

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA FORMULACIÓN DE FLUIDOS DE BAJA DENSIDAD CON MICROESFERAS DE VIDRIO

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Meneses Y., Ma. Gabriela
para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA FORMULACIÓN DE FLUIDOS DE BAJA DENSIDAD CON MICROESFERAS DE VIDRIO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Rodolfo Berrios Tómolá

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Gerardo Sánchez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Meneses Y., Ma. Gabriela
para optar al Título
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

Meneses Y., María G.

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA
FORMULACIÓN DE UN FLUIDO DE BAJA DENSIDAD CON
MICROESFERAS DE VIDRIO**

**Tutor Académico: Prof. Rodolfo Berrios. Tutor Industrial: Ing. Gerardo
Sánchez. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de
Ingeniería Mecánica. Año 2001, 140 pág.**

Reología, Modelo de Maxwell, Fluidos de Baja Densidad.

Se realizó un estudio experimental sobre el comportamiento reológico de un fluido de perforación de baja densidad, caracterizado por ser una emulsión de aceite en agua con micro-esferas de vidrio como agente reductor de densidad, para establecer las características constitutivas del fluido. Se evaluó el comportamiento reológico del fluido tanto antes como después de someter a condiciones de corte y temperatura. Se ajustó el comportamiento reológico a las condiciones de aplicación en campo con la incorporación de polímeros, evaluando el comportamiento viscoelástico mediante el modelo sencillo de Maxwell. Finalmente se obtuvo como resultado un fluido de baja densidad, con características reológicas de alta viscosidad a bajas tasas de corte y un comportamiento elástico que disminuye la invasión de fluido hacia el yacimiento, minimizando el daño a la formación.

AGRADECIMIENTOS

A Dios Todopoderoso y a la Virgen Rosa Mística, por iluminarme siempre el camino correcto.

A mis padres, Ma. Teresa y Juan José, por apoyarme en todo momento.

A José Gregorio y Juan José, por su paciencia y comprensión.

A PDVSA Intevep, Gerardo Sánchez por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo.

A los profesores Rodolfo Berrios y Manuel Martínez.

A Ramón Colina por el apoyo, enseñanza y amistad durante el desarrollo de este trabajo.

A Clara Mata, por su valiosa contribución, siempre dispuesta a cooperar tanto en la parte técnica como en la parte de crecimiento personal.

Al grupo de Fluidos de Perforación, por toda su colaboración y amistad, en especial a Sandra Garavito, Mayrett Rojas, Carlos Dalas, Yenny Rojas, Laura Villegas, Francisco Navas, Miguel Rondón, Pavel Molina, Sarkis K., Ana Sofía y Reinaldo Gabay.

A Miguel A. por su constante entusiasmo, cariño e incondicional apoyo.

A mis compañeros, Tomás Armas, Wilfredo Montenegro, Claudio Rosseti y Miguel Rosatto, por su calidad humana y darme la oportunidad de ser su amiga.

A Eleanora Hernández, por enseñarme el significado de la palabra amistad.

A la Universidad Central de Venezuela, por los mejores cinco años, recibirme en sus aulas y darme la dicha de poder convertirme en un ciudadano útil.

Me lo dices, y lo olvido.

Me lo enseñas, y lo recuerdo.

Me haces intervenir, y aprendo.

Benjamín Franklin

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: EL PROBLEMA	
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo General	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	
2.1 PRESIÓN DE FORMACIÓN	5
2.2 PRESIÓN HIDROSTÁTICA (de los líquidos).....	5
2.3 PRESIÓN DE CIRCULACIÓN	6
2.4 DAÑO A LA FORMACIÓN	7
2.5 INVASIÓN DE FLUIDO	8
2.6 PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN	8
2.7 FLUIDOS DE PERFORACIÓN	9
2.7.1 Funciones de los fluidos de perforación	9
2.7.2 Propiedades y características de los fluidos de perforación ..	12
2.7.3 Composición de los fluidos de perforación	14
2.7.3.1 Fases del fluido de perforación	15
2.7.3.2 Emulsión y tipos de emulsión	15
2.8 REOLOGÍA	16

2.9 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS	17
2.9.1 Fluido Newtoniano	18
2.9.2 Fluido no Newtoniano Independiente del tiempo	18
2.9.2.1 Fluidos Pseudoplásticos (shear thinning)	19
2.9.2.2 Fluidos Dilatantes (shear thickening)	19
2.9.2.3 Fluidos Plásticos (Plástico de Bingham)	20
2.9.3 Fluido no newtoniano dependientes del tiempo	20
2.9.3.1 Fluidos tixotrópicos	21
2.9.3.2 Fluidos reopéticos	21
2.10 ECUACIONES CONSTITUTIVAS BÁSICAS	21
2.11 VISCOELASTICIDAD	23
2.12 MODELO DE MAXWELL	26
2.12.1 Modelo de Maxwell Generalizado	30
2.12.2 Modelo de Maxwell Normalizado.	32
2.13 NÚMERO DE DEBORAH (De)	34
2.14 FENÓMENOS VISCOELÁSTICOS	35
2.15 REOMETRÍA	37
2.15.1 Viscometría con Esfuerzo Controlado	38
2.15.2 Pruebas de Oscilación	38
2.15.3 Viscosidad Compleja	40
2.15.4 Tiempo de Relajación	40
2.15.5 Fluidos Poliméricos	42
2.16 PRUEBAS DE LABORATORIO	42
2.16.1 Viscosidad	43
2.16.2 Esfuerzo Cedente.	43
2.16.3 Fuerza de Gel	44
2.16.4 Lectura 3 Rpm en el Fann	44
2.16.5 Prueba de Estabilidad Térmica	44

2.16.6	Determinación del diámetro de gota del fluido	45
2.16.7	Barrido de Esfuerzo	45
2.16.8	Barrido de Frecuencia	45
2.16.9	Filtrado API	46
2.16.10	Control de Ph	46

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	46
3.2	MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS	46
3.2.1	Aditivos	46
3.2.2	Equipos utilizados	49
3.2.2.1	Mezcladores	50
3.2.2.2	Balanzas	51
3.2.2.3	Ph metro	52
3.2.2.4	Viscosímetros	52
3.2.2.5	Reómetro Bohlin	54
3.2.2.6	Malvern Mastersizer	55
3.2.2.7	Filtro Prensa API	56
3.2.2.8	Celdas de Envejecimiento	56
3.2.2.9	Hornos	56
3.3	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	57
3.3.1	Formulación de los lodos	57
3.3.2	Procedimiento de mezclado	59
3.3.3	Propiedades Reológicas	61
3.3.4	Comportamiento Viscoelástico	63
3.3.5	Filtrado API	63

CAPITULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1	PRIMERA PARTE: Lodo base sin micro-esferas	64
4.2	SEGUNDA PARTE: Lodo base con micro-esferas de vidrio	67

4.3 TERCERA PARTE: Lodos con micro-esferas y polímeros	74
4.4 FORMULACIÓN FINAL	102
CONCLUSIONES	113
RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	116
APÉNDICES	
APÉNDICE A: FORMULACIÓN	119
APÉNDICE B: DENSIDAD DEL FLUIDO	121
APÉNDICE C: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA SENCILLO DEL MODELO DE MAXWELL.....	122
APÉNDICE D: RESPUESTAS DE LA PRUEBA DE OSCILACIÓN	126
APÉNDICE E: NORMAS API	128
ANEXOS	
ANEXO 1: DIÁMETRO DE GOTA PARA LOS SISTEMAS DE LA PRIMERA Y SEGUNDA PARTE	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1: Datos generales y estadísticas de las micro-esferas de vidrio. . . .	47
Tabla 3-2: Características de los polímeros	49
Tabla 3-3: Función de los aditivos del lodo base agua con micro-esferas de vidrio	49
Tabla 4-1: Formulaciones de los sistemas base evaluados en la primera parte	64
Tabla 4-2: Propiedades reológicas de los sistemas antes de envejecer	65
Tabla 4-3: Propiedades reológicas de los sistemas después de envejecer a 220 F	65
Tabla 4-4: Formulaciones para evaluar el efecto de las micro-esferas	67
Tabla 4-5: Propiedades reológicas de las emulsiones con micro-esferas . . .	68
Tabla 4-6: Propiedades reológicas de los sistemas con micro-esferas de vidrio después de envejecer a 220 F	72
Tabla 4-7: Formulaciones de los sistemas con Polímero1.	75
Tabla 4-8: Propiedades reológicas de los sistemas con Polímero1	76
Tabla 4-9: Propiedades reológicas de los sistemas con Polímero1 después de envejecer a 220 F	78
Tabla 4-10: Formulación seleccionada para evaluar los cinco (5) polímeros restantes	80
Tabla 4-11: Propiedades reológicas del sistema con diferentes polímeros . .	80
Tabla 4-12: Viscosidad a baja frecuencia e índice de fluidez	84
Tabla 4-13: Tiempos de relajación para la emulsión 30/25/45 con diferentes polímeros	86
Tabla 4-14: Propiedades reológicas de los sistemas, luego de envejecer a 220 F	89

