	TruFlo100	LFPC	1,03	Regulador de Filtrado
Arcilla Organofílica	VG-69	LFPC	1,57	Gelatinizante
Densificante	Barita	LFPC	4,2	Aportar Peso al sistema
Cloruro de Calcio	CaCl <sub>2</sub>	LFPC		Presión Osmótica
Cloruro de Sodio	NaCl	LFPC		Presión Osmótica
Agua	H <sub>2</sub> O	-----	1	Fase Dispersa
Emulsivo y Humectante	Z – Trol 60	Poly Acid	0.915	Emulsivo y Humectante

### III.2.- Z – TROL 60

En esta sección se hará una breve descripción del producto utilizado con miras a su incorporación dentro de un fluido de perforación 100% aceite y emulsiones inversas, con propiedades que permitan su operabilidad en el campo. Un pequeño boletín técnico del producto puede resumirse en:

#### III.2.1.- DESCRIPCIÓN:

El Z – TROL 60, es un emulsivo y un agente humectante para la formulación de emulsiones inversas, formulado con la virtud de ser especialmente para su uso a altas temperaturas.

#### III.2.2.- PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS:

**Tabla III.2 Propiedades físico – químicas del Z – Trol 60**

<b>Apariencia</b>	Líquido de color Ambar
<b>Naturaleza química</b>	Mezcla de ácidos grasos e imidazolininas modificadas
<b>Gravedad específica</b>	0,90 – 0,93
<b>Visc. Brookfield @ 50 rpm y 25°C</b>	Máximo 1500 cp
<b>Indice de acidez</b>	Máximo 50
<b>Indice de amina</b>	Máximo 10



### **III.2.3.- APLICACIONES**

El Z – TROL 60 promueve de manera efectiva la humectación en aceite del material densificante y acelera el proceso de emulsión. Puede usarse para estas funciones en diferentes medios: aceites diesel, aceites minerales, aceites de bajo contenido de aromáticos y aceites sintéticos.

### **III.3.- EQUIPOS**

Para la elaboración de los fluidos de perforación se deben utilizar diversos equipos, que se encuentran en el Laboratorio de Fluidos de Perforación, de la Escuela de Petróleo, Facultad de Ingeniería UCV, entre ellos se tienen:

- Balanza electrónica, marca Denver Instrument Company, modelo TR-603D.
- Balanza estándar para lodos, marca Baroid.
- Agitador (Multimixer), modelo 9B.
- Viscosímetro rotatorio, marca FANN, modelo 35<sup>a</sup>.
- Kit de retortas, marca Baroid Testing Equipment, modelo 781.
- Equipo de alta-presión y alta-temperatura, marca OFI Testing Equipment inc., serial 99-19.
- Horno de rodillos rotatorios para envejecimiento, marca Baroid Testing Equipment.
- Celdas de envejecimiento, marca Baroid Testing Equipment, modelo 9D.

- Tester para estabilidad eléctrica, marca FANN, modelo 23D.

### III.4.-DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

En esta sección se describen de manera sencilla los equipos utilizados en la formulación del lodo de perforación.

**Balanza electrónica:** este es el aparato donde después de realizar las formulaciones se va a cuantificar la cantidad de aditivos que se van a adicionar a los sistemas diseñados. El equipo posee una densidad de 0,001.



**Figura III.1 Balanza electrónica**

**Balanza estándar para lodos:** Este equipo es utilizado para determinar la densidad de los fluidos de perforación, posee aplicaciones en campo y en operaciones de laboratorio mide la densidad del fluido en lbs/gal con una precisión de 0.1 lpg.

Esta constituido por una base de soporte, un recipiente con tapa, un brazo graduado con



caballete móvil y en el punto de apoyo una burbuja de nivel.

### **Figura III.2 Balanza para lodos**

**Agitadores:** Es el equipo que aporta la potencia permitiendo por medio de la agitación mecánica, el mezclado eficiente de cada uno de los aditivos a utilizar.

El equipo posee 5 unidades giratorias que funcionan como mezcladores, cada una de ellas posee un agitador vertical con aspas concéntricas en su eje permitiendo un eficaz medio para el mezclado.

Los vasos para mezcla son denominados mixers y se pueden mezclar en los agitadores de manera simultánea.



### Figura III.3 Agitadores multimixer

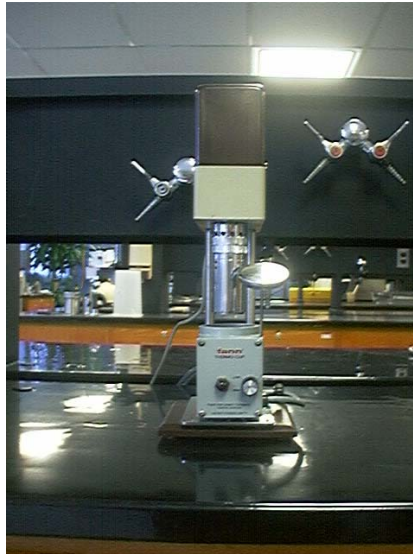
**Viscosímetro FANN:** La viscosidad plástica, el punto cedente y la fuerza de gel son propiedades reológicas, y deben ser seguidas con especial atención. Para determinar estos valores se usa un viscosímetro rotacional de 6 velocidades (Lopez, Rolando). Con este aparato se nos permite mediante cálculos sencillos y las lecturas directas los valores de las propiedades mencionadas.

El viscosímetro posee un espacio anular entre dos cilindros que permite determinar las propiedades reológicas del fluido.

El funcionamiento proporciona lecturas a velocidades variables, gracias a la potencia aportada por un motor integrado.

Su funcionamiento es el siguiente: en el espacio anular entre los dos cilindros concéntricos queda confinada con una delgada capa de muestra de líquido, el externo o camisa exterior gira a la velocidad indicada por el dispositivo manual de velocidades y este movimiento produce cierta torsión sobre el cilindro flotante interno, su movimiento está restringido por un resorte de torsión y un dial conectado que registra el desplazamiento del flotante del; lodo que se encuentra en contacto íntimo dentro de una copa y a una temperatura de 150°F.

El aparato viene con velocidades nominales de: 3, 6, 100, 200, 300 y 600 RPM, seleccionables a voluntad, arrojando lecturas correspondientes a los esfuerzos de corte en unidades de  $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$



**Figura III.4 Viscosímetro FANN**

### **Equipo de Alta presión-Alta Temperatura**

En las operaciones de perforación ocurren dos tipos de filtraciones; una filtración dinámica y otra estática (Lummus, J. 1986). Esta asociada con el fluido que pasa a la formación permeable a través de un filtro o revoque.

Entre los factores que afectan la pérdida de filtrado, se encuentran tanto el tipo, cantidad y el tamaño de los sólidos presentes, además de la compresibilidad del revoque, por esta razón se justifica el uso de la prueba AP- AT a los fluidos de perforación para determinar el efecto en el sistema cuando esta sometido a un diferencial de presión y alta temperatura. Otra razón por la cual es importante llevar a cabo la prueba de filtrado estático, es que nos da una indicación del estado de las emulsiones. Si el filtrado recogido se obtiene la separación de las dos fases (agua y aceite), se puede concluir que la emulsión ha sido destruida, por los efectos de de la temperatura a la cual ha sido sometida, o bien que la cantidad o la combinación de agentes emulsivos y humectantes no son capaces de soportar los sólidos inmersos atentando entonces contra la estabilidad del sistema.

La prueba de filtrado estático a alta presión y alta temperatura se efectúa a una temperatura de 300°F (149°C) y con un diferencial de 500 lpc.

El equipo usado puede ser descrito a groso modo mencionando las siguientes partes:

- Camisa de calentamiento, con dispositivo para la selección de temperatura.
  
- Celda de acero para la colocación de la muestra con una capacidad de trabajo de presiones de más de 1000 lpc, además de un área de filtrado de 3,5 pulgadas.
  
- Válvulas de seguridad, adaptadas a las celdas de acero que permiten el paso o no de fluido a través de ellas solo con abrirlas o cerrarlas.
  
- Termocuplas capaces de soportar temperaturas de 500°F.
  
- Set de manómetros con reguladores dando la posibilidad de seleccionar presiones de trabajo de hasta 1000 lpc.
  
- Bombona de nitrógeno que funge como la fuente de presión a suministrar al sistema.
  
- Válvulas de flujo, ellas permiten en combinación con las válvulas de seguridad, el paso o no de la presión proveniente de la fuente.
  
- Cilindros graduados, usados como receptores del fluido provenientes de la prueba (filtrado).



**Figura III.5 Equipo de filtrado AT - AP**



**Figura III.6 Celda contenedora de lodo para equipo AT - AP  
Tester de Estabilidad Eléctrica**

En pruebas de laboratorio la medición de la estabilidad eléctrica esta asociada a las emulsiones inversas, o sea lodos de base aceite con agua como fase dispersa.

Con la medición de esta propiedad se puede estimar si la emulsión creada es o no buena. Pruebas de laboratorio indican que la estabilidad de una sustancia 100% agua es de cero y de una 100% aceite es de 2000 voltios, valores intermedios pueden indicar emulsiones de una sustancia en la otra. Valores de estabilidad eléctrica de menos de 400 voltios pueden indicar que la emulsión de agua en aceite no es buena, marcando una posible problemática en la humectabilidad de los sólidos, disminuyendo el espacio y ocasionando el acercamiento de las gotas de agua emulsionadas.

En operaciones de campo las variaciones de las mediciones de la estabilidad eléctrica pueden ser indicativas de la adición de agua al sistema cuando se perfora, lo que podría significar el cambio de relación de trabajo del fluido de perforación.



**Figura III.7 Medidor de estabilidad eléctrica**

### **Kit de retortas**

Es usada para determinar la cantidad de líquidos y sólidos que se encuentran en el sistema, se pueden utilizar en emulsiones inversas para ver la proporción real entre sólidos, aceite y agua.



Está constituida por una cámara de acero de aproximadamente 10 cc, llena de fluido de perforación, esta es calentada y gracias a la condensación de los líquidos vaporizados que son recolectados en un cilindro, se mide el volumen directo en porcentaje y el volumen ausente representa el porcentaje de sólidos.



**Figura III.8 Retorta**

### **Horno de Envejecimiento Dinámico**

Esta prueba es usada, para predecir el comportamiento, de un fluido de perforación una vez que éste ha sido circulado (simulando condiciones de temperatura, movimiento en el fondo del pozo).

El envejecimiento ocurre en un horno, en celdas de acero con temperaturas de 300°F y tiempos de 16 horas en movimiento para lodos base aceite.

Consta de cuatro rodillos horizontales en forma paralelas, que transmiten el movimiento a las celdas gracias al acción de un motor externo, activado en su tablero de control, en éste también se encuentra el interruptor de calentamiento y un regulador que permite seleccionar de la temperatura entre 150 y 550°F.



**Figura III.9 Celda de envejecimiento**



**Figura III.10 Horno d envejecimiento**

### **III.5 Procedimiento experimental**

Como en cualquier trabajo de investigación donde esté incluido la agregación o el uso de un producto y su comportamiento, cuando éste es integrado a un sistema, es necesario la formulación, preparación y reformulación en caso de ser necesario del sistema, en este caso, fluido de perforación base aceite.

Dentro de este estudio, debemos consideramos sistemas 100% aceite mineral, y las relaciones volumétricas de 90/10, 80/20, 70/30, entre agua y aceite, tanto para el aceite mineral, como para el éster extraído de la palma aceitera, de densidad 12 lpg.

Después de esta primera etapa, el fluido de perforación es sometido a una serie de pruebas con el fin de determinar sus propiedades más representativas para su aplicabilidad en el campo.

A cada uno de los lodos preparados se le verificará su densidad, se realizarán estudios de sus propiedades reológicas, se determinará el valor de su estabilidad eléctrica, luego se realizará la prueba de filtrado estático a alta presión y alta temperatura; posterior a esto se envejecieron en un horno dinámico simulando condiciones de pozos, para luego realizar las pruebas anteriores y ver la variación de su comportamiento. El procedimiento a seguir para el uso de cada equipo esta descrito en el apéndice1.

A continuación se muestra un esquema de los pasos a seguir para la realización de este trabajo y cumplir los objetivos planteados, se dividieron en varias etapas, que fueron seguidas paso a paso

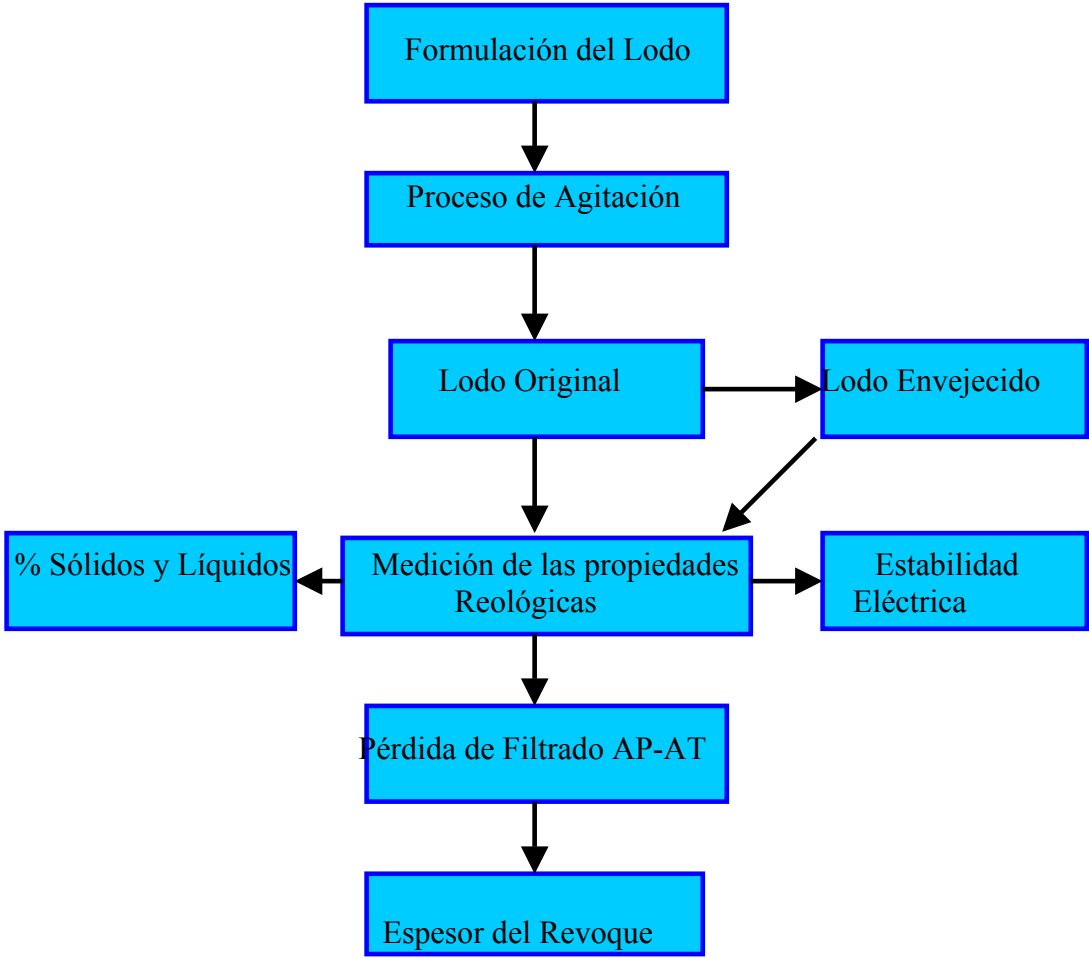


Figura III.11 Procedimiento experimental utilizado

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos en este estudio, así como la discusión de los mismos. Enfocándonos en el aporte del producto Z-Trol 60, en aspectos como: limpieza del hoyo (punto cedente), capacidad de suspensión, pérdida de filtrado y espesor del revoque; cada una de ellas como propiedades fundamentales para la aplicabilidad del sistema en el campo. Esta sección se dividirá en dos partes, una para cada fase dispersante utilizada, el aceite mineral y el éster extraído de la palma aceitera. Presentándose los resultados más representativos en cada uno de ellos y una comparación con las propiedades de algunos lodos con operatividad en el campo

##### IV.1 Emulsión Aceite Mineral/Agua 80/20

A continuación se muestra la formulación y los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio al sistema aceite mineral / agua (80 / 20).