Tabla 4-15: Propiedades reológicas de los sistemas, luego de envejecer a 180 F	90
Tabla 4-16: Tiempos de relajación para la emulsión 30/25/45 con diferentes polímeros, después de la prueba de envejecimiento	93
Tabla 4-17: Viscosidad baja frecuencia e índice de fluidez para los sistemas, después de envejecer a 180 F	95
Tabla 4-18: Propiedades reológicas para la emulsión 30/20/50 con diferente concentración de Polímero2	100
Tabla 4-19: Propiedades reológicas para la emulsión 30/20/50 con diferente concentración de Polímero2, después de envejecer a 220 F	100
Tabla 4-20: Propiedades reológicas del sistema sustituyendo agua por micro-esferas de vidrio	101
Tabla 4-21: Propiedades reológicas después de envejecer a 220 F	102
Tabla 4-22: Formulación final	102
Tabla 4-23: Valores de η_0 reportados para 0,06 rad/s	105
Tabla 4-24: Resultados de la evaluación del diámetro de gota para la formulación antes y después de envejecer	106
Tabla 4-25: Resultados de la prueba de filtrado para la emulsión 30/22/48 antes y después de envejecer a 180 y 220 F	107
Tabla 4-26: Propiedades reológicas antes y después de envejecer a 180 y 220 F	108
Tabla 4-27: Valores de η_0 reportados para 0,06 rad/s.	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Presiones en el Pozo.	6
Figura 2-2: Esquema de Daño de Formación	7
Figura 2-3: Tipos de emulsión	16
Figura 2-4: Comportamiento reológico de un Fluido Newtoniano	18
Figura 2-5: Comportamiento reológico de un Fluido Pseudoplástico	19
Figura 2-6: Comportamiento reológico de un Fluido Dilatante	19
Figura 2-7: Comportamiento reológico de un Fluido que sigue el modelo de Plástico de Bingham	20
Figura 2-8: Efecto elástico de un resorte metálico	24
Figura 2-9: Efecto de viscosidad entre dos placas paralelas	25
Figura 2-10: Clasificación general de las propiedades físicas de los fluidos.	26
Figura 2-11: Diferentes modelos mecánicos	27
Figura 2-12: Modelo sencillo de Maxwell	27
Figura 2-13: Respuesta esfuerzo-deformación del modelo de Maxwell	28
Figura 2-14: Sistema del Modelo de Maxwell generalizado	31
Figura 2-15: Comportamiento normalizado de un fluido de Maxwell	33
Figura 2-16: Modelos viscoelásticos en relación al Número de Deborah ...	35
Figura 2-17: Retroceso elástico	36
Figura 2-18: Die swell	36
Figura 2-19: Auto-vaciado de copa (Self-emptying beaker)	37
Figura 2-20: Efecto Weissenberg.	37
Figura 2-21: Para el perfil de velocidades se considera un elemento suficientemente pequeño, para hacer la curvatura despreciables	38
Figura 2-22: Esfuerzo y deformación en una prueba oscilatoria. Se observa que τ' está en fase con γ y τ'' se encuentra en desfase con γ	39
Figura 3-1: Distribución de tamaño de las micro-esferas	48

Figura 3-2: Mezclador Hamilton Beach	50
Figura 3-3: Agitador Lightnin	51
Figura 3-4: Impulsor tipo A100	51
Figura 3-5: Balanza para lodos	52
Figura 3-6: pHmetro digital	52
Figura 3-7: Viscosímetro Fann 35	53
Figura 3-8: Viscosímetro Haake y accesorios	54
Figura 3-9: Reómetro Bohlin	55
Figura 3-10: Accesorios del reómetro	55
Figura 3-11: Malvern Mastersizer	55
Figura 3-12: Proceso de medición	55
Figura 4-1: Curvas de flujo para las emulsiones base de la primera parte.	66
Figura 4-2: Curvas de flujo para las emulsiones con micro-esferas. a) Emulsiones con 30% de fase continua. b)Emulsiones con 35% de fase continua. c)Emulsiones con 40% de fase continua. d)Emulsiones con 45% de fase continua. e)Emulsiones con 50% de fase continua	70
Figura 4-3: Diferentes porcentajes de separación de emulsión	73
Figura 4-4: Curvas de flujo de los sistemas con micro-esferas después de envejecer. a)Emulsiones con 30% de fase continua. b)Emulsiones con 35% de fase continua. c)Emulsiones con 40% de fase continua. d)Emulsiones con 45% de fase continua. e)Emulsiones con 50% de fase continua	74
Figura 4-5: Curvas de flujo para las emulsiones con Polímero1	77
Figura 4-6: Curvas de flujo para los sistemas con Polímero1 después de envejecer a 220 F	78
Figura 4-7: Prueba de barrido de esfuerzo. Módulos dinámicos vs. deformación. a)Módulo elástico G' . b) Módulo viscoso G''	79
Figura 4-8: Curvas de flujo para la emulsión 30/25/45 con diferentes polímeros	81

Figura 4-9: Módulos dinámicos vs. deformación. a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso.	82
Figura 4-10: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. a)Módulo elástico. b)Módulo viscoso	83
Figura 4-11: Viscosidad compleja en función de la frecuencia	83
Figura 4-12: Módulos dinámicos vs. frecuencia para los sistemas con polímeros	85
Figura 4-13: Relación G'/G^* para los sistemas con polímero.	86
Figura 4-14: Prueba dinámica para los sistemas con diferentes polímeros.	88
Figura 4-15: Módulos dinámicos vs. deformación para los sistemas con polímeros después de envejecer a 180 F. a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso	91
Figura 4-16: Módulos dinámicos vs. deformación. a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso	93
Figura 4-17: Viscosidad compleja para los sistemas después de la prueba de estabilidad térmica a 220 F	94
Figura 4-18: Módulo elástico vs. deformación para las formulaciones A y B, con diferente concentración de Polímero2. a) Formulación A. b) Formulación B	96
Figura 4-19: Módulo viscoso vs. deformación para las formulaciones A y B, con diferente concentración del Polímero 2. a) Formulaciónes A. b) Formulaciónes B	97
Figura 4-20: Módulo elástico de las formulaciones A y B con diferente concentración del Polímero2. a) Formulaciónes A. b) Formulaciónes B. ...	98
Figura 4-21: Módulo viscoso de las formulaciones A y B, con diferente concentración del Polímero 2. a) Formulaciónes A. b) Formulaciónes B .	98
Figura 4-22: Viscosidad compleja η^* en función de la frecuencia	99
Figura 4-23: Barrido de esfuerzo para las formulaciones B y C antes y	

después de envejecer a 220F. a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso.	103
Figura 4-24: Barrido de frecuencia para las formulaciones B y C, antes y después de envejecer a 220F. a) Módulos elásticos. b)Módulos viscosos.	104
Figura 4-25: Viscosidad compleja en función de la frecuencia para las formulaciones B y C, antes y después de envejecer a 220°F	104
Figura 4-26: Prueba dinámica para la Formulación C, antes y después de envejecer a 180 y 220F a) Formulación C. b) Formulación C después de 180F. c) Formulación C después de 220F	105
Figura 4-27: Diámetro de gota antes y después de envejecer a 180F	107
Figura 4-28: Filtrado API para la emulsión 30/22/48 antes y después de envejecer a diferentes temperaturas	108
Figura 4-29: Barrido de esfuerzo para la emulsión C, antes y después de envejecer a 180 y 220F. a) Módulo elástico b) Módulo viscoso	109
Figura 4-30: Barrido de frecuencia para la formulación C, antes y después de envejecer a 180 y 220F. a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso	110
Figura 4-31: Viscosidad Compleja en función de la frecuencia	110
Figura 4-32: Relación G'/G^* en función de la frecuencia	111

LISTA DE ABREVIATURA Y SÍMBOLOS

δ : ángulo de fase.

γ : deformación total.

γ_e : deformación elástica del resorte.

γ_v : deformación viscosa del amortiguador.

γ_0 : amplitud de la respuesta en deformación.

$\dot{\gamma}$: velocidad de deformación o tasa de corte.

λ : tiempo de relajación.

η : viscosidad dinámica.

η^* : viscosidad compleja.

ρ : densidad del fluido.

τ : esfuerzo de corte.

τ_e : esfuerzo cortante de la componente elástica.

τ_v : esfuerzo cortante de la componente viscosa.

τ_0 : esfuerzo de corte cedente.

$\dot{\tau}$: primera derivada del esfuerzo total.

μm : micrómetro.

ω : frecuencia de la perturbación.

ΔF : gradiente de fuerza.

ΔX : gradiente de longitud.

Σ : sumatoria .

A: amplitud de la perturbación.

A_1 : relación de amplitud.

API: American Petroleum Institute.

bar: unidad de presión equivalente a 100 psi.

C: grados centígrados.

cm: centímetro

cm^3 : centímetro cúbico

cp: centipoise
CS: esfuerzo controlado.
d: distancia entre placas.
De: número de Deborah.
dv: diferencial de velocidad.
dy: diferencial de longitud.
F: grados Fahrenheit.
g: gravedad.
G: constante de elasticidad del resorte.
G*: módulo dinámico complejo de la respuesta viscoelástica.
G': componente elástica o módulo de almacenamiento.
G'': componente viscosa o módulo de pérdidas.
gr: gramo
h: altura de columna de líquido.
Hz: hertz.
K: índice de consistencia.
Kpa: kilopascal.
lb: libra masa
lbf: libra fuerza
lpg: libras por galón.
L_x: lectura de esfuerzo en viscosímetro de campo a X rpm.
M: porcentaje de micro-esferas en una emulsión.
MHz: megahertz.
n: límite de fluidez.
O/M/W: porcentaje de aceite / microesfera / agua.
O/W: relación aceite en agua.
O: fase aceite en una emulsión.
Pa: pascal.

Ph: presión hidrostática.

pie: medida de longitud equivalente a 30,48 centímetros.

psi: unidad de presión equivalente a 1lbf/pies².

rpm: revoluciones por minuto.

s: segundo.

s⁻¹: hertz.

v→: velocidad de la placa móvil.

W: fase acuosa en una emulsión.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de perforación de pozos, destinado a la extracción de petróleo, se utilizan métodos de taladro del suelo, en los cuales la extracción de los ripios (material cortado del suelo), se realiza mediante la inyección de fluidos, los cuales sirven para transportar en suspensión dicho material cortado, hasta la superficie de perforación, y al mismo tiempo, servir de columna de presión hidrostática del pozo, refrigerar y lubricar los elementos mecánicos de la perforación, a la par de otras funciones. Los fluidos utilizados en la perforación de pozos, son fluidos no-newtonianos del tipo pseudoplástico y viscoelásticos.

La producción continua de petróleo a través de los años ha traído como consecuencia una disminución gradual de la presión de los yacimientos, alcanzando valores que se encuentran muy por debajo de la presión de la columna hidrostática de los lodos convencionales.

En Venezuela existen yacimientos de baja presión (yacimientos maduros) con importantes reservas, y para su producción se requiere del uso de fluidos no invasivos de baja densidad, que no originen sobrepresión, y por consiguiente eviten penetrar en forma excesiva hacia la zona productora, causando daños a la formación afectando su productividad.

Estos fluidos de perforación de baja densidad deben tener una densidad menor a $0,84\text{gr/cm}^3$ (7 lb/gal), como las espumas, lodos aireados o nitrogenados, con la finalidad de extraer la máxima cantidad de crudo posible minimizando el daño a la formación productora. Estos fluidos presentan una serie de ventajas que justifican el interés existente, ya que permiten alcanzar mayores velocidades de penetración, previenen o minimizan las pérdidas de circulación, reducen los posibles daños a la formación ocasionados por la invasión de fluidos de perforación o del

filtrado, y mejoran el desempeño de las mechas de perforación. Sin embargo, si se toman en cuenta los aspectos operacionales y logísticos al trabajar con fluidos aireados (compresibles), se tiene que una de las desventajas de utilizar este tipo de fluido es el costo del alquiler de los compresores para producir el aire o nitrógeno *in situ*, así como la disponibilidad de espacio físico para la ubicación de los equipos.

PDVSA Intevep en el área de exploración y producción, presenta una alternativa para obtener las mismas ventajas que se alcanzan al utilizar los fluidos aireados (compresibles) consiste en el uso de microesferas de vidrio, el cual se utiliza como agente reductor de la densidad en los fluidos de perforación convencionales. Con estos fluidos se trata de reducir el sobrebalance aplicado al yacimiento, sin embargo es necesario completar el estudio de estos fluidos, mediante la incorporación de polímeros capaces de modificar el comportamiento reológico, impartiendo al sistema características de alta viscosidad a bajas tasas de corte, que minimicen la invasión de fluido al yacimiento, reduciendo de esta manera el riesgo de daño a la formación.

Para este trabajo el fluido base utilizado es una emulsión aceite en agua (O/W), y se evaluará el efecto de las microesferas de vidrio y polímeros en el comportamiento reológico del mismo.

Nos concentraremos en el estudio experimental de las propiedades reológicas y viscoelásticas del fluido, comparándolas con las propiedades de otros fluidos ya presentes en el mercado.

CAPÍTULO I: EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Evaluar el comportamiento reológico de la formulación de fluidos de perforación de baja densidad con micro-esferas de vidrio como agente reductor de densidad y evaluar si puede ser utilizado como un fluido sustituto de los fluidos aireados utilizados en los pozos donde exista baja presión.

Evaluar el comportamiento viscoelástico del fluido con diferentes polímeros y escoger el que garantice mayor elasticidad, estabilidad térmica, alta viscosidad a bajas tasas de corte, suspensión de ripios en el anular y alta capacidad de control del filtrado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer las características constitutivas de un fluido de Perforación de pozos de baja densidad, basado en una emulsión de agua y aceite, utilizando micro-esferas de vidrio como agente reductor de densidad, ajustando su comportamiento reológico a las condiciones de aplicación en campo.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Evaluar la factibilidad de utilizar el fluido de Perforación formulado como un posible sustituto de los fluidos aireados en pozos donde exista baja presión.

Evaluar las propiedades reológicas de diferentes formulaciones variando la concentración de micro-esferas de vidrio, para obtener la formulación ideal.

Comparar el comportamiento reológico de la formulación con diferentes polímeros como modificadores reológicos, que cumplan con la característica de alta viscosidad a baja tasas de corte.

Evaluar la influencia del comportamiento elástico sobre la invasión de fluido hacia la formación o a través de un medio poroso.

Comparar el fluido formulado con un fluido comercial que cumple con las características requeridas.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

A continuación se presenta el marco teórico que dará base a la realización de este trabajo especial de grado:

2.1 PRESIÓN DE FORMACIÓN

Es la presión del fluido, ya sea aceite, agua o gas que existen en los poros de una formación de rocas (ver figura 2-1). La presión de formación es diferente de la presión total de sobrecarga y de las presiones que puedan existir dentro de los cristales de las rocas. Fundamentalmente, la presión de formación debe ser menor que la presión total de sobrecarga, pues de lo contrario el líquido fracturaría las formaciones superiores. (Mc Cray, Arthur y Cole, 1970)

2.2 PRESIÓN HIDROSTÁTICA (DE LOS LÍQUIDOS)

Es la presión ejercida por o dentro de una columna de líquido, causada por el peso del mismo. Fundamentalmente, esas presiones son iguales al producto de la densidad del líquido, la altura de la columna del líquido y la fuerza de gravedad que actúa sobre el líquido. Sin embargo, en cálculos generales de ingeniería la fuerza de gravedad se considera constante y se incluye como tal en los cálculos. La presión hidrostática se expresa como:

$$P_h = h \cdot \rho \cdot g \quad (1)$$

donde:

P_h : presión hidrostática

h : altura de la columna de líquido

ρ : densidad del líquido

g : gravedad

2.3 PRESIÓN DE CIRCULACIÓN

Como el lodo de perforación es circulado por el anular, la fricción entre el fluido de perforación y las paredes del espacio anular crea un gradiente de presión. La magnitud de este gradiente depende de la tasa de circulación, las dimensiones del anular y las propiedades del fluido de perforación. Esta presión varía como resultado de las alteraciones en la tasa de flujo. (ver figura 2-1)

Las presiones que intervienen en el proceso de perforación de pozos se diferencian en el siguiente esquema:

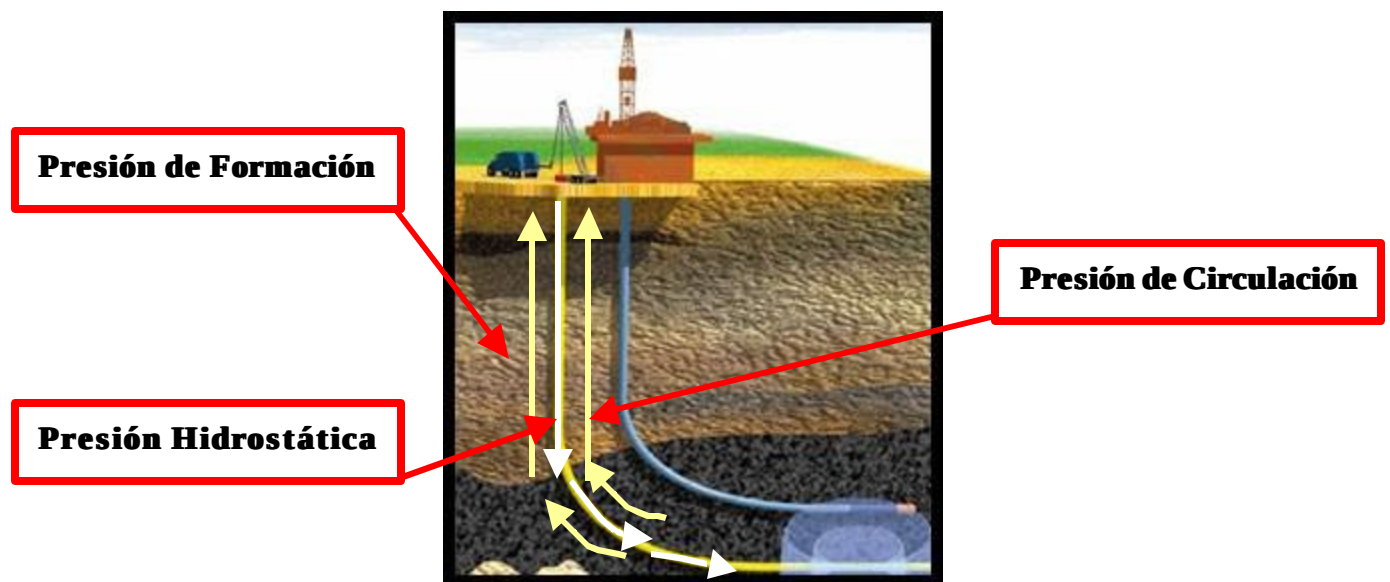


Figura 2-1: Presiones en el pozo.

El fluido de perforación es inyectado y recirculado a través del anular, generándose un gradiente de presión entre las paredes del espacio anular y el fluido de perforación. Los ripios (material cortado de la formación) son expulsados hacia la superficie por acción del flujo ascendente del fluido.

2.4 DAÑO A LA FORMACIÓN

Este término se refiere a que todo lo que pasa a la formación productora reduce la productividad del pozo. El daño resulta del taponamiento por sólidos y/o la interacción adversa roca-fluido o fluido-fluido. Se reducen la productividad y la rapidez de la producción. Las causas más comunes del daño a la formación son:

- Invasión de partículas externas.
- Hinchamiento de las arcillas de la formación.
- Desalojo y movimiento de las partículas finas.
- Fluidos químicamente incompatibles.
- Bloqueo por emulsión o por agua.

Dos o más de estas causas pueden existir simultáneamente.

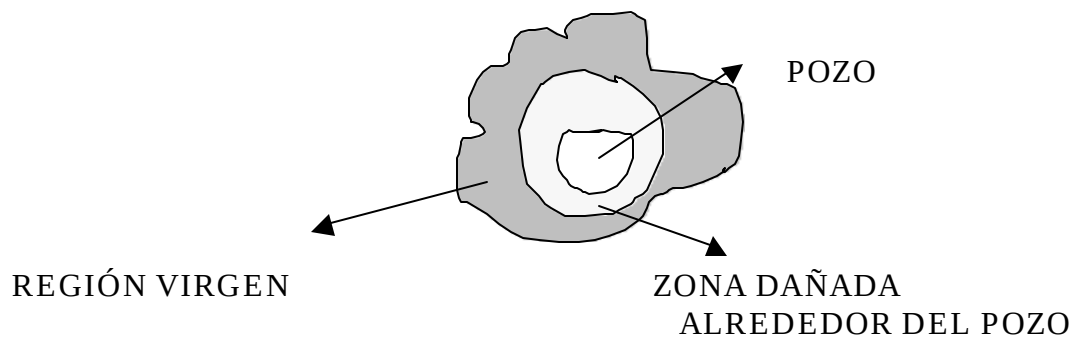


Figura 2-2: Esquema de Daño de Formación²².

Para minimizar el daño a la formación el fluido de perforación debe cumplir con ciertas características, las cuales van a depender del tipo de formación. Una de las principales características que debe poseer el fluido es que no debe ser invasivo por lo que es necesario el control de la viscosidad, del filtrado, así como del diámetro de partícula, y control del diámetro de gota en el caso de una emulsión.

2.5 INVASIÓN DE FLUIDO

Si gran cantidad de agua o de fluido invade a la formación, habrá problema en la producción máxima porque se ve restringida en la zona invadida. Una invasión de fluido puede tender a perturbar las partículas finas localizadas en toda la formación y produce una migración de las partículas hacia el hoyo afectando la circulación del fluido en el pozo.

2.6 PÉRDIDA DE CIRCULACIÓN

La pérdida de circulación o de retorno describe la pérdida total o parcial del fluido hacia la formación como resultado de la caída de presión hidrostática en el anular ejercida por el fluido de perforación. La pérdida de circulación es caracterizada por una reducción en el porcentaje de lodo que retorna del pozo comparado con el porcentaje que es bombeado. (fluido que sale < fluido que entra). Dependiendo del porcentaje de pérdida de fluido las operaciones de perforación pueden ser dañadas significativamente. En casos donde la pérdida en el retorno es completa, la perforación se detiene totalmente. Si el anular del pozo no se mantiene lleno cuando se detiene la circulación del fluido, la presión hidrostática se reducirá hasta que la presión diferencial entre la columna de fluido y la zona de pérdida sea cero. La pérdida de circulación se produce por dos razones principales: los orificios en la formación son por lo menos tres veces más grandes que la mayor de las partículas existentes en el lodo y porque la presión hidrostática ejercida por el lodo sea mucho mayor que la presión de formación. (Patrick y Bjron, 1995)

Para prevenir ésta pérdida es necesario conocer las características de la formación, para definir las propiedades del fluido de perforación requeridas.

2.7 FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Son aquellos fluidos que cumplen con los requisitos mínimos de eficiencia y seguridad durante la perforación rotatoria de un pozo. En general, se trata de un fluido con características físicas y químicas apropiadas que, por circulación dentro del pozo, remueve los recortes de la formación, entre otras cosas, en el fondo del pozo. Pueden ser de aire, gas, agua, suspensiones coloidales de agua y arcilla o combinaciones de agua y aceite con diferentes contenidos de sólidos.

El fluido de perforación en terminología petrolera se conoce como lodo de perforación. Básicamente, es una mezcla de sustancias químicas de cuya preparación y mantenimiento depende el éxito, la rapidez y la seguridad durante la perforación de un pozo.

2.7.1 FUNCIONES DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Estos fluidos de perforación se utilizan en los sistemas rotatorios de perforación y entre sus funciones se encuentran:

- ***Eliminar los recortes de la barrena del fondo del agujero, para conservarlos limpios:*** Una vez que la mecha tritura la formación, es necesario retirar inmediatamente los recortes producto de la acción de la mecha. Cualquier derrumbe de las formaciones ya perforadas y no protegidas en el agujero deberán sacarse a la superficie, junto con los recortes de la barrena, con la circulación del lodo.
- ***Debe enfriar la barrena y el fondo del agujero:*** Debe tener un efecto lubricante entre el tubo de perforación y la pared del agujero, ya que a medida que se profundiza en la perforación, que la mecha

raspa el fondo del pozo y que la sarta rota contra con las paredes del pozo, aumenta la temperatura generando calor. El lodo de perforación debe absorber ese calor y conducirlo hacia fuera, para garantizar una vida más prolongada de la mecha, disminución de la torsión, menor presión de bombeo y un menor desgaste de la sarta y el revestimiento.

- ***Depositar sobre la pared del hoyo una costra (revoque) delgada, flexible e impermeable:*** Debe tener la propiedad de crear una torta de filtrado o revoque que sea impermeable, flexible y delgada, para que impida el paso del fluido a la formación causado por las infiltraciones excesivas, de manera tal que mantenga su estado original y evitar posibles derrumbes.
- ***Debe garantizar el mantenimiento y la conservación del agujero ya perforado:*** A medida que la mecha penetra en una formación subterránea, disminuye parte del apoyo lateral que ofrecen las paredes del pozo, por lo que el lodo de perforación debe ofrecer ese sostén para evitar que la formación se derrumbe en el interior del pozo, existiendo el peligro de que se pegue la tubería, se tengan que efectuar operaciones de pesca costosas y, a veces, hasta la pérdida del pozo.
- ***Controlar por medio de su peso, la presión que puedan tener las formaciones que corta la barrena:*** Los flujos de aceite, gas y agua salada al agujero, se evitan balanceando o excediendo la presión de la formación con la carga hidrostática de la columna de lodo. Debe ser sobrebalanceada para evitar un flujo incontrolado de esos fluidos

de formación en el interior del pozo y dar lugar a la formación de una *arremetida*.