**Tabla IV.1. Formulación del sistema aceite mineral / agua (80 / 20) con un peso de 12 lpg.**

Componentes	Gravedad Específica	Masa (lbs / bbl)	Tiempo de Agitación (min)
Aceite mineral	0,816	177	---
Arcilla Organofílica	1,57	8	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm de CaCl <sub>2</sub>	1,18	54,5 13,625	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	237,27	20

**Tabla IV.2 Resultados de las pruebas aceite mineral/ agua 80/20 con 10lb/bbl de  
Z - Trol 60**

<b>Propiedades</b>	<b>Antes de Rolado</b>	<b>Después de Rolado</b>
Densidad [lpg]	12,2	12
Viscosidad plástica [cp]	22	33
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	9	16
Viscosidad Aparente [cp]	26	41
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	4	7
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	8	11
Estabilidad Eléctrica [volt]	915	830
Pérdida de filtrado ATAP [cc]	2	4
Espesor del revoque [1/32"]	2	2
Relación (O/W)	82 / 28	83 / 27

#### **IV.1.1 Comportamiento de la densidad**

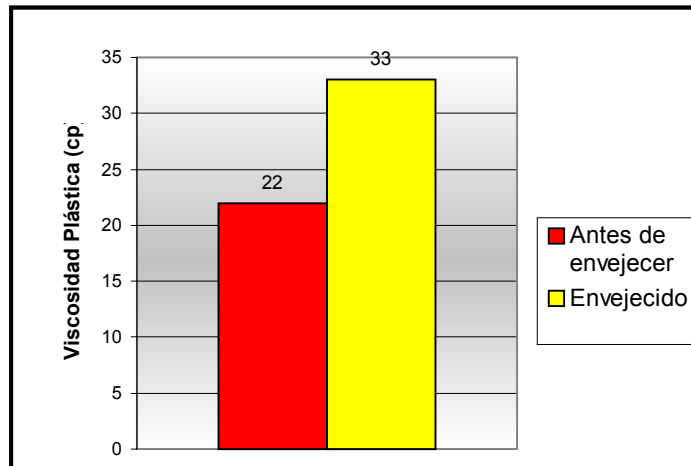
La densidad tiene que ser considerada una propiedad casi invariable antes y después de que el sistema sea sometido al proceso de envejecimiento; es indicativa de que tan exacto resultó el balance de masa en la formulación de los lodos.

Los resultados experimentales mostraron una mínima variación en su valor original de 12,2 lpg, a un valor de 12,1 lpg cuando fue envejecido, lo que puede atribuirse a errores de pesaje causado por la incertidumbre del equipo, la manipulación de sólidos y el escurrimiento de líquidos en los envases utilizados.

#### IV.1.2 Propiedades reológicas.

Dentro de esta sección se discutirán los valores de las propiedades reológicas y sus cambios cuando el lodo ha sido envejecido.

##### IV.1.2.1 Viscosidad plástica.



**Figura IV.1 Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10 lb/bbl de Z – Trol 60.**

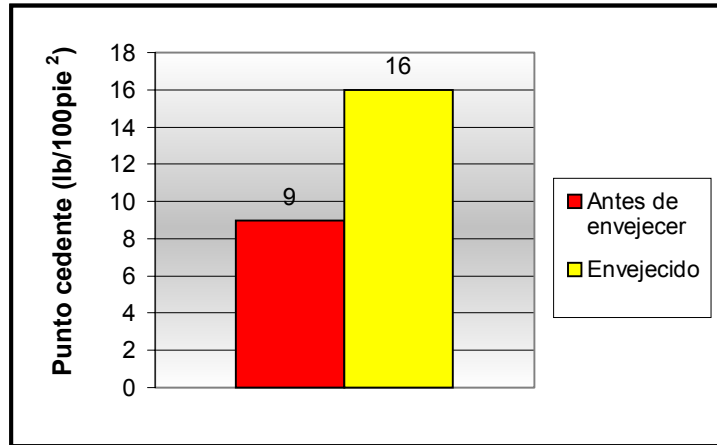
El valor de la viscosidad plástica del lodo original con un de 22 cp se vio incrementado hasta un valor de 33 cp, obtenido cuando el lodo fue envejecido.

El fluido de perforación cuando fue sometido al proceso de envejecimiento, estuvo sujeto a esfuerzos de corte y a altas temperaturas durante prolongado tiempo, causando un efecto desequilibrante; el Z – Trol 60 que es el encargado de emulsionar y humedecer los sólidos presentes en el sistema vio afectada su eficiencia, permitiendo que las partículas de arcilla y materiales sólidos se acerquen, haciendo que estas no se encuentren debidamente dispersas, lo que aumento la interacción entre ellas y los otros sólidos haciendo incrementar la viscosidad plástica. (Azar, J. y Lummus, J. L. 1984).

El efecto causado entre los sólidos y sólidos, se vio reflejado por la mayor cantidad e irregularidad de forma de estos que fue generada al estar sometidos al movimiento y al

desgaste motivado por la fricción, convirtiéndose en causas conjuntas del aumento de la viscosidad plástica.

**IV.1.2.2 Comportamiento del punto cedente.**

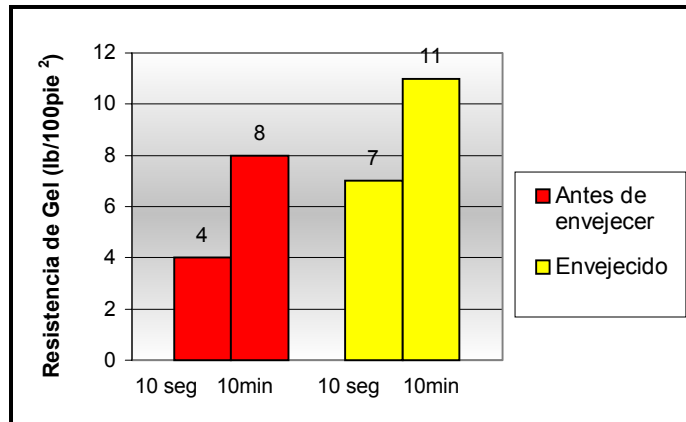


**Figura IV.2 Comportamiento del punto cedente en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10 lb/bbl de Z – Trol 60.**

El valor del punto cedente se vio incrementado de 9 a 16 lb/100pie<sup>2</sup>, lo que indica que fueron activadas las cargas electroquímicas presentes en los aditivos del lodo, cuando el lodo fue sometido a una temperatura de 300°F durante 16 horas. El punto cedente fue atribuido a la acción de las cargas en las partículas de arcilla organofílica, que debido a la acción de las condiciones de la prueba perdieron parte de su humectabilidad de las partículas en aceite, confinándose, lo que les permitió una asociación de cargas electroquímicas a condiciones dinámicas.



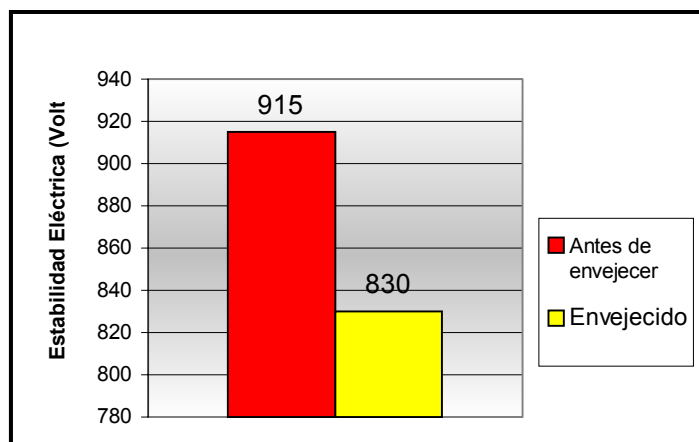
**IV.1.2.3 Comportamiento de la fuerza de gel.**



**Figura IV.3 Comportamiento de la resistencia de gel en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10 lb/bbl de Z – Trol 60.**

El aumento reflejado dentro de los valores de la fuerza de gel fue atribuido a las mismas causas que generaron el aumento en los valores del punto cedente, sólo que en condiciones estáticas tanto para un tiempo de 10 segundos como para 10 minutos, original y después de rolado. Los valores de la fuerza de gel se encuentran dentro del rango de geles favorables (Azar, J. y Lummus, J. L. 1984), antes y después del envejecimiento.

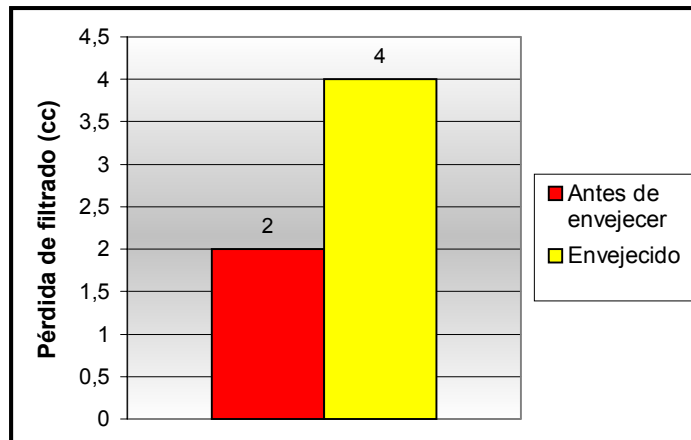
**IV.1.2.4 Comportamiento de la estabilidad eléctrica.**



**Figura IV.3 Comportamiento de la Estabilidad Eléctrica en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10 lb/bbl de Z – Trol 60.**

La estabilidad eléctrica en el lodo propuesto se vio afectada por la prueba de envejecimiento, lo cual fue atribuido a la eficiencia de la dispersión o la humectabilidad de los sólidos en la fase continua, estos sólidos al perder su humectabilidad y ser confinados contribuyeron a la unión de las moléculas de agua libre que se encontraban en el sistema reduciendo así, el valor original de la estabilidad eléctrica.

#### IV.1.2.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado.



**Figura IV.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado en emulsiones inversas 80/20 antes y después de envejecer con 10 lb/bbl de Z – Trol 60.**

Los valores de pérdida de filtrado reportaron valores dentro de los rangos permisibles en lodos de perforación base aceite, los cuales oscilan en mediciones obtenidas de hasta 10cc; los resultados obtenidos estuvieron en valores de 2cc antes del rolado y 4cc luego de éste, lo que puede ser explicado por la formación de un revoque liso, poco permeable y compresible, constituido por partículas del controlador del filtrado en concentración adecuada, y demás partículas sólidas de tamaño coloidal que permitieron un mejor arreglo, cuando estuvieron sometidas al diferencial de presión en la prueba de alta temperatura y alta presión (ATAP). Cabe destacar que al recibir el filtrado no se evidenció la separación de las fases, ni el decantamiento de sólidos, factor de vital importancia en la estabilidad de la emulsión. El espesor del revoque medido fue de 2/32pulg, antes y después del envejecimiento, que es un valor muy tolerable para lodos con densidades equivalentes a 12 lpg.

#### IV.1.2.6 Comportamiento del contenido de sólidos.

El contenido de sólidos puede ser enfocado de la misma forma como se hizo para la densidad, y verificar la eficiencia del balance de masa, además se pudo conseguir las fracciones volumétricas reales aceite – agua en las muestras tomadas, que es el resultado del proceso de mezclado de los aditivos y especialmente el aceite y el agua.

#### IV.1.3 Resultados variando la concentración de Z – Trol 60 en emulsiones 80/20.

A partir de las pruebas realizadas a los lodos de perforación con diferentes concentraciones del Z – Trol 60, se verificarán las variaciones en sus propiedades, tales como: punto de cedencia, fuerza de gel, estabilidad eléctrica, viscosidad plástica, etc...

En la tabla IV.3 se pueden ver las formulaciones de cada uno de los lodos base aceite mineral – Agua (80/20).

**Tabla IV.3 Lodos de Perforación 80/20 a diferentes concentraciones de Z – Trol 60 en emulsiones inversas 80/20**

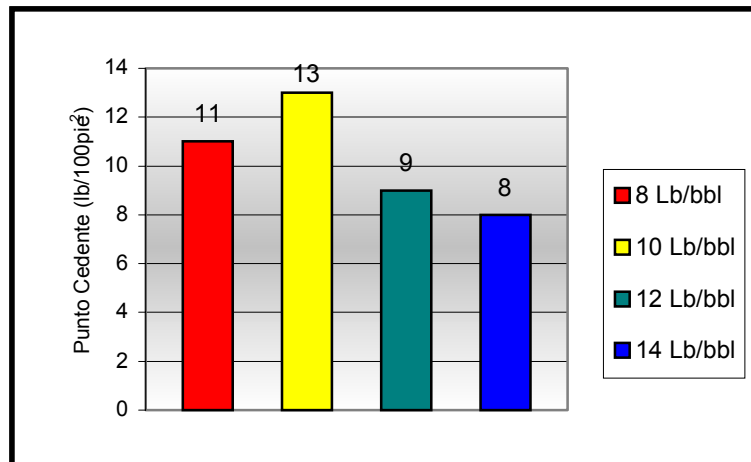
Aditivo	G.E	Concentración (lb/bbl)			
		8	10	12	14
Aceite Mineral	0,816	177,33	176,26	175,96	175,44
Arcilla Organofílica	1,57	10	10	10	10
Z – Trol – 60	0,915	8	10	12	14
Salmuera @ 200000 ppm de CaCl <sub>2</sub>	1,18	13,77 54,15	13,5 54	13,48 54,9	13,44 53,75
Controlador de Filtrado	1,03	4	4	4	4
Densificante	4,2	236,75	236,4	233,66	233,37

**Tabla IV.4 Propiedades de los fluidos de perforación 80/20 con diferentes concentraciones de Z – Trol 60.**

Propiedades	Concentración lb/bbl			
	8	10	12	14
Densidad (lpg)	12,1	12,2	12,3	12
Punto Cedente (lb/100pie <sup>2</sup> )	11	13	9	8
Visc. Aparente (cp)	27	26	30	288
Visc. Plástica (cp)	24	23	23	24
Gel 10 seg (lb/100pie <sup>2</sup> )	4	3	4	4
Gel 10 min (lb/100pie <sup>2</sup> )	5	7	6	5
Estabilidad Eléctrica [volt]	743	830	910	970
Pérdida de Filtrado ATAP	4	2	1,5	2
Espesor Revoque [1/32"]	2	2	2	2

En la tabla IV.4 se puede observar los resultados de las propiedades medidas para cada una de las concentraciones utilizadas.