- ***Transmitir potencia hidráulica sobre la formación a través de la mecha:*** El fluido de perforación es expulsado de las boquillas de la mecha, durante la circulación, a gran velocidad y a baja presión limpiando el hueco de los ripios dejados por la acción cortadora de la barrena contribuyendo con esto a lograr máxima tasa de penetración.
- ***Mantener en suspensión a los recortes y derrumbes, en el espacio anular, cuando se detiene la circulación del fluido de perforación:*** Cuando no se circula el fluido de perforación, los ripios y derrumbes ya no son elevados por acción del flujo ascendente y por ende caerán al fondo del pozo, a menos que el fluido de perforación tenga la capacidad de crear una estructura gelificada cuando no esté fluyendo, lo cual permita mantener en suspensión los sólidos. El lodo debe recuperar su fluidez cuando se reinicia la circulación.
- ***Ayudar a suspender el peso de la sarta y del revestimiento:*** El peso de una sarta de perforación o de una sarta de revestimiento puede exceder 200 toneladas, sin embargo, están parcialmente sostenidas por el empuje ascendente del lodo (principio de Arquímedes). La presión ascendente (sustentación hidráulica) depende de la presión ejercida por el fluido y de la sección transversal sobre la que esta presión se ejerce (Mc Cray, Arthur y Cole , 1970)
- ***Proveer un medio adecuado para llevar a cabo los perfilajes de cable:*** Para la evaluación de la formación es necesario realizar

perfiles de cable, los cuales requieren que el lodo sea buen conductor de la electricidad y que presente propiedades eléctricas diferentes a la de los fluidos de formación.

El fluido de perforación debe cumplir eficientemente con todas estas funciones y principalmente debe evitar los siguientes efectos que actúan negativamente en el pozo:

1. Daño a las formaciones subterráneas, especialmente a las que pueden ser productivas.
2. Corrosión de la sarta y del revestimiento.
3. Reducción de la velocidad de penetración.
4. Problemas de presiones de succión, de pistón y de circulación.
5. Pérdidas de circulación.
6. Pegamiento de la sarta contra las paredes del pozo.
7. Erosión de la superficie interna del pozo.
8. Retención de sólidos indeseables por el lodo.
9. Desgastes de las paredes de las bombas.
10. Contaminación del ambiente natural.

2.7.2 PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Las propiedades de los fluidos de perforación pueden ser determinadas por distintos ensayos. Se deben evaluar las propiedades tanto antes de entrar al hoyo como después de salir del hoyo, para realizar los ajustes que sean necesarios. Entre estas propiedades se tiene:

Densidad: Relación entre unidad de masa y unidad de volumen del fluido de perforación. Produce una presión hidrostática, necesaria para

crear un sobrebalance en contra de la presión de formación. La densidad va a depender del tipo y cantidad de material que se le adicione al lodo, así como el tipo de líquido utilizado. El peso del lodo debe ser suficiente para contener el fluido de la formación, pero no demasiado alto como para fracturar la formación.

Viscosidad: Es la resistencia interna que ofrece un fluido a deformarse, por lo que a mayor resistencia mayor viscosidad. La viscosidad del lodo depende de la cantidad y propiedades de los sólidos suspendidos. La viscosidad plástica es una medida de la resistencia interna al flujo, atribuible a la cantidad, tipo y tamaño de los sólidos presentes en un fluido. Esta propiedad es la que se vincula directamente con la capacidad de acarreo, remoción y suspensión de cortes y material densificante.

Esfuerzo Cedente: Es el esfuerzo cortante inicial que tiene que vencer el fluido para que fluya libremente. Representa una medida de la fuerza de atracción entre las partículas bajo condiciones dinámicas o de flujo. Puede ser determinado a partir del Modelo de Bingham. (ver sección 2.10)

Fuerza de Gel: Es la fuerza necesaria para comenzar el movimiento del fluido desde condiciones estacionarias. Representa una medida de la atracción física y electroquímica bajo condiciones estáticas. La magnitud de la gelificación es de gran importancia para la suspensión de recortes y de material densificante, por lo que se tiene que controlar el grado en que ésta se manifiesta, ya que si es más alto de lo que se requiere, puede originar problemas, como: retención de aire o gas, altas presiones al romper la circulación, problemas de succión al sacar la tubería e imposibilidad de hacer llegar las herramientas de perfilajes hasta el fondo.

Filtrado: Determina el grado de separación de la fase líquida del lodo, dejando una torta de sólido en las paredes de las formaciones denominada revoque. Esta propiedad se relaciona con la penetración del fluido en formaciones permeables, lo cual origina daños a las formaciones productoras, en caso de que exista incompatibilidad con los fluidos de la formación. En otras ocasiones el filtrado puede reaccionar químicamente con las arcillas y las activa provocando el hinchamiento de las mismas, haciéndose necesario el uso de aditivos inhibitorios.

Ph: Es el grado de acidez o alcalinidad (concentración de hidrógeno) de una suspensión de lodo. Preserva el lodo base agua de ataques bacterianos y hace que algunos productos se activen. Un lodo de bajo PH varía de 7,5 a 9,5 (ideal para lodos base agua) y de alto PH varía de 9,5 a 13,5.

2.7.3 COMPOSICIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

La composición del fluido de perforación usado en un pozo dado es determinada por las condiciones del fondo del pozo y el tipo de formación que se va a perforar. La perforación debe hacerse atravesando diferentes tipos de formaciones, que a la vez, puede requerir diferentes tipos de fluidos (Barberil, 1998). Principalmente el fluido es caracterizado por tener dos fases.

2.7.3.1 FASES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

El fluido de perforación, es una suspensión de sólidos, líquidos o gases en un líquido el cual va a representar la **fase continua** (o fase externa) del lodo de perforación y las partículas sólidas, líquidas o gaseosas suspendidas representan la **fase dispersa** (también llamada fase interna).

Un lodo de perforación de base oleosa se caracteriza porque su parte líquida continua es aceite, es decir es una emulsión de agua en aceite. Si la porción líquida continua es agua o una emulsión de aceite en agua, se dice que el fluido es de base acuosa.

Un lodo base agua está constituido básicamente de la siguiente manera:

1. Una fase líquida, agua o emulsión.
2. Una fase coloidal.
3. Una fase inerte y
4. Una fase química, que consiste de iones y sustancias disueltas que afectan y definen el comportamiento de los materiales coloidales.

2.7.3.2 EMULSIÓN Y TIPOS DE EMULSIÓN

Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales esta dispersada en la otra en forma de gotas pequeñas (de 1 a 100 micras), y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante. En ausencia de surfactante, una emulsión coalesce rápidamente.

Una emulsión es estable si no se observa algún cambio en las propiedades del fluido en un tiempo suficientemente largo para el estudio de una determinada aplicación práctica. (Salager, 1993)

En una emulsión con dos líquidos inmiscibles, uno de los líquidos es una fase acuosa(W) y el otro es una fase aceite(O) u orgánica. Existen en general dos tipos de emulsiones: si la emulsión contiene gotas de aceite dispersas en agua, se le llama **emulsión O/W** y si la emulsión contiene gotas de agua dispersas en aceite se le llama **emulsión W/O** (llamada Emulsión inversa). Existen casos más complejos como una **emulsión múltiple** de tipo W/O/W, en donde se tienen gotas de aceite de una emulsión O/W conteniendo en su interior gotas de agua.

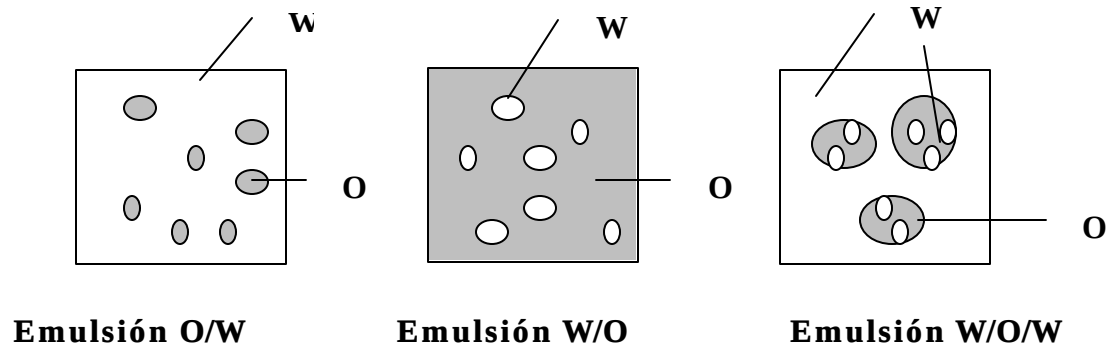


Figura 2-3: Tipos de Emulsión²⁷.

2.8 REOLOGÍA

Reología es la rama de la física que estudia el flujo y la deformación de la materia y describe la relación entre la fuerza, la deformación y el tiempo. El término reología viene del *rheos* que en griego significa derramarse. La reología es aplicable a todos los materiales, desde los gases hasta los sólidos. (Prieto O.,1997)

La reología en los fluidos es utilizada para describir su consistencia, basándose en dos propiedades principales que son la viscosidad y la elasticidad.

Del comportamiento reológico del fluido de perforación, se derivan los siguiente cálculos (API 13D, 1995):

- Cálculo de la pérdida por fricción en la tubería o el anular.
- Cálculo de la presión de succión cuando se está introduciendo o sacando la tubería.
- Determinación de la densidad equivalente de circulación del fluido de perforación.
- Determinación del perfil de flujo en el anular.
- Estimación de la eficiencia de limpieza de hoyo.
- Evaluación de la capacidad de suspensión del fluido.
- Determinación de la velocidad de los chorros de las boquillas y pérdida por fricción en la mecha.

- Determinación de la velocidad de asentamiento de los ripios de perforación en los hoyos verticales.

2.9 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

Un *fluido* es cualquier sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo de corte o cizallamiento (esfuerzo tangencial que tiende a deformar el elemento fluyente) por muy pequeño que éste sea. Los fluidos son divididos en tres grupos según el comportamiento reológico (Prieto O., Alí ;1997):

- Fluidos Newtonianos.
- Fluidos No Newtonianos, independientes del tiempo.
- Fluidos No Newtonianos, dependientes del tiempo.

2.9.1 FLUIDO NEWTONIANO

Un fluido Newtoniano es aquel que se caracteriza por tener una relación lineal entre el esfuerzo y la velocidad de deformación o tasa de corte.

La viscosidad de los fluidos newtonianos depende solo de los cambios de temperatura y no de la velocidad de deformación ni del tiempo.

Como ejemplo se tiene el agua, la leche, la glicerina y el crudo liviano.

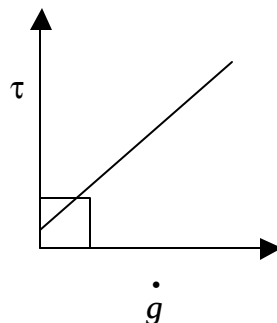


Figura 2-4: Comportamiento reológico de un Fluido Newtoniano²⁴.

2.9.2 FLUIDO NO NEWTONIANO INDEPENDIENTE DEL TIEMPO

Los fluidos no Newtonianos son aquellos cuya viscosidad varia al cambiar la tasa de corte, es decir el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la tasa de corte o velocidad de deformación.

La viscosidad de un fluido No Newtoniano, independiente del tiempo, depende de los cambios de temperatura y de la velocidad de deformación. Según como varía la viscosidad con respecto a la velocidad de deformación, los fluidos independientes del tiempo se clasifican en:

- Pseudoplástico (shear thinning)
- Dilatante (shear thickening) y
- Plástico

2.9.2.1 FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS (SHEAR THINNING)

Los fluidos pseudoplásticos son los que presentan adelgazamiento por esfuerzo de corte, con el aumento de la velocidad de deformación, es decir la viscosidad decrece con el incremento de la velocidad de deformación.

Desde el punto de vista físico esto significa que la resistencia al fluir disminuye con el aumento de la velocidad de deformación. Se caracterizan por fluir inmediatamente después de aplicársele una fuerza o presión de corte, sin importar que tan suave sea. Ejemplos: emulsiones, suspensiones, pinturas y salsas.

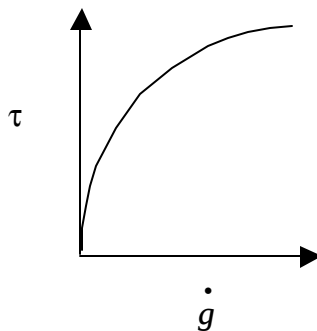


Figura 2-5: Comportamiento reológico de un Fluido Pseudoplástico²⁴.

2.9.2.2 FLUIDOS DILATANTES (SHEAR THICKENING)

La viscosidad aumenta con el incremento de la velocidad de deformación. Los fluidos de perforación muy pocas veces presentan este comportamiento. Ejemplo: ciertas suspensiones de arena o arcilla en agua, arena mojada, suspensión de almidón (concentrado).

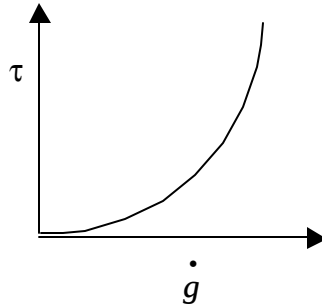


Figura 2-6: Comportamiento reológico de un Fluido Dilatante²⁴.

2.9.2.3 FLUIDOS PLÁSTICOS (PLÁSTICO DE BINGHAM)

Un fluido con comportamiento plástico es aquel que muestra muy poca o ninguna deformación al aplicarle ciertos niveles de esfuerzo. Después de alcanzar el esfuerzo cedente (yield stress) el material fluye fácilmente, como si fuera newtoniano. Este tipo de fluido requiere de un esfuerzo inicial para que fluya. Entre los fluidos que cumplen con este tipo de comportamiento se tienen: pasta de tomate, pasta de dientes, crema de mano, algunas salsas, grasas.

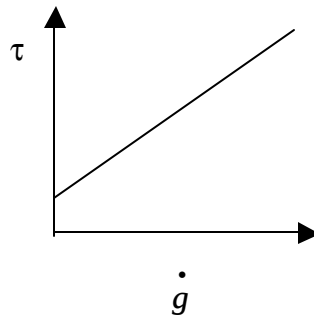


Figura 2-7: Comportamiento reológico de un Fluido que sigue el modelo de Plástico de Bingham²⁴.

2.9.3 FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO

Los fluidos también pueden presentar efectos dependientes del tiempo. Bajo una tasa de corte constante, la viscosidad cambia con el tiempo hasta que se establece un equilibrio. En estos fluidos la viscosidad del fluido es dependiente de la temperatura, de la velocidad de deformación y del tiempo.

Según como varia la viscosidad con respecto al tiempo se clasifican en:

- Tixotrópicos
- Reopécticos

2.9.3.1 FLUIDOS TIXOTRÓPICOS

La Tixotropía es la capacidad que tienen los fluidos de desarrollar con el tiempo una resistencia de gel. Esta propiedad le atribuye al fluido una consistencia gelatinosa si se deja en reposo, pero que al agitarse nuevamente regresa a su estado original. Este cambio es reversible. En los fluidos Tixotrópicos la viscosidad aparente disminuye cuando el tiempo de corte aumenta, por ejemplo: Yogurt, pintura y los fluidos de perforación.

2.9.3.2 FLUIDOS REOPÉCTICOS

Los fluidos reopécticos a contrario de los tixotrópicos presentan un aumento de la viscosidad con el tiempo. A cierta velocidad o régimen de corte se va formando una estructura en función del tiempo. Ejemplo: Pasta de yeso.

2.10 ECUACIONES CONSTITUTIVAS BÁSICAS

Los modelos reológicos ayudan a predecir el comportamiento de los fluidos sobre una amplia escala de velocidades de corte. La mayoría de los fluidos de perforación son fluidos pseudoplásticos no newtonianos.

El primer modelo reológico adoptado para caracterizar los fluidos de perforación fue el modelo Plástico de Bingham y las medidas se tomaban con dos velocidades en un viscosímetro manual. La desventaja de este modelo reológico es que este supone una relación lineal entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte. El modelo puede ser expresado como:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma} \quad (2)$$

describiendo el fluido en términos de viscosidad y esfuerzo cedente.

El otro modelo es el de Ley de Potencia. Este modelo introduce el índice de consistencia (K) y el índice de fluidez (n). El índice de fluidez muestra la distribución del fluido en el anular. Cuando n=1, se trata de un fluido Newtoniano y el perfil de velocidad es parabólico. El modelo se expresa como:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

La desventaja de utilizar este modelo es que no reporta un esfuerzo cedente a bajas tasa de corte el cual es necesario para caracterizar el fluido de perforación.