**IV.3.1 Comportamiento del Punto Cedente:**



**Figura IV.6 Comportamiento del Punto Cedente a distintas concentraciones de Z Trol – 60 en Emulsiones Inversas 80/20.**

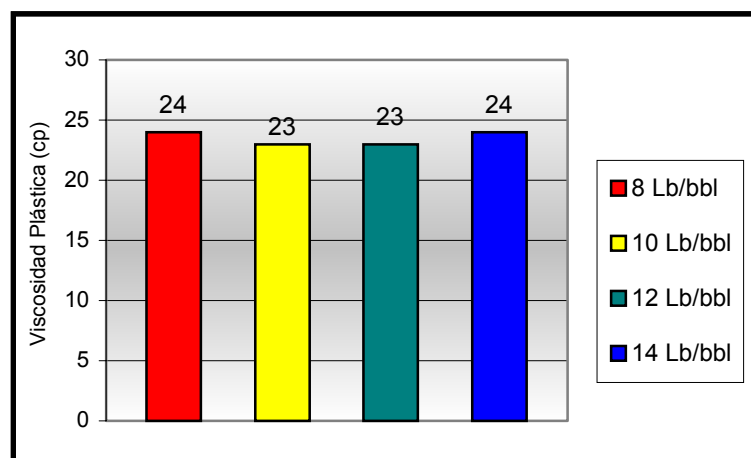
En la figura IV.6 se puede observar la variación de los valores del punto cedente, cuando la concentración del Z – Trol 60 varía desde 8 hasta 14 libras por barril.

El mejor valor obtenido para esta propiedad, fue cuando la concentración del agente emulsificante y humectante era de 10 lb; para este valor el punto cedente fue 13, la disminución de este valor para las concentraciones de 12 y 14 lb/bbl, puede ser originado a que el punto cedente aumenta con la adición de un gelificante o agua, y se baja con un surfactante (Prieto, Ali 1993).

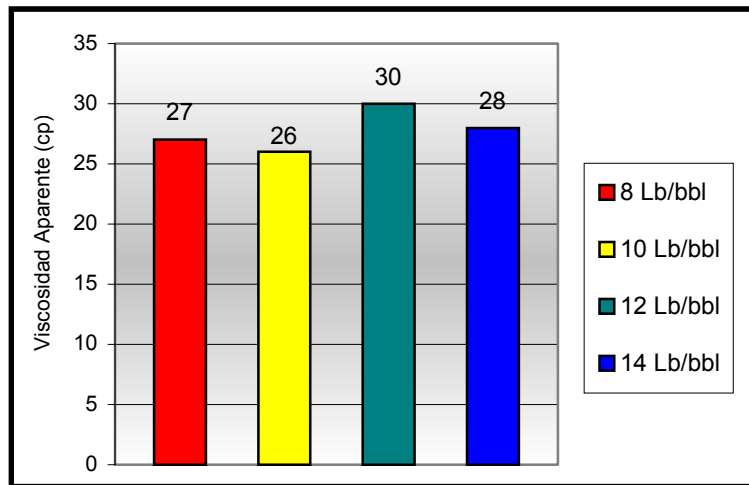
La cantidad de gelificante (arcilla organofílica) permanece constante, y el agua presenta valores con poca variación, por lo cual al agregar una cantidad mayor de surfactante (agente emulsificante y humectante), el valor del punto cedente se ve reducido.

En cuanto a la concentración de 8 lb/bbl, se observó decantación del material densificante (Barita), indicando que esta concentración no fue capaz de humedecer de forma eficiente los sólidos.

### IV.3.2 Comportamiento de la viscosidad plástica y aparente.



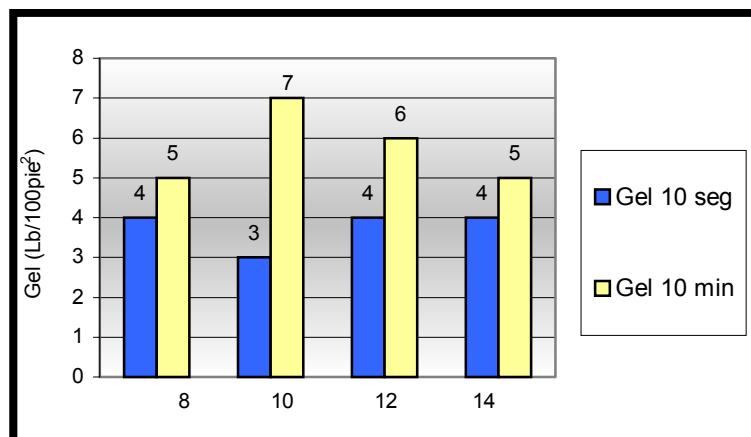
**Figura IV.7 Comportamiento de la viscosidad plástica a distintas concentraciones de Z Trol - 60 en emulsiones inversas 80/20.**



**Figura IV.8 Comportamiento de la viscosidad aparente a distintas concentraciones de Z Trol - 60 en emulsiones inversas 80/20.**

La viscosidad en los lodos base aceite aumenta con la presencia de agua en el sistema, el contenido de agua en estos lodos de perforación no varió considerablemente con los cambios de concentración del agente emulsificante y humectante, por lo que se pudo apreciar que estos valores de viscosidad plástica y viscosidad aparente se encuentran en rangos muy cercanos.

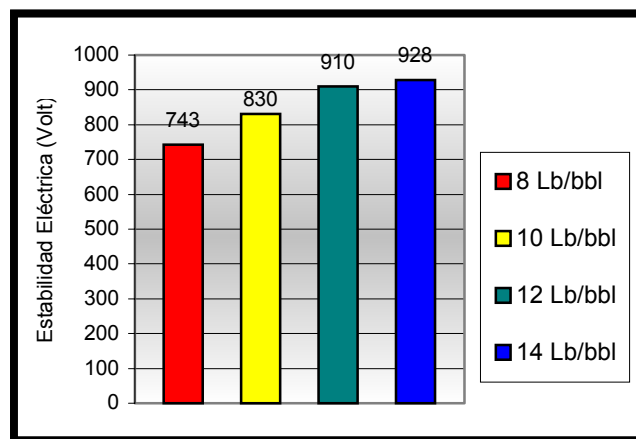
### IV.3.3 Comportamiento de fuerza de gel



**Figura IV.9 Comportamiento de los geles a diferentes concentraciones de Z Trol-60 en emulsiones inversas 80/20.**

Los valores obtenidos de la fuerza de gel cuando se realizaron las pruebas a diferentes concentraciones del agente Z - Trol 60 pueden considerarse como geles frágiles.(Azar, J. y Lummus, J. L. 1984). Estos valores de gel hacen el lodo casi inoperable en el campo. Los valores más aceptables fueron los obtenidos para la concentración de 10 lb/bbl. Se puede decir que a esta concentración existe una actividad más balanceada en la asociación entre las cargas eléctricas cuando el lodo se encuentra en estado estático.

#### IV.3.4 Comportamiento de la estabilidad eléctrica.



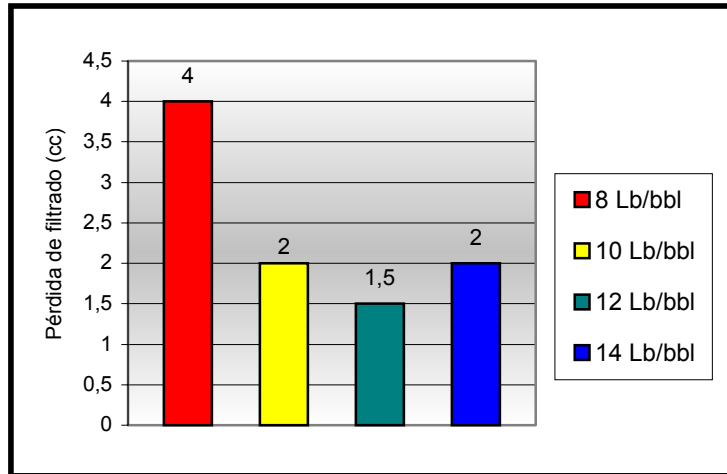
**Figura IV.10 Comportamiento de la Estabilidad eléctrica a distintas concentraciones Z – Trol 60 en emulsiones inversas 80/20.**

Los valores de estabilidad eléctrica como parece lógico pensar, aumentan junto con la concentración del Z – Trol 60, los valores máximos se encuentran en las concentraciones de 12 y 14 lb/bbl pero puede observarse que la diferencia entre los dos no es muy significativa lo que permite pensar que la concentración de Z – Trol 60 se encuentra cerca del valor máximo en el cual éste no podrá incrementar la estabilidad eléctrica aunque se aumente la cantidad de emulsivo.

Es bueno considerar que la estabilidad eléctrica es un indicativo de que tan en buen estado se encuentra la emulsión, pero debemos considerar también, su influencia en las demás propiedades.

Debido a esto la concentración de 10 lb/bbl que otorgó un valor de 830 Volt. y fue capaz de mantener la emulsión estable en el proceso de ATAP a pesar de poseer un valor menor.

**IV.3.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado.**



**Figura IV.11 Comportamiento de la Pérdida de Filtrado a distintas concentraciones Z – Trol 60 en emulsiones inversas 80/20.**

Los valores de la pérdida de filtrado en cada uno de los lodos se encontraron dentro del rango recomendable de operación para este tipo de fluido. Las mediciones indican que no aportarán daños a la formación durante la operaciones de perforación.

Puede verse reflejado en la formación de un revoque de 2/32 pulg, que son considerados delgados para lodos de perforación de una densidad de 12 lpg. Estos revoques están constituidos por sólidos bien escogidos que al ser sometidos a una presión diferencial disminuyen la permeabilidad y por consiguiente reducen la pérdida de fluido.



**IV.1.4 Resultados variando la concentración de Arcilla Organofílica en emulsiones inversas 80/20.**

Luego de seleccionar la concentración de 10 lb/bbl de Z Trol – 60, se decidió evaluar el comportamiento cuando se varía la concentración de arcilla organofílica, con la finalidad de incrementar propiedades como el punto de cedencia y fuerza de gel, parámetros de vital importancia relacionados con la limpieza del hoyo en un proceso de perforación.

En la tabla IV.5 se pueden observar las formulaciones cuando se varían las concentraciones de arcilla organofílica para lodos base aceite mineral, con relación volumétrica aceite mineral - agua 80/20.

**Tabla IV.5 Lodos de Perforación 80/20 a diferentes concentraciones de Arcilla Organofílica en emulsiones inversas 80/20**

Arcilla Organofílica	Concentración (lb/bbl)				
	8	10	12	14	16
Aceite Mineral	177,072	176,26	175,25	174,62	173,81
Z – Trol – 60	10	10	10	10	10
Salmuera @ 200000ppm CaCl <sub>2</sub>	13,625 54,5	13,5 54	13,3 53,75	13,375 53,5	13,31 53,25
Controlador de Filtrado	4	4	4	4	4
Densificante	237,27	236,4	235,7	234,5	233,63

**Tabla IV.6 Propiedades de los fluidos de Perforación 80/20 a diferentes concentraciones de Arcilla Organofílica**

Propiedades	Concentración de Arcilla Organofílica lb/bbl				
	8	10	12	14	16
Densidad (lpg)	12,1	12,2	12,1	12,2	12,1
Punto Cedente (lb/100pie <sup>2</sup> )	9	13	17	22	23
Visc. Aparente (cp)	26	31	37	40	42
Visc. Plástica (cp)	22	24	27	29	30
Gel 10 seg (lb/100pie <sup>2</sup> )	4	3	4	4	5
Gel 10 min (lb/100pie <sup>2</sup> )	8	7	6	8	7
Estabilidad Eléctrica [volt]	915	930	954	986	1008
Pérdida de Filtrado ATAP [cc]	2	3	1,5	2	1
Espesor Revoque	2	2	2	2	4

De la tabla IV.6 podemos apreciar las variaciones en las propiedades de los fluidos de perforación cuando se varía la cantidad de arcilla organofílica.

La viscosidad plástica aumenta debido a la adición de arcilla organofílica en el sistema, ya que los sólidos tienden a aumentar la fricción mecánica entre los sólidos presentes, por consiguiente a mayor presencia de sólidos mayor viscosidad plástica se tendrá.

Es probable que al aumentar la cantidad de sólidos su área superficial no este humectada, traduciéndose en una ineficiente dispersión y una reducción aparente de la cantidad de líquidos con mayores superficies de contacto entre los sólidos, y considerando a la arcilla como un sólido cargado, hace que se unan más los sólidos causando un incremento de viscosidad.

En cuanto al punto cedente, se observa un incremento originado por la adición de partículas cargadas, ya que éstas incrementaron su atracción cuando se está a condiciones dinámicas.

Los valores de punto cedente variaron de 9 hasta 23 lb/100pie<sup>2</sup>, esto era de esperarse al incrementar las concentraciones de arcilla organofílica.

Los valores de resistencia de gel, no se incrementaron al aumentar las concentraciones de arcilla organofílica. Estos se mantuvieron como geles instantáneos, ya que su valor de 10 segundos no exceden en cinco unidades los de 10 minutos. (Azar, J. y Lummus, J. L. 1984).

Los valores de geles obtenidos son considerados débiles y en ninguna de las diferentes concentraciones de arcilla organofílica se obtuvieron valores que pudiesen considerarse prudentes para ser usadas durante un proceso de perforación. Con los valores de geles obtenidos para este lodo, él no sería capaz de mantener eficientemente los cortes de perforación desprendidos durante las conexiones y viajes de tuberías por si solo.

La imposibilidad de formar geles adecuados puede ser explicada en que las interacciones atractivas de la fase dispersa son inexistentes, con lo cual no se desarrollan las estructuras rígidas reversibles (baja capacidad tixotrópica).

En cuanto a la pérdida de filtrado, ésta se encuentra dentro de los rangos aceptables en pruebas de laboratorio, gracias a la formación de un revoque delgado y liso, que fue formado por partículas poco permeables provenientes del controlador de filtrado y de la arcilla organofílica en tamaños coloidales.

Se puede ver también de la tabla IV.6, los valores de la estabilidad eléctrica, los cuales se incrementan con la concentración de arcilla, debido a que las partículas de arcilla bien humectadas se interponen entre las gotas de agua emulsificadas, aumentando así la distancia que las separa.

Después de realizar cada una de estas pruebas se decidió analizar el efecto de la prueba de envejecimiento sobre cada una de las formulaciones. Estas pruebas arrojaron un aumento exagerado en las propiedades reológicas de todos los lodos, excepto el de concentración de

8 lb/bbl, el cual mantuvo sus propiedades en un rango de operación razonable, la variación de estas queda evidenciada en la tabla IV.2.

Las propiedades reológicas no se encuentran reseñadas en las tablas, ya que el rango de medición del viscosímetro Fann 35 fue insuficiente para reportar estos valores.

Después de simular las condiciones de pozo a través de las pruebas de envejecimiento se puede decir que, la acción de la temperatura desarrolla un efecto floculante, viéndose afectada la humectabilidad de la arcilla, haciendo que éstas cambien de estructuras, aumentando de forma intolerable las viscosidades, la fuerza de gel y el punto de cedencia.

**IV.1.5 Resultados de las pruebas variando la concentración y tipo de sal en emulsiones inversas 80/20.**

Un aspecto importante en la formulación de una emulsión inversa es la salinidad del mismo. Por este motivo, es necesario determinar como se vieron afectadas las propiedades fisicoquímicas cuando fue modificada el tipo de sal y la concentración de esta.

En las siguientes tablas se presenta la formulación correspondiente a dos sistemas evaluados en el laboratorio, uno con salinidad de 100.000 ppm y otro con 200.000 ppm de cloruro de sodio (NaCl).

**Tabla IV.7 Formulación Aceite mineral/agua (80/20) con 100000 ppm de NaCl.**

Componentes	Gravedad Específica	Masa (lbs / bbl)	Tiempo de Agitación (min)
Aceite mineral	0,816	175,85	---
Arcilla Organofílica	1,57	14	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 100000 ppm NaCl	1,14	53,75 5,98	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	240,42	20

**Tabla IV.8 Formulación Aceite mineral/agua (80/20) con 200000 ppm de NaCl**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite mineral	0,816	173,81	---
Arcilla Organofílica	1,57	14	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm NaCl	1,15	13,3125 53,25	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	235,63	20

La tabla siguiente muestra los valores de las propiedades, obtenidas con la variación de la concentración de NaCl.

**Tabla IV.9 Propiedades de los fluidos de perforación 80/20 con diferentes concentraciones de NaCl.**

<b>Propiedades</b>	<b>Concentración de NaCl</b>	
	<b>100000 ppm</b>	<b>200000 ppm</b>
Densidad [lpg]	12	12
Viscosidad plástica [cp]	28	30
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	16	17
Viscosidad Aparente [cp]	35	38
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	5	5
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	7	8
Estabilidad Eléctrica [volt]	953	970
Pérdida de filtrado [cc]	3,5	3
Espesor del revoque [1/32 ”]	2	2
Relación (O/W)	83 / 27	82 / 28

Vemos que las propiedades básicas del lodo cuando se usaron las concentraciones de NaCl diferentes, no parecieron ser afectadas de manera importante, lo que significa que no es la concentración de esta sal el factor que pudiera afectar los valores de las propiedades asociadas a las necesidades básicas, tales como: la de limpieza (punto cedente) y la suspensión de ripios (fuerza de gel), referidas en la tabla anterior. Cabe destacar que el cloruro de sodio es soluble en agua, pero lo es menos que  $\text{CaCl}_2$ , su valor de saturación es de 268.000 ppm aportando una presión osmótica de 5.800 lpc, calculado para un lodo base aceite frente a una lutita con agua dulce a 25 °C (Silva, Leonardo, 1989).

La otra sal utilizada en las pruebas realizadas fue el cloruro de calcio ( $\text{CaCl}_2$ ), la cual posee en 456.000 ppm su valor de saturación. Se escogieron concentraciones por debajo de su saturación de 200.000 ppm y 300.000 ppm, y se efectuaron las pruebas para seleccionar la concentración adecuada de sal y el efecto que ellas ejercen sobre el lodo de perforación. Las tablas que se presentan a continuación muestran las formulaciones para un lodo de relación volumétrica 80/20 Aceite mineral / Agua.

**Tabla IV.10 Formulación Aceite mineral/agua (80/20) con 200000 ppm de  $\text{CaCl}_2$**

Componentes	Gravedad Específica	Masa (lbs / bbl)	Tiempo de Agitación (min)
Aceite mineral	0,816	174,62	---
Arcilla Organofílica	1,57	14	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm $\text{CaCl}_2$	1,18	13,375 53,5	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	234,505	20

**Tabla IV.11 Formulación Aceite mineral/agua (80/20) con 300000 ppm de CaCl<sub>2</sub>**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite mineral	0,816	210	---
Arcilla Organofílica	1,57	14	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 300000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,19	22,47 52,5	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	229,47	20

Seguidamente se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los fluidos antes señalados cuando se usa cloruro de calcio a diferentes concentraciones. Al comparar los valores de las propiedades obtenidas con las diferentes concentraciones de cloruro de sodio, seleccionaremos la sal y la concentración adecuada para su uso en las formulaciones propuestas.

**Tabla IV.12 Propiedades de los fluidos de perforación 80/20 con diferentes concentraciones de CaCl<sub>2</sub>.**

Propiedades	Concentración de CaCl <sub>2</sub>	
	200000 ppm	300000 ppm
Densidad [lpg]	12	12
Viscosidad plástica [cp]	29	33
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	22	18
Viscosidad Aparente [cp]	40	42
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	5	4
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	8	7
Estabilidad Eléctrica [volt]	985	973
Pérdida de filtrado [cc]	2	2
Espesor del revoque [1/32"]	2	2
Relación (O/W)	83 / 27	84 / 26

Al revisar los valores de la tabla IV.12, se observa claramente que los valores obtenidos en las propiedades del lodo de 200.000 ppm son mejores con respecto a los de 300.000 ppm de CaCl<sub>2</sub>; propiedades como el punto cedente, del cual se obtuvo un valor de 22 lbs/100pies<sup>2</sup>, se vio reducido a 18 lbs/100pies<sup>2</sup> cuando la concentración del cloruro de calcio se vio aumentada, la misma situación ocurrió con la fuerza de gel que a pesar de no ser tan significativa la variación de sus valores se vio reducida en una unidad tanto en la medición a 10 segundos como la de 10 minutos.

La caída de propiedades como ésta, indican que un incremento en la concentración de la sal, reduce las propiedades básicas asociadas a la limpieza del hoyo y la capacidad de suspensión cuando es detenida la circulación en la perforación.

Este comportamiento puede ser explicado debido a que al aumentar la concentración de la sal, existe un incremento de las cargas que fomentan el desequilibrio en la humectación de



las arcillas, gracias a la formación de una doble capa eléctrica entre el agente humectante y la fase externa lo que podría explicarse como un aumento aparente del volumen de la fase interna, traduciéndose en un aumento de la viscosidad plástica por los llamados efectos electroviscosos. La reducción del punto cedente y la fuerza de gel que dependen de las atracciones electroquímicas pueden ser explicadas por los efectos de solvatación a pesar de haber aumentado la cantidad de iones.

En las tablas IV.9 y IV.12 se muestran los resultados de las pruebas con los diferentes tipos de sal, las cuales permitieron seleccionar del uso del  $\text{CaCl}_2$ , a una concentración de 200000 ppm como la adecuada en cada una de las formulaciones realizadas con miras a proponer un fluido de perforación a relaciones volumétricas aceite mineral/agua 90/10, 80/20, 70/30; con las propiedades necesarias para su aplicabilidad en el campo.

### **IV.1.6 Resultados variando el orden de agregación de los aditivos en emulsiones inversas 80/20.**

En secciones anteriores quedó especificado el orden de agregación que generalmente es utilizado en el campo; algunas experiencias de laboratorio han arrojado que es preferible el agregar los materiales líquidos antes que los materiales sólidos, con el fin de lograr la homogeneidad y la estabilidad necesaria en los sistemas bien sea, 100% en emulsiones inversas en sus diferentes fracciones volumétricas.

Con miras de obtener mejores propiedades, se modificó el orden de agregación de la arcilla organofílica considerando a ésta como el principal material a la hora de incrementar el punto cedente y aumentar la capacidad suspensiva (Prieto, Ali 1996).

En las tablas IV.13 y IV.14 se presentarán las formulaciones para sistemas aceite mineral – agua (80/20), donde se muestran en estricto orden la agregación de los materiales utilizados. En la tabla IV.15 se muestren en forma comparativa las propiedades de cada sistema.

**Tabla IV.13 Formulación Aceite mineral/agua (80/20) variando el orden de agregación de la arcilla organofílica lodo 1.**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite mineral	0,816	177	---
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	54,5 13,625	30
Arcilla organofílica	1,57	8	15
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	237,27	20

**Tabla IV.14 Formulación Aceite mineral/agua (80/20) variando el orden de agregación de la arcilla organofílica lodo 2.**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite mineral	0,816	177	---
Arcilla organofílica	1,57	8	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	54,5 13,625	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	237,27	20

**Tabla IV.15 Propiedades de los fluidos de Perforación 80/20 variando el orden de agregación de la Arcilla Organofílica**

Propiedades	Lodo 1	Lodo 1 envejecido	Lodo 2	Lodo 2 envejecido
Punto Cedente (lb/100pie <sup>2</sup> )	7	12	9	16
Visc. Aparente (cp)	31	48	26	41
Visc. Plástica (cp)	27	38	22	33
Gel 10 seg (lb/100pie <sup>2</sup> )	3	5	4	7
Gel 10 min (lb/100pie <sup>2</sup> )	4	7	8	11
Estabilidad Eléctrica	940	890	915	830
Pérdida de Filtrado	2	5	2	4
Espesor Revoque	2	2	2	2
Relación	84/26	82/28	82/28	83/27

Como se puede apreciar en las tablas IV.13 y IV.14, la cantidad de cada uno de los materiales es idéntica, lo que permite evaluar, que tan sensible es el lodo a la variación del orden de agregación de sus componentes.

En la tabla IV.15 se observa que cuando se agregó la arcilla organofílica inmediatamente después del aceite y antes del Z – Trol 60, su efecto dentro del lodo fue mucho más eficiente, ya que en el lodo 1, que fue mezclado con el orden convencional del laboratorio se obtuvo un valor de punto cedente de 7 frente a 9 lb/100pie<sup>2</sup> del lodo 2, con un nuevo orden de agregación.

En cuanto al valor de los geles tanto a 10 segundos como a 10 minutos, los resultados con el nuevo orden de agregación aumentaron a 4 y 8 lb/100pie<sup>2</sup>, mayores que con el orden tradicional, los cuales eran valores realmente inusuales en operaciones de perforación.

En lo referente a la viscosidad plástica, su valor es reducido de 27 a 22 cp, lo que puede explicarse si se considera que al agregar la arcilla organofílica antes de el Z – Trol 60, ésta estará mayor tiempo en contacto íntimo con el agente emulsivo y humectante, lo que permite mejorar la humectación de sus partículas; además se considera que al agregarse la arcilla bajo el nuevo orden, permaneció mucho más tiempo en agitación, ofreciendo mejores propiedades reológicas al fluido.

#### IV.2 Lodo base aceite mineral/Agua 90/10.

A continuación se muestra la formulación propuesta para un fluido de perforación base aceite mineral / agua con una relación volumétrica (90/10)

**Tabla IV.16. Formulación del sistema aceite mineral / agua (90 / 10) con un peso de 12 lpg.**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite mineral	0,816	198,29	---
Arcilla Organofílica	1,57	12	15
Z-Trol 60	0,915	8	15
Salmuera @ 200000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	27 6,75	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	249,96	20

**Tabla IV.17 Resultados de las pruebas aceite mineral/ agua 90/10 con un peso de 12 lpg.**

<b>Propiedades</b>	<b>Antes de Rolado</b>	<b>Después de Rolado</b>
Densidad [lpg]	12,2	11,9
Viscosidad plástica [cp]	21	26
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	7	16
Viscosidad Aparente [cp]	24	29
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	3	7
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	6	12
Estabilidad Eléctrica [volt]	1512	1320
Pérdida de filtrado ATAP [cc]	3	5
Espesor del revoque [1/32"]	1	2
Relación (O/W)	93 / 17	96 / 14

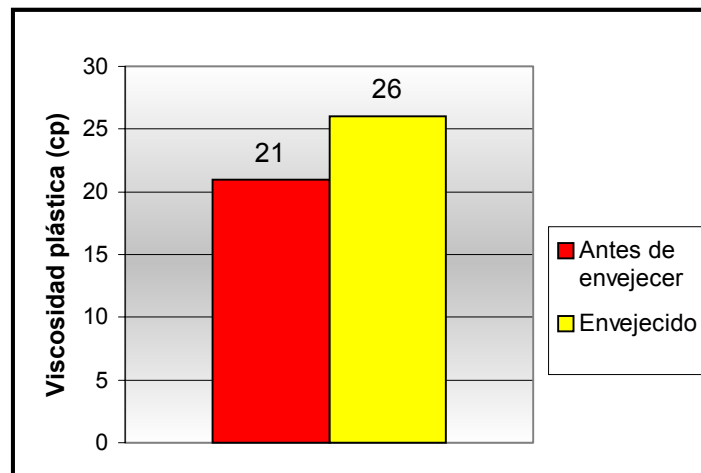
#### **IV.2.1 Comportamiento de la densidad.**

Los valores experimentales de densidad para este sistema, fueron medidos en 12,1 lpg a valores de 11,9 lpg, cuando el lodo fue envejecido; esta pequeña diferencia puede ser explicada porque, cuando el sistema es sometido a temperatura constante durante un tiempo prolongado, la humectabilidad de los sólidos se vio afectada precipitando un porcentaje de estos y, al realizar las mediciones causaron una pequeña disminución.

## IV.2.2 Propiedades reológicas.

En esta sección se mostrarán las variaciones de las propiedades reológicas cuando el lodo original es envejecido.

### IV.2.2.1 Viscosidad plástica.

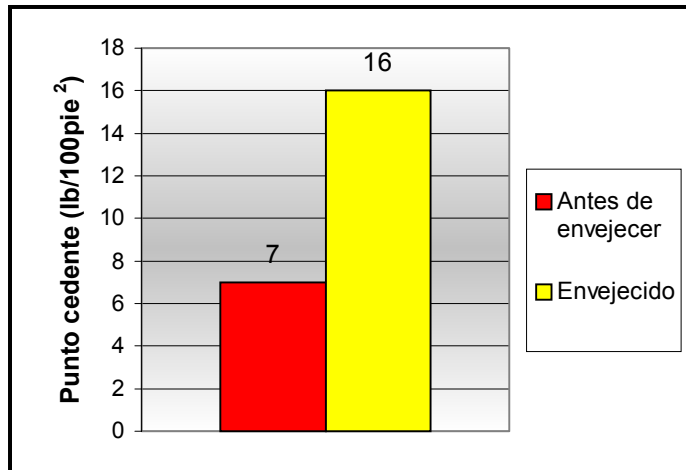


**Figura IV.12 Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer.**

El valor de viscosidad plástica varió, de un valor original de 21 cp a uno de 26 cp cuando el sistema fue envejecido, lo que representa una reducción en la humectabilidad de los materiales presentes en el lodo, lo que se traduce en un incremento en la fricción mecánica entre los sólidos presentes en el lodo.

Se deben considerar los efectos de desgaste de las partículas por los efectos del movimiento cuando el fluido de perforación está siendo sometido a la prueba de envejecimiento, lo causaría un cambio de forma entre ellas y un aumento de la superficie de contacto incrementando los efectos de la fricción mecánica.

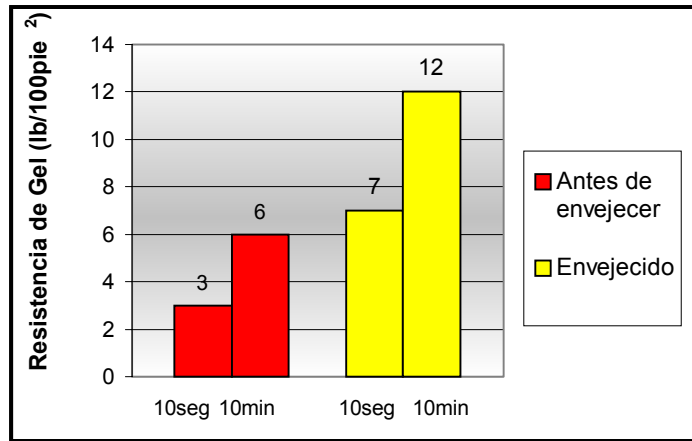
#### IV.2.2.2 Comportamiento del punto cedente.