El modelo con el cual mejor se describe un fluido de perforación es el modelo de Herschel-Bulkley (Ley de Potencia Modificada). Este modelo representa una suma de los modelos de Ley de Potencia y Plástico de Bingham, se expresa como:

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

Los modelos reológicos más aplicables son:

➤ Fluido Newtoniano

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma} = m \cdot \dot{\gamma} \quad (5)$$

- Fluido Plástico

$$t - t_0 = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{con } n = 1 \quad (6)$$

- Fluido Pseudoplástico (shear thinning)

$$t = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{con } n < 1 \quad (7)$$

- Fluido Dilatante (shear thickening)

$$t = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad \text{con } n > 1 \quad (8)$$

- Modelo General (Herschel - Bulkley)

$$t = t_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

en donde :

τ = esfuerzo de corte [Pa]

τ_0 = esfuerzo de corte inicial (punto cedente) [Pa]

K = índice de consistencia [Pa.sⁿ]

γ = velocidad de deformación [s⁻¹]

n = índice de fluidez

μ = viscosidad dinámica [Pa.s]

2.11 VISCOELASTICIDAD

Todos los materiales, desde los gases hasta los sólidos, pueden ser divididos en las siguientes tres categorías según su comportamiento reológico:

Materiales viscosos: En un material viscoso toda la energía aplicada es disipada en forma de calor. La deformación es función del tiempo.

Materiales elásticos: En un material elástico toda la energía aplicada se queda concentrada en el material. La deformación es reversible y proporcional al esfuerzo; el tiempo no interviene en la deformación.

Materiales viscoelásticos: Un material viscoelástico presenta un comportamiento viscoso y un comportamiento elástico. Ejemplo: como material viscoelástico se tienen las soluciones poliméricas y los geles naturales o artificiales. Cuando un fluido viscoelástico es deformado aparecen los esfuerzos normales.

Un fluido viscoelástico se suele definir como un fluido que presenta propiedades intermedias entre un sólido perfectamente elástico y un fluido perfectamente viscoso. En régimen transitorio, como el caso de las operaciones de bombeos, tales fenómenos pueden volverse determinantes. (Barry B., 1975)

La viscoelasticidad es difícil de obtener en el campo y es el grado de deformación o esfuerzo elástico alcanzado por un fluido antes de iniciar su transformación de un estado casi sólido a un estado líquido, de ahí se tiene que un fluido viscoso se deforma o fluye al aplicarle tanto un esfuerzo como una deformación, pero no se recupera cuando se suspende la fuerza, mientras que un fluido elástico recupera su forma original al remover el esfuerzo, siempre y cuando la deformación no exceda el límite elástico del material.

El *comportamiento elástico* lo podemos relacionar con el efecto que se produce cuando aplicamos una fuerza a un resorte metálico, el cual es expandido o comprimido por efecto de la carga que se aplica. (Barnes, 1989). El esfuerzo y la deformación tienen una relación lineal, ya que si doblamos el esfuerzo doblamos la deformación. La deformación del resorte es proporcional a la fuerza aplicada y según la Ley de Hooke es:

$\Delta F = G \cdot \Delta x$, donde G es la constante de elasticidad del resorte y expresado en notación propia de la reología se tiene:

$$t = G \cdot g \quad (10)$$

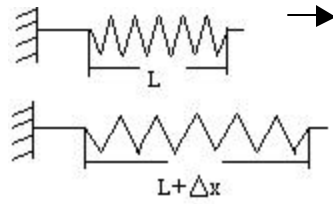


Figura 2-8: Efecto elástico en un resorte metálico ⁴.

La deformación del resorte es tan larga como el esfuerzo aplicado y desaparece total e instantáneamente cuando removemos la carga. Desde del punto de vista energético, al aplicarle fuerza al resorte se almacena cierta energía mediante un desplazamiento de su posición de equilibrio, el resorte no disipará esta energía en forma de calor (siempre que no hayan rozamientos), sino que se comprimirá o se descomprimirá dado el caso, hasta llegar a su posición de equilibrio.

El *comportamiento viscoso*, es totalmente diferente al elástico. Para definir este comportamiento nos basamos en la figura 2-9. Si se desea desplazar la lámina superior, hay que aplicar una fuerza. Si la fuerza es constante y en un momento dado deja de aplicarse tal fuerza, el fluido dejará de moverse instantáneamente, si es perfectamente viscoso. Toda la energía que ha ido comunicándose al fluido se ha *disipado*, y se ha transformado en calor.

Un fluido perfectamente viscoso sigue la ley de Newton:

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

donde μ es la viscosidad del fluido y γ' es el gradiente de velocidad del fluido que existe entre las dos láminas, este se cumple si la distancia entre placas (d) es lo suficientemente pequeña.

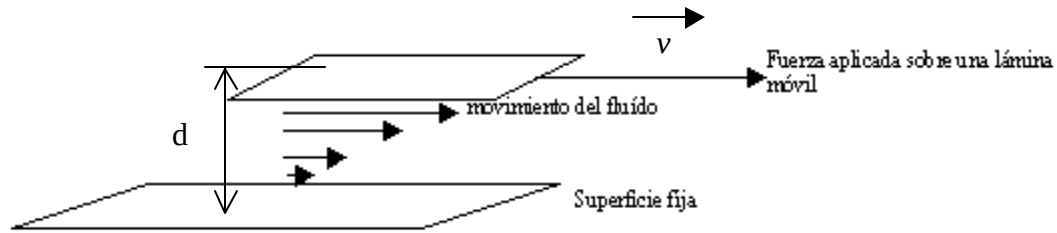


Figura 2-9: Efecto de viscosidad en dos placas paralelas²⁴.

La velocidad del fluido en contacto con la lámina superior (v) es igual a la de la lámina y la velocidad del fluido en contacto con la placa fija es nula, entonces, $\dot{\gamma} = \frac{v}{d}$, donde d es la distancia entre las láminas. Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por dar altas viscosidades a bajas tasas de corte y desarrollar altos geles instantáneos, pero frágiles y de fácil ruptura, además ofrecen baja resistencia al flujo con mínima presión de bomba y exhiben un esfuerzo verdadero de cedencia elevado que indica la transición del estado casi sólido al estado casi líquido bajo el mínimo corte.

2.12 MODELO DE MAXWELL

La división que se ha hecho entre sólidos y fluidos es un tanto artificial. En la figura 2-10, se muestra un esquema donde se indica la posición de los fluidos, según sus propiedades físicas con respecto a los grupos de materiales existentes en la naturaleza. (Roca Vila, 1978)

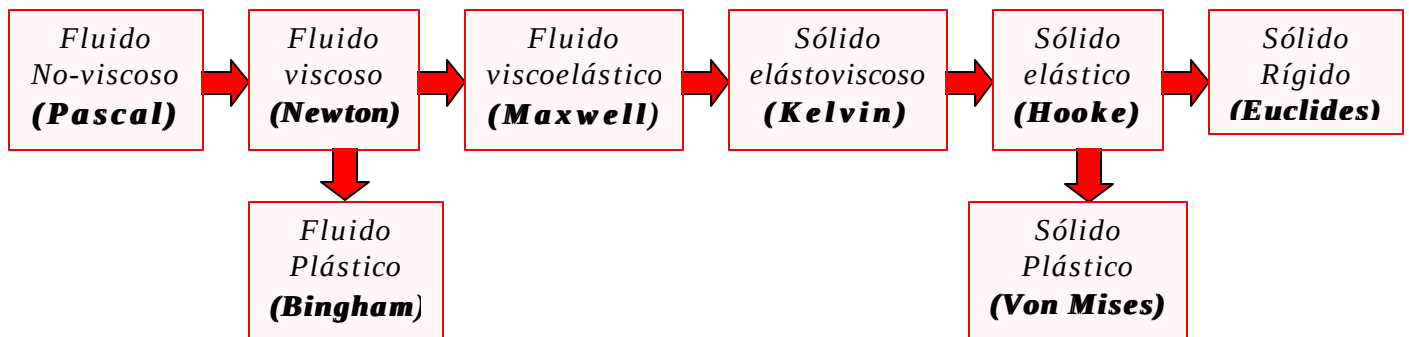


Figura 2-10 : Clasificación general de las propiedades físicas de los fluidos²⁵.

Para describir el comportamiento viscoelástico de un fluido es usual que se utilicen modelos mecánicos. Estos modelos matemáticos unidimensionales, consisten en un arreglo de resortes y amortiguadores en serie o en paralelo (Barnes, 1989), como los indicados en la figura 2-11.

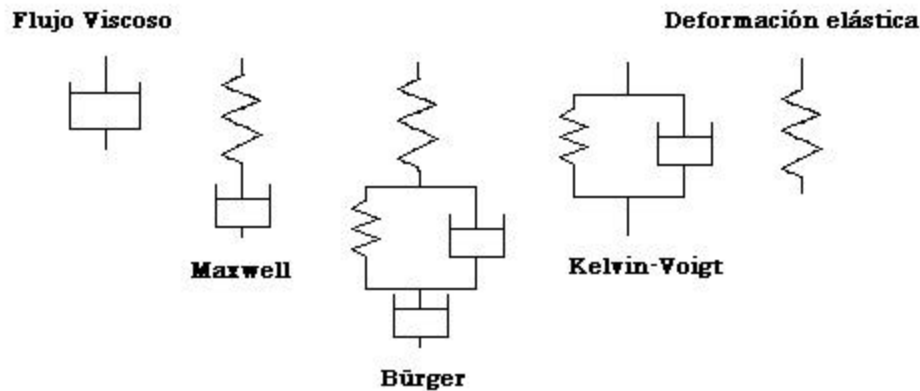


Figura 2-11: Diferentes modelos mecánicos ⁴.