**Figura IV.13 Comportamiento del Punto cedente en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer.**

El valor del punto cedente sufrió cambios favorables, ya que su valor original de 7 fue incrementado a 16 lb/100pie<sup>2</sup>, lo que es un indicativo claro de una mayor activación por efecto de la temperatura de las cargas electroquímicas de la fase dispersa. Estas cargas provienen de las partículas de la arcilla organofílica, que bajo la acción de la temperatura se acercan y ejercen la interacción de sus cargas bajo condiciones dinámicas.

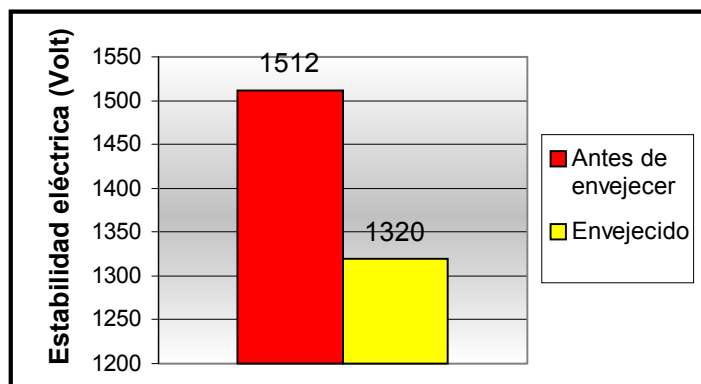
**IV.2.2.3 Comportamiento de la fuerza de gel.**



**Figura IV.14 Comportamiento de la fuerza de gel en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer.**

El cambio de los valores del fluido de perforación original fue apenas superior a 5 unidades, para ser considerados progresivos (Lummus, J. 1984). Este cambio fue debido a la actividad de la arcilla organofílica cuando se disminuyó el efecto de humectabilidad en estado de estático.

**IV.2.2.4 Comportamiento de la estabilidad eléctrica.**



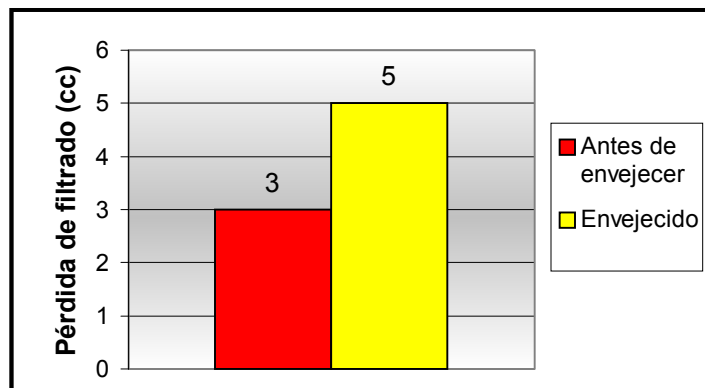
**Figura IV.15 Comportamiento de la Estabilidad eléctrica en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer.**



Los valores de estabilidad eléctrica en el sistema original y el envejecido son considerados dentro de un rango aceptable para las emulsiones base aceite mineral – agua (90/10). La reducción observada al ser envejecido indica un acercamiento de las moléculas del agua que se encontraban emulsificadas, indicando una posible coalescencia del agua libre en el sistema.

Cabe destacar que la estabilidad eléctrica nos indica de cómo está la emulsión, pero bien vale decir que se observó una sola fase cuando fue realizada la prueba ATAP, lo que indica que la emulsión es estable.

#### IV.2.2.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado.



**Figura IV.16 Comportamiento de la Pérdida de filtrado en emulsiones inversas 90/10 antes y después de envejecer.**

Los valores de filtrado recogidos de la prueba ATAP, variaron de 3 a 5 cc, los cuales se encuentran dentro de los parámetros permisibles en los lodos base aceite. La medición del espesor del revoque varió de 1/32 a 2/32 pulgadas, esto es atribuido a la precipitación de los sólidos al simular el fluido a condiciones de pozo, lo cual lo hace más compresible y menos permeable el revoque.

**IV.2.2.6 Comportamiento del contenido de sólidos.**

La prueba de contenidos de sólidos nos indicó la relación real aceite – agua, y observamos que tan diferente fue con respecto a la formulación original o de diseño. Los valores son diferentes y son atribuidos a una posible evaporación de agua por el efecto de la temperatura.

**IV.3 Lodo base aceite mineral 100%**

Si se elimina el agua de los sistemas antes presentados, se puede lograr un lodo completamente base aceite o 100%, este sistema posee la virtud de una mayor estabilidad, frente a posibles agentes contaminantes que pudiesen presentarse durante la perforación. Una formulación propuesta con el uso del Z – Trol 60 viene dada en la tabla IV.18.

**Tabla IV.18 Formulación de un fluido de perforación 100 % aceite mineral**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite mineral	0,816	214,17	---
Arcilla Organofílica	1,57	14	15
Z-Trol 60	0,915	12	15
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	262,97	20

**Tabla IV.19 Resultados de las pruebas 100% con un peso de 12 lpg.**

<b>Propiedades</b>	<b>Antes de Rolado</b>	<b>Después de Rolado</b>
Densidad [lpg]	12	12
Viscosidad plástica [cp]	16	22
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	11	14
Viscosidad Aparente [cp]	21	28
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	3	5
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	6	10
Pérdida de filtrado ATAP [cc]	3	4,5
Espesor del revoque [1/32"]	2	2

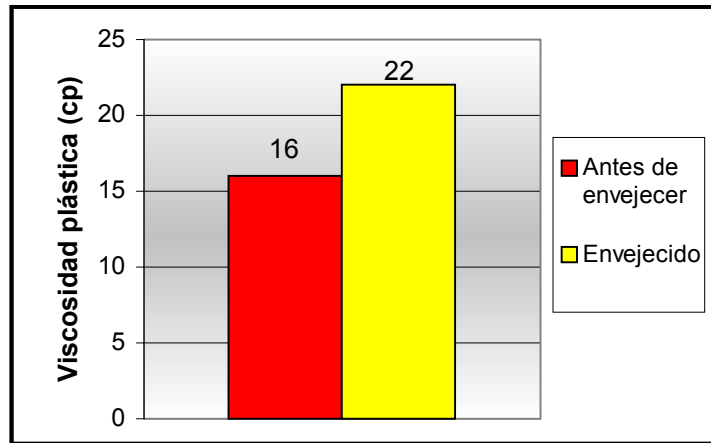
#### **IV.3.1 Comportamiento de la densidad.**

Los valores de la densidad antes y después del rolado permanecieron iguales, y con el mismo valor del escogido en el diseño de la formulación, lo que evidencia un eficiente proceso a la hora del mezclado de los materiales.

#### **IV.3.2 Propiedades reológicas**

A continuación se muestra una discusión de las propiedades reológicas antes y después del envejecimiento.

#### IV.3.2.1 Viscosidad plástica.

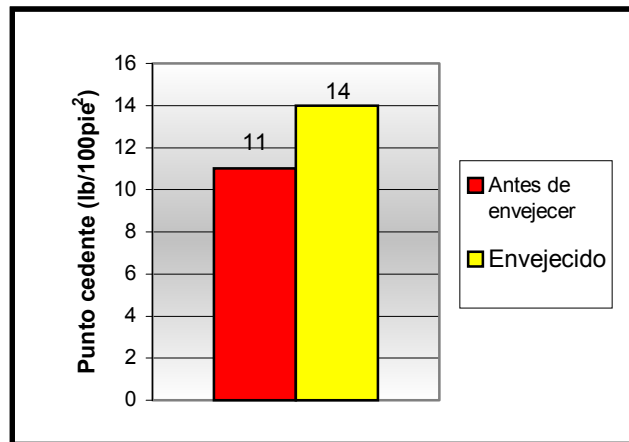


**Figura IV.17 Comportamiento de la Viscosidad plástica en lodos 100% aceite antes y después de envejecer.**

El valor de viscosidad plástica pasa de 16 a 23 cp, debido al incremento en la fricción mecánica producto de la reducción de la humectabilidad de las partículas sólidas presentes, tanto el material densificante como el proveniente de la arcilla organofílica.

Cabe destacar que este cambio de valor en la viscosidad plástica o en un lodos 100% aceite, es menor que la viscosidad plástica en lodos base aceite tipo emulsión inversa, debido a que en estos el agua, actúa como un viscosificante.

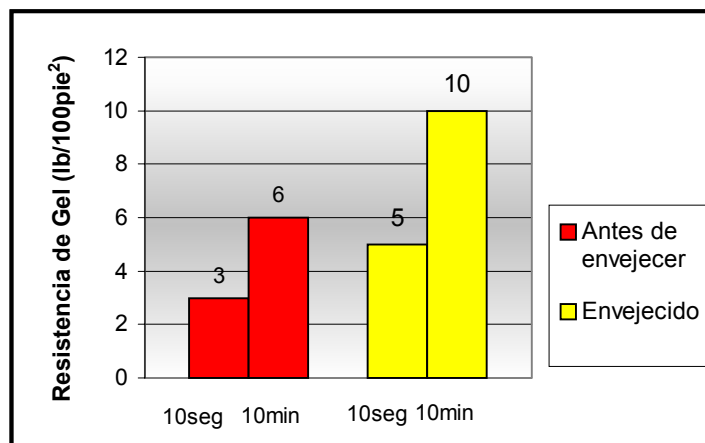
**IV.3.2.2 Comportamiento del Punto cedente.**



**Figura IV.18 Comportamiento del Punto cedente en lodos 100% aceite antes y después de envejecer.**

El valor original del punto cedente varió de 11 a 14 lbs/100pies<sup>2</sup>, el cual es un valor capaz de lograr buena limpieza en las operaciones de campo. La asociación de las partículas cargadas, por el confinamiento de éstas, gracias a la reducción en la humectabilidad, se traduce en condiciones de movimiento en un incremento del punto cedente.

**IV.3.2.3 Comportamiento de la resistencia de gel.**

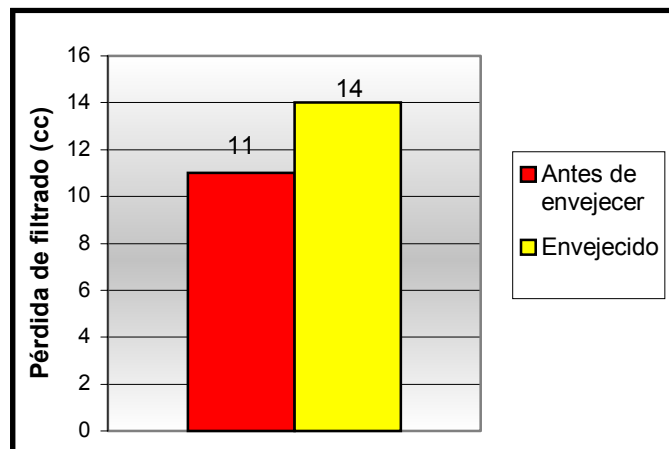


**Figura IV.19 Comportamiento de la resistencia de gel en lodos 100% aceite antes y después de envejecer.**

En condiciones estáticas, después del envejecimiento se alcanzaron valores de gel de 5 lbs/100pies<sup>2</sup> para los 10 segundos y de 11 lbs/100pies<sup>2</sup> para el gel de 10 minutos; estos valores están afectados por el efecto desequilibrante de la temperatura sobre el agente emulsivo y humectante, y su papel sobre los sólidos presentes en el sistema de lodos.

#### IV.3.2.4 Comportamiento de la pérdida de filtrado

Los valores de la pérdida de filtrado se mantuvieron dentro de un rango aceptable, debido a la formación de un revoque delgado y compresible, constituido por un arreglo de sólidos geoméricamente seleccionados, como es el caso de la arcilla organofílica y la barita, que con el diferencial de presión aplicado al sistema constituyen un sello eficiente para el paso de fluidos hacia la formación. Esto por supuesto, reforzado con el uso de un controlador de filtrado comercial y a concentraciones adecuadas.



**Figura IV.20 Comportamiento de la Pérdida de filtrado en lodos 100% aceite antes y después de envejecer.**

#### IV.4 Lodo base aceite mineral/ agua 70/30

A continuación se realizará el análisis de las propiedades para un lodo base aceite mineral/agua 70/30.

**Tabla IV.20. Formulación del sistema aceite mineral / agua (70/30) con un peso de 12 lpg.**

Componentes	Gravedad Específica	Masa (lbs / bbl)	Tiempo de Agitación (min)
Aceite mineral	0,816	143,12	---
Arcilla Organofílica	1,57	6	15
Z-Trol 60	0,915	12	15
Salmuera @ 200000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	80,67 20,17	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	238,14	20

**Tabla IV.21 Resultados de las pruebas aceite mineral/ agua 70/30 con un peso de 12 lpg.**

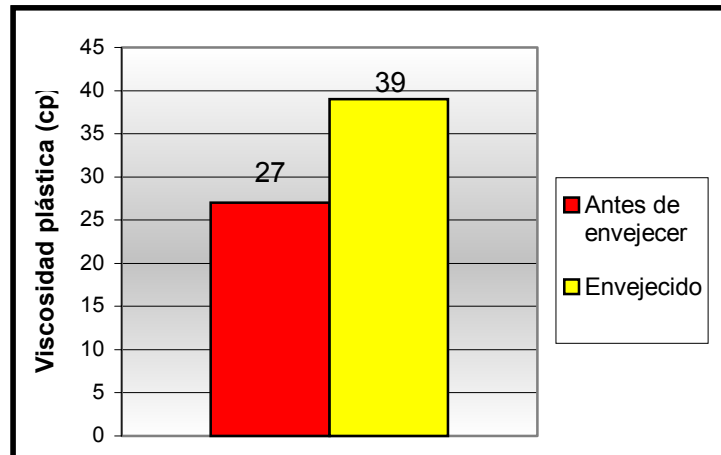
Propiedades	Antes de Rolado	Después de Rolado
Densidad [lpg]	12,1	11,9
Viscosidad plástica [cp]	27	26
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	11	16
Viscosidad Aparente [cp]	28	29
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	6	7
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	10	12
Estabilidad Eléctrica [volt]	690	1320
Pérdida de filtrado [cc]	1	5
Espesor del revoque [1/32]	2	2
Relación (O/W)	74/26	72/28

#### IV.4.1 Comportamiento de la densidad.

Los valores de densidad, son realmente cercanos y no presentan una variación significativa, se puede decir que se mantuvo constante, lo cual indica una medición eficiente.

## IV.4.2 Propiedades reológicas

### IV.4.2.1 Comportamiento de la viscosidad plástica

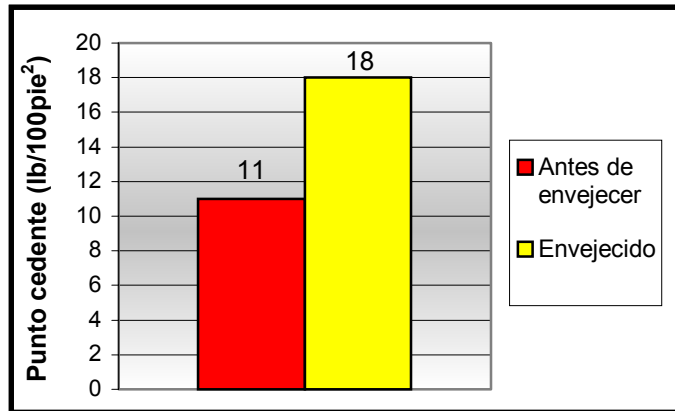


**Figura IV.21 Comportamiento de la Viscosidad plástica en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer.**

Las mediciones arrojadas para el sistema 70/30, cuando fue envejecido varió de 27 cp a 37 cp, lo que nos indicó, por medio de un enfoque comparativo que a mayor presencia de agua dentro del sistema, mayor será el incremento en la viscosidad; ya que la eficiencia del Z – Trol 60 es mayor y, la coalescencia de las gotas libres de salmuera se ven influenciadas, debido a que las partículas sólidas no se dispersaron en el sistema.



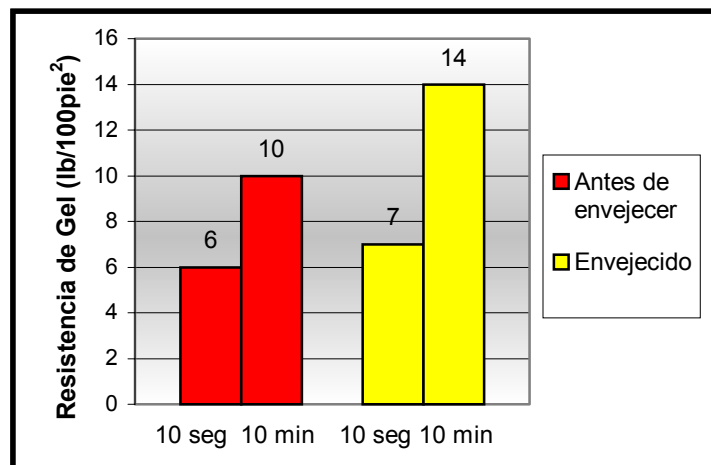
**IV.4.2.2 Comportamiento del punto cedente.**



**Figura IV.22 Comportamiento de la Punto cedente en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer.**

El valor del punto cedente para este lodo varió de 11 a 18 lb/100pie<sup>2</sup> después de envejecerse. Esto probablemente se debe al incremento de las cargas electroquímicas presentes en la salmuera. Estos valores se encuentran entre los rangos operativos en campo.

**IV.4.2.3 Comportamiento de la fuerza de gel.**

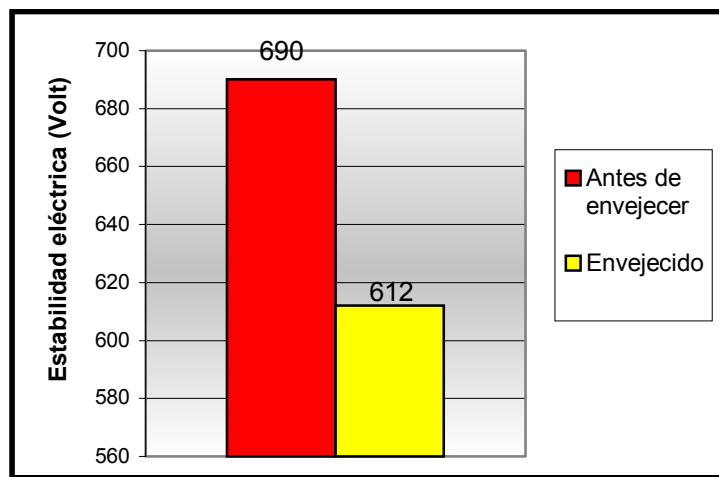


**Figura IV.23 Comportamiento de la Fuerza de gel en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer.**

Después del efecto de envejecimiento, como se muestra en la tabla IV.21, los valores de fuerza de gel aumentan de 6 a 7 lb/100pie<sup>2</sup> para 10 segundos y de 10 a 14 lb/100pie<sup>2</sup> para la medida a los 10 minutos.

Estos incrementos son originados por el aumento en la cantidad de iones, representado en el considerable porcentaje de salmuera en el sistema.

#### IV.4.2.4 Comportamiento de la estabilidad eléctrica.

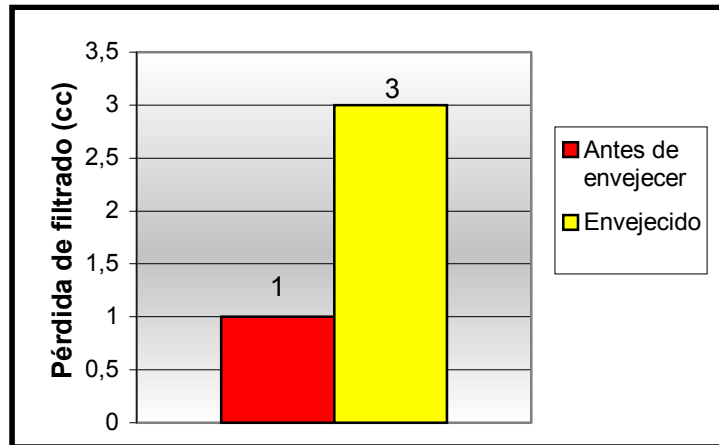


**Figura IV.24 Comportamiento de la Estabilidad eléctrica en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer.**

Se debe realizar las mediciones de la estabilidad eléctrica para los sistemas de lodos base aceite de emulsión inversa, donde este parámetro ocupa una importancia reconocida, y para este caso se observan valores aunque reducidos pero dentro de los operables en campo.

Los valores obtenidos son de 690 Volt y 612 Volt, para antes y después de envejecer respectivamente. Estos valores son aceptables, sobre todo si se considera que existe una mayor cantidad de agua en la emulsión, lo que hace que las gotas de agua libre se encuentren a menor distancia en la dispersión, aumentando el riesgo de que éstas coalescan.

**IV.4.2.5 Comportamiento de la pérdida de filtrado.**



**Figura IV.25 Comportamiento de la Pérdida de filtrado en emulsiones inversas 70/30 antes y después de envejecer.**

Los valores de las pérdidas de filtrado a lo largo de cada uno de los sistemas base aceite mineral, están acorde con los valores máximos permisibles en las pruebas de laboratorio y de campo, ya que a la final reproducen el comportamiento de los lodos frente a la formación.

**IV.5 Comparación entre las propiedades de lodos diseñados en el laboratorio base aceite mineral con un fluido aplicado en campo.**

**IV.5.1 Lodos 100% aceite.**

Luego del desarrollo y presentación de los lodos diseñados se realizó una comparación de las propiedades de estos sistemas con las propiedades de los sistemas que actualmente han sido utilizados en campo, como por ejemplo: un fluido 100% aplicado en el Bloque IX, Campo Lagomedio, Estado Zulia por una compañía de servicios. La formulación de este lodo se encuentra en la tabla I Apéndice 2.

En la tabla IV.22 se muestra la comparación entre el lodo 100% aceite operativo en campo con el lodo propuesto de aceite mineral 100% después de envejecido.

**Tabla IV.22 Comparación de las propiedades entre los lodos 100% aceite operativo en campo y 100% aceite mineral envejecido.**

Propiedades	Lodo envejecido	Lodo operativo en campo
Densidad [lpg]	12	12
Viscosidad plástica [cp]	22	19
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	14	14
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	5	11
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	10	25
Pérdida de filtrado [cc]	4,5	6
Espesor del revoque [1/32]	2	2

Al evaluar los valores de la tabla IV.22, observamos que el lodo propuesto 100% aceite, posee una viscosidad plástica mayor, a pesar que el lodo operativo en el campo ha sido circulado de forma real y probablemente posea la influencia de partículas provenientes de la formación, estas partículas en la realidad son la que poseen mayor influencia en el incremento de esta propiedad.

Los valores de punto cedente son de 14 lb/100pie<sup>2</sup> para ambos lodos, si asociamos esta propiedad con la capacidad de limpieza del lodo, podremos decir que el lodo propuesto presenta un valor de operabilidad en el campo.

Con respecto a los valores de fuerza de gel observamos la gran deficiencia de esta propiedad con respecto al fluido operable en campo, por lo que habría que recomendar mejorar la calidad del producto con miras a aumentar la capacidad de desarrollo de tixotropía en el fluido.

En cuanto a los valores de filtrado obtenidos mediante la prueba de ATAP, se observó que el lodo propuesto garantiza una mejor pérdida de filtrado con respecto a las condiciones de operabilidad en el campo.

**IV.5.2 Lodos emulsión inversa aceite mineral / agua (90/10).**

En la tabla IV.23 se muestra la comparación de las propiedades de un lodo de perforación operado en campo frente al lodo propuesto en este trabajo. Esta relación se basa en el fluido diseñado después de envejecido.

**Tabla IV.23 Comparación de las propiedades entre la emulsión inversa 90/10 operativa en campo y la emulsión inversa 90/10 envejecido.**

<b>Propiedades</b>	<b>Lodo envejecido</b>	<b>Lodo operativo en campo</b>
Densidad [lpg]	12	12,3
Viscosidad plástica [cp]	26	23
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	16	15
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	7	10
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	12	17
Pérdida de filtrado ATAP [cc]	5	7
Espesor del revoque [1/32”]	2	2
Estabilidad eléctrica (Volt)	1312	1100

Es importante mencionar que los valores del lodo operativo en campo son obtenidos, de la data proveniente del taladro PRIDE I, pozo SVS-416. La formulación se encuentra en la tabla II del Apéndice 2.

De la tabla IV.23 se observa que los valores del lodo propuesto son realmente similares y en algunos casos mejores, a las propiedades del lodo utilizado en el campo.

Es posible que algunas propiedades como la fuerza de gel, que todavía se encuentra dentro del rango altamente bajo, puedan ser estimulados con la integración de productos como activadores polares y modificadores reológicos, estos productos forman parte del diseño de la formulación de los lodos utilizados en campo (Ver Tabla II Apéndice 2).

Es alentador ver que el valor de la estabilidad eléctrica del lodo propuesto es mayor que la que posee el lodo usado en campo.

#### IV.6 Lodos base aceite vegetal

En esta sección se discutirán fluidos de perforación tipo emulsiones inversas, con aceite vegetal como fase continua.

##### IV.6.1 Lodos aceite vegetal – agua 70/30.

A continuación se muestra el comportamiento de un fluido de perforación aceite vegetal – agua, con una relación volumétrica 70/30.

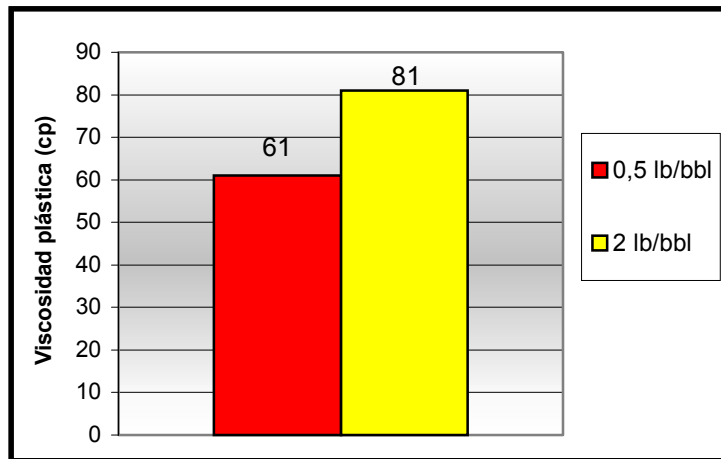
**Tabla IV.24 Formulaciones de fluidos de perforación tipo emulsión inversa aceite vegetal – agua 70/30 con diferentes concentraciones de arcilla organofílica.**

Componentes	Gravedad Específica	Masa (lb/bbl)	
		Lodo 1	Lodo 2
Aceite vegetal	0,816	161,7	161,68
Arcilla Organofílica	1,57	0,5	2
Z-Trol 60	0,915	12	12
Salmuera @ 200000 ppm	1,18	83,57 20,89	85,71 21,42
Controlador de filtrado	1,03	4	4
Densificante	4,2	214,84	207

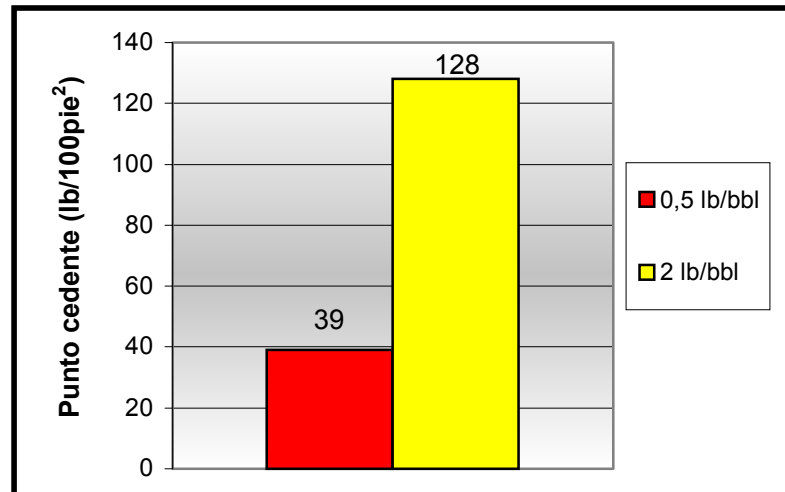
**Tabla IV.25 Propiedades de los fluidos de perforación tipo emulsión inversa aceite vegetal – agua 70/30, con diferentes concentraciones de arcilla organofílica.**

Propiedades	Lodo 1	Lodo 2
Densidad [lpg]	12	12
Viscosidad plástica [cp]	61	81
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	39	128
Viscosidad aparente [cp]	80	145
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	35	26
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	50	53
Pérdida de filtrado [cc]	---	---
Espesor del revoque [1/32]	---	---
Estabilidad eléctrica (Volt)	650	670

Los valores obtenidos indican la floculación del lodo, causado por la acción de la gran cantidad de agua que es agregada al sistema.



**Figura IV. 26 Comportamiento de la viscosidad plástica en emulsiones inversas aceite vegetal / agua 70/30 variando la concentración de arcilla organofílica**



**Figura IV. 27 Comportamiento del Punto cedente en emulsiones inversas aceite vegetal / agua 70/30 variando la concentración de arcilla organofílica**

Los resultados para el punto cedente se encuentran en un rango intolerable e imposibles de ser aplicados en campo, ya que causarían la socavación del hoyo. La viscosidad plástica del lodo con 0,5 lb/bbl de arcilla organofílica fue medida en 61 cp, una restricción al flujo muy elevada, originada por los esfuerzos de corte entre los dos líquidos presentes en el sistema.

Cuando la concentración de arcilla fue de 2 lb/bbl, la situación empeoró, porque la cantidad de agua era aún mayor y además, se adicionaba la mayor cantidad de sólidos, trayendo como consecuencia el aumento de la fricción mecánica.

Al someter los lodos a la prueba de ATAP, se pudo ver en el filtrado obtenido la presencia de dos fases (agua y aceite), indicando que la emulsión fue rota.

Al ver los aumentos en la viscosidad de forma excesiva al agregar agua al sistema de lodo base aceite vegetal, puede concluirse que bajo esas condiciones del producto Z – Trol 60 como emulsivo y humectante, y además la fase continua aceite vegetal, es imposible la formulación de un lodo con proporción volumétrica Aceite vegetal – Agua 70/30.



**IV.6.1 Lodos aceite vegetal – agua 80/20.**

En la tabla IV.26 se presentan lodos de perforación con diferentes concentraciones de Z – Trol 60.

**Tabla IV.26 Lodos emulsión inversa aceite vegetal – agua 80/20, variando la concentración de Z – Trol 60.**

Componentes	Gravedad Específica	Concentración de Z – Trol 60		
		8	10	12
Aceite vegetal	0,86	185,62	186,62	187,48
Arcilla Organofílica	1,57	6	6	6
Salmuera @ 200000 ppm	1,18	54 13,5	54,25 13,56	54,5 13,65
Controlador de filtrado	1,03	4	4	4
Densificante	4,2	232,88	229,57	226,39

**Tabla IV.27 Propiedades de los lodos emulsión inversa aceite vegetal – agua 80/20 antes y después de ser envejecidos variando la concentración de Z – Trol 60.**

Propiedades	Lodo 1		Lodo 2		Lodo 3	
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después
Densidad [lpg]	12,1	12	12	11,9	12,3	12
Viscosidad plástica [cp]	40	31	49	38	43	37
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	29	5	33	8	24	12
Viscosidad aparente [cp]	56	49	66	42	51	43
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	3	3	3	4	7	1
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	5	4	8	7	12	1
Pérdida de filtrado [cc]	2	4	1	3,5	1	2
Espesor del revoque [1/32]	2	2	1	2	1	2
Estabilidad eléctrica (Volt)	940	860	1080	976	1112	1008

De la tabla IV.27 se puede observar el efecto adelgazante, cuando cada uno de los lodos es sometido a un efecto prolongado de temperatura en el horno de envejecimiento.

Los valores obtenidos cuando los lodos han sido envejecidos son realmente bajos, lo que hace estos sistemas inoperables en campo.

Las propiedades más críticas son las de punto cedente y fuerza de gel, para el lodo de 8 lb/bbl de Z – Trol 60, el valor de punto cedente cayó de 29 a 5 lb/100pie<sup>2</sup>, que es un valor sumamente bajo. Lo mismo para la fuerza de gel que antes de que el lodo fuera envejecido ya eran valores realmente bajos, y al someterse a la temperatura llegaron a 3 lb/100pie<sup>2</sup> para 10 segundos y 4 lb/100pie<sup>2</sup> para 10 minutos, encontrándose en el rango de geles frágiles (Azar, J. y Lummus, J 1984).

Los valores obtenidos para la concentración de 10 lb/bbl, son tal vez los más aceptables, aunque aún son considerados como bajos. El punto cedente original de 33 lb/100pie<sup>2</sup> cayó a un valor de 8 lb/100pie<sup>2</sup>, que puede considerarse como aceptable. La fuerza de gel medida

para el lodo envejecido fue el que menos cambios sufrió, pero sus valores de 4 lb/100pie<sup>2</sup> a los 10 segundos, y para los 10 minutos de 7 lb/100pie<sup>2</sup>, valores que harían descartar a este lodo para una operación de campo.

Para la concentración de 12 lb/bbl ocurre la destrucción de las propiedades tixotrópicas del lodo cuando este es sometido al envejecimiento. Esto quedó evidenciado cuando los valores originales de 7 lb/100pie<sup>2</sup> a los 10 segundos y 12 lb/100pie<sup>2</sup> a los 10 minutos fueron medidos en 1 lb/100pie<sup>2</sup> después de envejecido.

Con la finalidad de intentar mejorar las propiedades tanto del punto cedente como de la fuerza de gel después del rolado, se aumentó la concentración de arcilla. En la tabla IV. 28 se observa la formulación del sistema.

**Tabla IV.28 Formulación de lodos emulsión inversa aceite vegetal – agua 80/20 variando la concentración de arcilla organofílica.**

<b>Componentes</b>	<b>Gravedad Específica</b>	<b>Masa (lbs / bbl)</b>	<b>Tiempo de Agitación (min)</b>
Aceite vegetal	0,86	185,76	---
Arcilla Organofílica	1,57	8	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	54 13,5	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	238,4	20

Las propiedades arrojadas pro este sistema antes y después de rolado pueden ser observada en la tabla IV. 29.

**Tabla IV.29 Propiedades de los fluidos de perforación tipo emulsión inversa aceite vegetal – agua 80/20, con diferente concentración de arcilla organofílica.**

Propiedades	Original	Envejecido
Densidad [lpg]	12,1	12
Viscosidad plástica [cp]	42	35
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	50	20
Viscosidad aparente [cp]	70	45
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	9	3
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	16	6
Pérdida de filtrado [cc]	3	5
Espesor del revoque [1/32]	2	2
Estabilidad eléctrica (Volt)	1011	916

Como se puede observar en la tabla IV.29, el lodo envejecido con 8 lb/bbl de arcilla mantuvo la misma tendencia de adelgazamiento que los sistemas 80/20 revisados anteriormente. A pesar de que el valor del punto cedente fue de 20 lb/100pie<sup>2</sup>, lo cual puede estar asociado a una adecuada limpieza del hoyo. No es apropiado recomendar el uso de este sistema debido a que los valores obtenidos para la fuerza de gel son demasiado pequeños, traduciéndose en la imposibilidad de suspender los ripios provenientes del proceso de perforación en condiciones estáticas.

Según las pruebas realizadas, es evidente la incompatibilidad existente entre el aceite vegetal y el Z – Trol 60, probablemente a la acción de la temperatura de 300 °F donde posiblemente ocurra la degradación del éster, siendo el punto crítico de estas formaciones de estructuras de gel.

#### IV.6.2 Lodos base aceite vegetal – agua 90/10.

En la tabla IV.30 se puede observar la formulación de un lodo base aceite de tipo emulsión inversa 90/10, para que en la tabla IV.31 se muestren los valores de las propiedades originales y después de envejecido.

**Tabla IV.30 Formulación de lodos emulsión inversa aceite vegetal – agua 90/10.**

Componentes	Gravedad Específica	Masa (lbs / bbl)	Tiempo de Agitación (min)
Aceite vegetal	0,86	210,7	---
Arcilla Organofílica	1,57	8	15
Z-Trol 60	0,915	10	15
Salmuera @ 200000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	27,22 6,81	30
Controlador de filtrado	1,03	4	15
Densificante	4,2	237,37	20

**Tabla IV.31 Propiedades de los fluidos de perforación tipo emulsión inversa aceite vegetal – agua 90/10**

Propiedades	Original	Envejecido
Densidad [lpg]	12,1	11,9
Viscosidad plástica [cp]	30	25
Punto cedente [lbs/100pies <sup>2</sup> ]	17	9
Viscosidad aparente [cp]	35	29
Gel a 10 seg [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	4	3
Gel a 10 min [ lbs/100pies <sup>2</sup> ]	6	5
Pérdida de filtrado [cc]	1	4
Espesor del revoque [1/32]	1	1
Estabilidad eléctrica (Volt)	1412	1309

Al revisar los resultados obtenidos del fluido de perforación en la tabla número IV.30, podemos observar al igual que el sistema aceite vegetal – agua (80/20), los valores en las propiedades reológicas sufren un descenso, lo cual es originado por la degradación de la fase continua debido a la acción de la temperatura.

La propiedad más resaltante, y lo es igual para las otras relaciones volumétricas, es la fuerza de gel, la cual es considerada baja imposibilitando la aplicación de un lodo de este tipo en una operación de perforación.

## V. CONCLUSIONES

1. El Z Trol 60 es un aditivo nacional capaz de formar emulsiones estables en lodos de perforación base aceite mineral y vegetal, excepto en relaciones 70/30 de este último.
2. Los fluidos de perforación base aceite mineral con el aditivo Z Trol 60 presenta alta resistencia a la temperatura.
3. Los sistemas formulados con Z Trol 60, tanto en aceite mineral como en aceite vegetal poseen valores operables en campo de viscosidad plástica, punto cedente y pérdida de filtrado.
4. Los espesores de revoque obtenidos con Z Trol 60 son delgados y con excelentes propiedades en lodos con densidades de 12 lbs/gal.
5. El aditivo Z Trol 60 no contribuye favorablemente a la tixotropía de los sistemas evaluados.

## VI. RECOMENDACIONES

- ✓ Introducir en las formulaciones el uso de modificadores reológicos y activadores polares que permitan aumentar las propiedades tixotrópicas.
- ✓ Modificar la composición química del Z Trol 60 con miras a mejorar los valores de fuerzas de gel.
- ✓ Probar el aditivo Z Trol 60 en otras fases continuas como polialfaolefinas.
- ✓ Utilizar carbonato de calcio como material densificante en sustitución de barita, con la finalidad de aprovechar sus cualidades de material puenteante.
- ✓ Realizar pruebas a otras densidades y ver el comportamiento de sus propiedades.



**VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- ✓ AZAR, J. J. ; LUMMUS, J. L., Drilling Fluids Optimization A Practical Field Approach. Peenn Well Books. Tulsa, Oklahoma. (1986).
- ✓ CHENEVERT, G., Fluidos de Perforación y Problemas Asociados en el Hoyo. CEPET, Maracaibo, Venezuela. (1993).
- ✓ Guía Para el Manejo Seguro de Lodos Base Aceite, M-I Drilling Fluids, Departamento de Calidad, (1998).
- ✓ GRAY R., George., Darley H., Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids., Gulf Publishing Company., fifth edition. (1998).
- ✓ MORRISON, R. y BOYD, R. Química Orgánica. Boston. EditorialAddison –Wesley Iberoamericana, Quinta Edición, (1987).
- ✓ PRIETO, Alí., Tecnología Aplicada a los Fluidos de Perforación., CEPET., Maracaibo, Venezuela, (1993).
- ✓ SALAGER, J., Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para Obtener las Propiedades Deseadas. Estado del Arte., FIRP 747-B, Universidad de los Andes., Mérida, Venezuela, (1999).
- ✓ SALAGER, J., Uso de los Surfactantes en la Industria Petrolera., FIRP-350. Universidad de los Andes., Mérida, Venezuela, (1998).
- ✓ SALAS, G. Curso de Perforación. Tomo I. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. (1961).
- ✓ SILVA, L., Seminario sobre Lodos Emulsión Inversa Invermul/EZ – mul, Baroid de Venezuela, S.A. Gerencia Técnica, Caracas, Octubre de 1989.

- ✓ VENNARD, J. Y STREET, R., Elementos de Mecánica de Fluidos., Compañía Editorial Continental. México. (1979).
  
- ✓ ZORRILLA, G., “Análisis y Evaluación de las Características Reológicas, Físicas y Químicas del Aceite Vegetal FE-22”, Trabajo de Ascenso., UCV., (1999).

## VIII. GLOSARIO DE TÉRMINOS.

### “A”

**Absorción:** Penetración o desaparición aparente de moléculas o iones de una o más sustancias en el interior de un sólido o de un líquido.

**Ácido graso:** Con este nombre se conocen en general, los ácidos monocarboxílicos de la serie alifática, en particular aquellos que forman parte de los lípidos.

**Aglomerado:** Conjunto de partículas que se adhieren unas con otras.

**Amina:** Compuestos orgánicos nitrogenados obtenidos del amoníaco por sustitución de uno o más átomos de hidrógeno por radicales alquílicos o arílicos.

### “C”

**Coloide:** Según la publicación A.P.I. es toda partícula cuyo tamaño es menor de 2 micrones.

**Coalescencia:** Proceso por el que las partículas pequeñas se combinan para formar partículas más grandes.

**Consistencia:** Resistencia de un fluido a la deformación. Para fluidos simples newtonianos la consistencia es idéntica a la viscosidad, para fluidos complejos o no newtonianos, idéntica con la viscosidad aparente.

### “D”

**Dispersión:** Mezcla física frecuentemente temporal, de dos fases insolubles.

### “E”

**Emulsión:** Mezcla líquida heterogénea, básicamente permanente, de dos líquidos que normalmente no se disuelven el uno en el otro, pero que son mantenidos en suspensión, el uno en el otro, por agitación mecánica o más frecuentemente, mediante la adición de sustancias conocidas como emulsivos.

**Ester:** Compuesto que está formado por la sustitución del hidrógeno de un ácido por un radical alcohólico.

**Envejecimiento:** Proceso para ser viejo un material por la influencia continua de la luz, temperatura, presión, tiempo, etc.

“F”

**Floculación:** Asociación de partículas sin gran cohesión, en grupos ligeramente ligados; asociación no-paralela de plaquetas de arcilla. En suspensiones concentradas, tal como es el caso de los lodos, la floculación da por resultado la gelificación.

**Fluido:** Sustancia que no puede sostener fuerzas de cizalladura cuando se encuentra en equilibrio estático tienen la capacidad de tomar la forma del recipiente que los contiene.

**Fluido Newtoniano:** Es el fluido básico y más simple desde el punto de vista de la viscosidad, en el cual la fuerza de corte es directamente proporcional a la velocidad de corte. Estos fluidos empiezan a moverse inmediatamente cuando se aplica una presión o fuerza por encima de cero.

**Fluido No Newtoniano:** Es aquel fluido donde la fuerza de corte no es directamente proporcional a la velocidad de corte.

“G”

**Gel:** Sistema semisólido que consta de un sólido mantenido en un líquido; una forma más sólida que una solución.

**Gravedad Específica:** Es la relación entre su densidad y la densidad de un fluido de referencia, ambos a la misma temperatura, las gravedades específicas son números adimensionales.

“L”

**Lipofilico:** Molécula que tiene afinidad con el aceite.

“P”

**Polímero:** Sustancia formada por la unión de dos o más moléculas de la misma clase, ligadas por sus extremos para formar otro compuesto que tiene los mismos elementos en la misma proporción que la sustancia original, pero con un peso molecular más elevado y con diferentes propiedades químicas.

**Presión Osmótica:** Presión ejercida por una sustancia disuelta en virtud del movimiento de sus moléculas. Puede medirse por la presión que debe aplicarse a la solución para evitar en ella la ósmosis.

**Punto de Anilina:** La menor temperatura en que los volúmenes iguales de anilina recién destilada y el petróleo que se está probando son completamente miscibles. Este ensayo da una indicación del tipo de petróleo en cuestión (parafínico, naftico). El punto de anilina de los crudos y sus derivados, indica el efecto dañino que ellos ejercen sobre el medio ambiente. Mientras más bajo sea el punto de anilina, más serio es generalmente el efecto del petróleo sobre el medio ambiente.

“R”

**Reología:** Estudio de deformación y flujo de materia.

**Revoque:** Sólidos suspendidos que se depositan sobre un medio poroso durante el pase de la parte fluida del lodo hacia la formación.

“S”

**Solvatación:** Adsorción de las moléculas de un líquido dispersante por partículas dispersas.

**Surfactante:** Material que tiende a concentrarse en la interfase. Se emplea en lodos para controlar el grado de emulsificación, la humectación.

“T”

**Tensión Superficial:** Fuerza que actúa en la interfase entre un líquido y su propio vapor y que tiende a mantener el área de esa superficie en un mínimo.

**Tixotropía:** Capacidad de un fluido para desarrollar resistencia de gel con el tiempo. Propiedad de un fluido que hace que adquiera una estructura de gel rígido o semi-rígido si se deja en reposo, pero se convierte nuevamente en fluido por agitación mecánica. Este cambio es reversible.

**Torsión:** Medida de la fuerza que se aplica a un eje para hacerlo rotar. En un equipo rotatorio se aplica especialmente a la rotación de la tubería de perforación en su acción contra la pared del pozo.

“V”

**Velocidad de Corte:** Tasa o velocidad con que una acción, resultante de fuerzas aplicadas, determina o tiende a determinar que dos partes adyacentes de un cuerpo se deslicen una con respecto a la otra en una dirección paralela a su plano de contacto.

## FORMULACIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS LODOS

Para Colocar las cantidades necesarias de aditivos en un fluido de perforación, es obligatorio medir sus cantidades mediante el uso de balanzas, el procedimiento general se expresa en los siguientes pasos:

- Pesar en la balanza electrónica las cantidades seleccionadas o calculadas en los aditivos.
- Encender el agitador, y en un vaso mezclador colocar poco a poco los aditivos ya pesados, y en el orden seleccionado, respetando los tiempos establecidos de agitación entre uno y otro. Realizar este procedimiento hasta que todos los aditivos hallan sido añadidos en su totalidad.

## DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

El procedimiento práctico para determinar la densidad de un fluido de perforación es:

- Colocar el estuche que contiene la balanza en una superficie nivelada.
- Llenar el recipiente de la balanza hasta el tope con el fluido de perforación , asentar la tapa o cubierta con un movimiento firme. Parte del fluido que se encuentra en exceso saldrá expulsado por el orificio en la cubierta, así el recipiente estará completamente lleno.
- Remover el exceso de lodo que esta alrededor del recipiente y probablemente en el brazo, que puedan alertar la medición.
- Se coloca la balanza sobre el soporte, donde e punto de apoyo encaja en la ranura de la base, luego con movimiento del caballete equilibramos el brazo, este estará equilibrado cuando la burbuja esta en el centro del nivel.

- La densidad quedará denotada cuando al lograr el equilibrio, se lea del punto más cercano hasta la base del soporte, en una de las cuatro escalas impresas en el braza de la balanza, en nuestro caso la lectura se hace en lbs/gal.

Estas balanzas pueden calibrar con agua dulce para asegurar la exactitud de las mediciones. El valor debe ser de 8,33 lbs/gal, en caso de que no sea así se puede corregir gracias al ajuste del tornillo de la balanza o haciendo juego con los pesos de plomo encerrados en el receptáculo colocados al final del brazo de la balanza.

### **DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS**

- Colocar Una muestra de lodo en la copa de calentamiento y mediante el regulador de temperatura seleccionar un valor de 150 °F, la cual puede ser verificada con la introducción de un termómetro en contacto íntimo con la copa de calentamiento.
- Sumergir la camisa rotatoria del viscosímetro (cilindro exterior) hasta una marca indicativa a donde debe estar el nivel del lodo.
- Seleccionar en el control de velocidad del viscosímetro la lectura a 600 rpm, y con la camisa girando a esta velocidad, esperamos la estabilidad de la lectura y registramos el valor apreciado en el dial.
- Reducimos la velocidad en el control y seleccionamos 300 rpm, una vez estabilizada la lectura, registramos el valor del dial.
- Análogamente se repite el procedimiento para 200, 100, 6, 3 rpm, que permitirán en caso de ser necesario la construcción de el reograma de el fluido.
- La viscosidad plástica de cada uno de los lodos formulados será determinada por la resta entre la lectura a 600 con la de 300 rpm.



- El punto cedente (YP) en libras/100 pies<sup>2</sup> es igual a la lectura a 300 rpm menos el valor de la viscosidad plástica.
- La viscosidad aparente vendrá de dividir la lectura de 600 rpm por dos.
- Para la medición de las propiedades del gel, se cizalla el lodo a alta velocidad durante unos 15 segundos, luego se permite que se mantenga sin ningún esfuerzo cortante durante 10 segundos. Al finalizar este tiempo se hace girar el rotor seleccionando una velocidad de 3 rpm e inmediatamente tomamos la medida de la máxima elongación sobre el dial de la aguja; este valor será reportado como gel a los 10 segundos.
- Para los geles a 10 minutos, el procedimiento es análogo y se somete a fuerzas de cizallamiento a una alta velocidad y eliminamos el efecto durante 10 minutos. Se selecciona la velocidad de 3 rpm y registramos en el dial como la máxima elongación, la resistencia del gel de 10 minutos en lbs/100 pies<sup>2</sup>.

#### **DETERMINACIÓN DE LA ESTABILIDAD ELÉCTRICA**

- Chequear que la pinza este limpia y seca, para evitar el tomar medidas erróneas.
- Llenar el recipiente de prueba, tomando las mismas precauciones que en la pinza de medición.
- Colocar en contacto íntimo la pinza probadora con el lodo del recipiente y leemos de la pantalla del aparato los valores de potencial obtenido, luego de accionar el botón de “test” del panel del control del equipo.
- Se registra este valor, y se oprime el botón de RESET para borrar la lectura anterior y obtener un nuevo valor.

- Luego de tener una lista de valores, estos se promedian y se reporta el valor como estabilidad eléctrica de la emulsión.

## **EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE FILTRADO**

Para la prueba de pérdida de filtrado estática de los lodos de alta presión y alta temperatura se usa el filtro prensa, un equipo diseñado para probar los lodos a temperaturas y presiones elevadas.

El siguiente procedimiento de prueba estándar, para 300 °F y 500 lpc, adaptado por API, con un área de filtrado de 3,5 pulg. y un volumen aproximado de 250 cc. Los pasos pueden ser resumidos en:

- Encender la camisa de calentamiento y colocar el termómetro en el receptáculo correspondiente al exterior de la camisa.
- Calentar hasta una temperatura de 10 °F por encima de la temperatura de la prueba y mantener los 300 °F agitando el termostato.
- Agitar la muestra del lodo y clocarla en la celda, asegurándose que en la válvula inferior se encuentren cerradas. La celda no se debe llenar a más de 3/4 de pulgadas de la parte superior de la celda.
- Colocar el papel de filtro (Whatman No. 50 ó equivalente) en la pestaña de la celda.
- Colocar la tapa de la celda y asegurar los tornillos, asegurarse que la válvula superior esté correctamente cerrada.
- Se coloca una celda dentro de la camisa de calentamiento, chequeando que encaje mediante un movimiento giratorio. Se debe colocar con la tapa hacia abajo dentro de la camisa de calentamiento.

- Colocar el termómetro al receptáculo correspondiente al cuerpo de la celda.
- Colocar la unidad a través de la cual se suministra la presión hacia la válvula superior y trancarla con los ganchos de seguridad.
- Con un procedimiento análogo se asegura la válvula inferior.
- Presurizar la celda con 100 lpc para evitar la vaporización de los líquidos por el calentamiento girando 1/4 de vuelta en dirección contraria a las manecillas del reloj, (válvula de arriba y válvula de abajo).
- Cuando en los termómetros se alcance la temperatura de prueba (300 °F), se abre la válvula de fondo y aumente la parte superior de la celda la presión hasta 600 °F, abrimos la válvula 1/4 de vuelta en dirección contraria a las manecillas del reloj, para comenzar la filtración.
- Colocar una probeta graduada a disposición, con el fin de recolectar el filtrado.
- La temperatura debe mantenerse en un rango de  $\pm 5$  °F y debe chequearse que al recolectar el filtrado la contrapresión no exceda los 100 psi.
- La duración de la prueba es de 30 minutos después de esto, se recoge el filtrado y se reporta como el doble de su valor (cm<sup>3</sup>).
- Se cierran las válvulas y se libera la presión del equipo en el regulador de presión. Remover la celda y esperar a que esta se enfríe.
- Sacar la presión que se encuentra dentro de la celda de manera cuidadosa, a través de la válvula opuesta a la tapa donde se encuentra el papel de filtro. Cerrar la

válvula y voltear la celda y abrir la otra para chequear cualquier salida de presión que pueda existir.

- Tomar el revoque y revisar sus condiciones y medir su espesor.

## **DETERMINACION DE PORCENTAJE DE LIQUIDO Y SOLIDOS**

El procedimiento a seguir para medir el porcentaje de líquido y sólidos en el sistema, esta descrito a continuación:

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

- ✓ Leer el volumen de líquido (aceite y agua) recolectado en el cilindro graduado.
- ✓ El volumen de sólidos presente en el lodo se determina por diferencia.

## **ENVEJECIMIENTO DINAMICO**

El procedimiento a seguir consta de los siguientes pasos:

- ✓ Abra la celda de envejecimiento removiendo la tapa exterior y la tapa interior y coloque la cantidad apropiada de muestra en la celda de envejecimiento aproximadamente 350cc.
- ✓ Coloque la tapa interior sobre la celda de envejecimiento asegurándose que esté apoyada correctamente (inspeccione el anillo de teflón y reemplácelo de ser necesario) y luego también coloque la tapa exterior sobre la celda de envejecimiento y ajústela a mano. Después ajuste los tornillos fuertemente con una llave Allen.
- ✓ Inserte el vástago de la válvula dentro del hueco roscado en el centro de la tapa interior y ajústelo con una llave ajustable.
- ✓ Coloque el regulador de la celda del filtro AP-AT sobre el vástago de la válvula. Asegure el regulador sobre el vástago de la válvula insertando el pasador de retención.
- ✓ Cierre el tornillo en T sobre el regulador hasta que se obtenga una presión de 100lpc. Abra el vástago hasta la mitad para presurizar la celda, luego cierre el vástago de la válvula cuando la presión requerida haya ingresado a la celda.

- ✓ Abra el tornillo en T sobre el regulador hasta que gire fácilmente y la válvula de alivio de presión. Remueva el pasador de retención y el regulador de presión del vástago de la válvula.
  
- ✓ Prenda el horno de envejecimiento a 200°F (no girar los rodillos). Cuando el horno esté tibio, coloque la celda de envejecimiento conteniendo la mezcla presurizada y dentro del mismo (haga girar los rodillos). Envejezca por un período de 16 horas.
  
- ✓ Remueva la celda y permita que se enfríe. Coloque una tela u otro material sobre la abertura del vástago de la válvula. Abra el vástago de la válvula lo suficiente para aliviar toda la presión dentro de la celda, no intente abrir el vástago de la válvula para aliviar la presión si la temperatura de la celda está por encima de 200 °F.
  
- ✓ Afloje lentamente el conjunto de tornillos sobre la tapa de la celda. Remueva la tapa exterior y la tapa interior. Observe la condición del lodo y proceda a realizar las medidas.

## FORMULACION DE LODOS UTILIZADOS EN CAMPO

En la tabla IX.1 se puede observar la formulación de un lodo 100% aceite, utilizado en el pozo SVS-410, Area: Bolque IX, Campo Lagomedio, Estado Zulia.

**Tabla IX.1 Formulación de lodo 100% Aceite utilizado en campo**

<b>Aditivo</b>	<b>Concentración (lb/bbl)</b>
Arcilla Organofílica	8
Gilsonita	12,60
Emulsivo	6
Humectante	4
Carbonato M-100	70
Modificador Reológico	2
Controlador de Filtrado	5
Carbonato Micronizado	60

La tabla IX.2 muestra un fluido de perforación con una relación aceite mineral – agua 90/10 utilizado en el pozo SVS-416, Area: Bloque IX, Campo Lagomedio, Estado Zulia.

**Tabla IX.2 Formulación de lodo 90/10 Aceite mineral - agua utilizado en campo**

<b>Aditivo</b>	<b>Concentración (lb/bbl)</b>
Arcilla Organofílica	9,02
Gilsonita	6,22
Emulsivo	8,38
Activador Polar	2,04
Carbonato M-100	85,88
CaCl <sub>2</sub>	8,9
Controlador de Filtrado	4,41
Intercarb 30/35	17,61
Intercarb 40/45	26,25
Humectante	5,24



**CALCULOS TIPO**

Para realizar las formulaciones fue necesario el uso de ciertos cálculos matemáticos, el modelo de éstos queda ilustrado en el siguiente ejemplo:

Componente	G.E	Masa (lb/bbl)
Green-oil	0,86	-----
Arcilla organofílica	1,57	8
Z – Trol 60	0,816	10
Salmuera @ 200.000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	-----
Tru Flo 100	1,3	4
Barita	4,2	-----

Asumimos un volumen de aceite:

Vaceite = 243

$D = m/V; \quad m = D * V_{aceite}$

$V_w = \frac{V_{agua}}{O/W}$

maceite = (0,86)\*(243 cc) = 208,98 cc

$V_w = \frac{243cc}{90/10} = 27 \text{ cc H}_2\text{O}$

mw = 27 gr H<sub>2</sub>O

$grs \text{ sto} = \frac{ppm * (grs \text{ slv})}{10^6 * (1 - (ppm/10^6))} = \frac{200.000 * (gr \text{ slv})}{10^6 * (1 - (200.000/10^6))} = 0,25 \text{ grs slv}$

grs sto = 0,25 \* 27 = 6,75

Msal = Mw + grs sto = (27 + 6,75)grs = 33,75 grs

Vsal = 33,75 / 1,18 = 28,60 cc

Masa de densificante:

$$MBa = 504 - \text{Maceite} - \text{Msal} - \text{Meditivos}$$

$$MBa = 504 - 208,98 - 33,75 - 22 = 239,27 \text{ grs}$$

$$VBa = MBa/G.E = 239,27 / 4,2 = 56,97 \text{ cc}$$

$$\text{Sumatoria de V} = 243 + 56,97 + 28,60 + 19,91 = 348,88 \text{ cc es distinto a } 350 \text{ cc}$$

Asumimos ahora :

$$\text{Vaceite} = 245 \qquad \qquad \text{maceite} = 210,7 \text{ cc}$$

$$V_w = \frac{\text{Vagua}}{\text{O/W}}$$

$$V_w = 27,22 \text{ cc H}_2\text{O} \qquad \qquad m_w = 27,22 \text{ gr H}_2\text{O}$$

$$\text{grs sto} = \frac{\text{ppm} * (\text{grs slv})}{10^6 * (1 - (\text{ppm}/10^6))} = \frac{200.000 * (\text{gr slv})}{10^6 * (1 - (200.000/10^6))} = 0,25 \text{ grs slv}$$

$$\text{grs sto} = 0,25 * 27,22 \text{ cc} = 6,81$$

$$\text{Msal} = M_w + \text{grs sto} = 34,03 \text{ gr}$$

$$\text{Vsal} = 34,03 / 1,18 = 28,73 \text{ cc}$$

Masa de densificante:

$$MBa = 504 - \text{Maceite} - \text{Msal} - \text{Meditivos}$$

$$MBa = 504 - 210,7 - 34,03 - 22 = 237,27 \text{ grs}$$

$$VBa = MBa/G.E = 237,27 / 4,2 = 56,39 \text{ cc}$$

$$\text{Sumatoria de V} = 245 + 56,39 + 28,73 + 19,91 = 350 \text{ cc} = 350 \text{ cc}$$

$$\text{Como } D = M/V = 504/350 = 1,44$$

$$D = 1,44 * 8,33 = 12 \text{ lpg}$$

Donde:

Vaceite = Volumen de Aceite

V<sub>w</sub> = Volumen de Agua

M<sub>w</sub> = Masa de Agua

Grs sto = Gramos de soluto

Msal = Masa de salmuera

MBa = Masa de Barita

VBa = Volumen de Barita

La formulación queda:

Componente	G.E	Masa (lb/bbl)
Green-oil	0,86	210,7
Arcilla organofílica	1,57	8
Z – Trol 60	0,816	10
Salmuera @ 200.000 ppm CaCl <sub>2</sub>	1,18	27,22 6,81
Tru Flo 100	1,3	4
Barita	4,2	56,39