El modelo más sencillo que simule una respuesta viscoelástica es el Modelo de Maxwell, el cual consiste en un arreglo de resorte y amortiguador colocados en serie.

La situación descrita anteriormente se relaciona con el siguiente dispositivo mecánico:

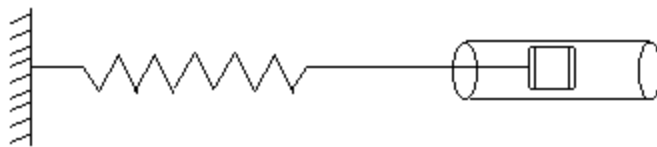


Figura 2-12: Modelo sencillo de Maxwell ¹⁶.

La relación entre esfuerzo y deformación sobre un fluido viscoelástico se relaciona a la que habría en un sistema constituido por un resorte y un amortiguador colocados en serie. El desplazamiento de todo el sistema se hace a costa de vencer la resistencia del resorte y del amortiguador.

La deformación o desplazamiento total γ , es igual a la suma de las deformaciones en el resorte y en el amortiguador:

$$\gamma = \gamma_e + \gamma_v \quad \rightarrow \quad \text{Deformación total} \quad (11)$$

donde γ_e es la deformación elástica del resorte y γ_v la deformación viscosa del amortiguador.

El esfuerzo que actúa sobre cada elemento es el mismo e igual al total:

$$\tau = \tau_e = \tau_v \quad \rightarrow \quad \text{Esfuerzo total} \quad (12)$$

Si derivamos la ecuación 11 se tiene:

$$\dot{g} = \dot{g}_e + \dot{g}_v \quad (13)$$

combinando con las relaciones de τ y γ para elementos elásticos y viscosos,

se tiene:

$$\dot{g} = \frac{\dot{t}}{G} + \frac{t}{h} \quad (14)$$

de donde se obtiene la respuesta esfuerzo-deformación, para el caso especial de un elemento sencillo de Maxwell:

$$\dot{t} + \left(\frac{G}{h} \right) \cdot t = G \cdot \dot{g} \quad \rightarrow \quad \text{Respuesta esfuerzo-deformación}$$

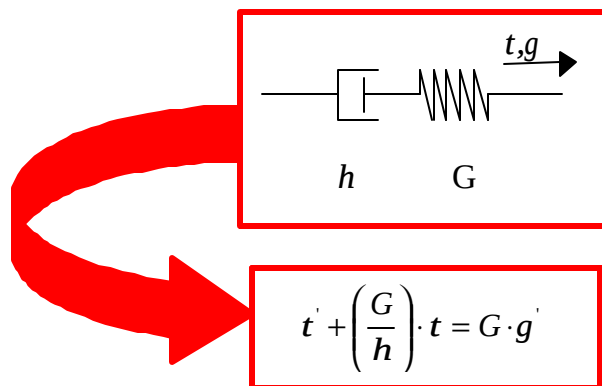


Figura2-13: Respuesta esfuerzo-deformación del modelo de Maxwell.

Para un sistema de este tipo la relación de transferencia queda determinada de la siguiente manera:

$$\frac{t(s)}{g(s)} = \frac{l \cdot G \cdot s}{l \cdot s + 1} \quad (15)$$

donde $\lambda = \eta / G$ (ver Apéndice C).

Con esta relación podemos encontrar cuál será la respuesta τ frente a una variación de la velocidad de deformación $\dot{g}$.

El tipo de perturbación que más usualmente se utiliza para caracterizar el fluido es de tipo sinusoidal.

$$\text{En este caso: } g(s) = \frac{A \cdot \omega}{s^2 + \omega^2}, \quad (16)$$

donde A y ω son la amplitud y frecuencia de la perturbación, respectivamente.

La sustitución de $\gamma(s)$ en la relación de función de transferencia, lleva a:

$$t(s) = \frac{A \cdot \omega \cdot l \cdot G \cdot s}{(l \cdot s + 1) \cdot (s^2 + \omega^2)} \rightarrow \text{Respuesta del sistema} \quad (17)$$

La transformada inversa permite establecer la relación en tiempo real $\tau(t) - g(t)$ (ver Apéndice C), obteniéndose:

$$t(t) = A \cdot G \cdot l \cdot \omega \cdot \frac{(-e^{-t/l} + \cos(\omega \cdot t) + l \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t))}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \rightarrow \text{Respuesta en el tiempo}$$

para tiempos lo suficientemente largos el transitorio exponencial desaparece, quedando:

$$t(t) = \frac{G \cdot l \cdot \omega}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{G \cdot l^2 \cdot \omega^2}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (18)$$

donde a efectos de simplificación se supone una amplitud de perturbación igual a la unidad, $A=1$.

Esta ecuación está claramente partida en dos términos.

El término sinusoidal es el que sigue perfectamente a la perturbación ("componente elástico") y el término cosinusoidal está desfasado $\pi/2$ grados respecto la perturbación y representa el "componente viscoso".

El modelo de Maxwell permite pues describir cualitativamente las observaciones experimentales: entre la perturbación sinusoidal y la respuesta, también sinusoidal, existe un desfase comprendido entre 0 y $\pi/2$ grados.

Operando un poco, con trigonometría elemental, puede escribirse:

$$t(t) = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t + j) \quad (19)$$

donde:

$$A_1 = G \cdot \frac{l \cdot \omega \cdot \sqrt{1 + l^2 \cdot \omega^2}}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \quad \rightarrow \quad \text{Razón de amplitudes} \quad (20)$$

$$d = \arctan(l \cdot \omega) \quad \rightarrow \quad \text{Ángulo de desfase} \quad (21)$$

La respuesta tiene una amplitud cada vez menor a medida que aumenta la frecuencia ($A \rightarrow 0$ si $\omega \rightarrow \infty$) y el desfase crece a medida que aumenta la frecuencia, es decir, ($\delta \rightarrow \pi/2$ si $\omega \rightarrow \infty$).

Este par de conclusiones también se observan en ensayos tipo oscilatorio. Sin embargo, al efectuar diversos ensayos oscilatorios a diversas frecuencias, puede observarse cómo es imposible encontrar un par de parámetros G y λ que sean capaces de ajustar las observaciones al modelo.

La solución a este problema consiste, como siempre, en complicar el modelo, recurriendo a una ecuación que contenga más parámetros, pero que conserve lo que de bueno existe en el modelo sencillo, como lo es el modelo de Maxwell generalizado.

2.12.1 MODELO DE MAXWELL GENERALIZADO

Para este modelo el comportamiento dinámico de un fluido viscoelástico, es decir la relación entre la deformación y el esfuerzo aplicado, es *cuantitativamente* el mismo que el que sufriría un sistema de varios resortes y amortiguadores colocados en paralelo, como el de la figura 2-14.

Básicamente, la idea se resume en la siguiente figura:

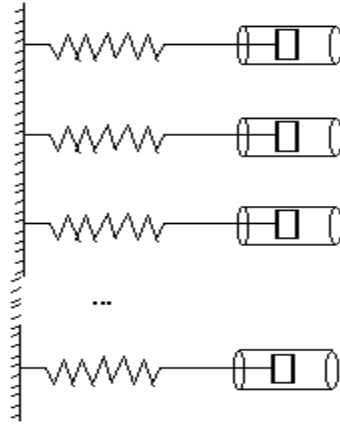


Figura 2-14: Sistema del Modelo de Maxwell generalizado⁴.

La obtención de la relación $\tau(t) - \gamma(t)$ para este modelo se reduce a considerar que el esfuerzo total es igual a la suma de los esfuerzos efectuados sobre todo el sistema y que la deformación total es igual a la deformación en cada uno de los elementos. (Macosko, 1994)

$$t(s) = \sum_i t_i(s) = \frac{A \cdot \omega}{s^2 + \omega^2} \cdot \sum_i \left\{ \frac{G_i \cdot l_i \cdot s}{1 + l_i \cdot s} \right\} \quad (22)$$

Entonces:

La solución (suponiendo de nuevo amplitud de onda A igual a la unidad) es formalmente igual a la antes obtenida, siendo:

$$t(t) = \left\{ \sum_i G_i \cdot \frac{l_i \cdot \omega}{1 + l_i^2 \cdot \omega^2} \right\} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \left\{ \sum_i G_i \cdot \frac{l_i^2 \cdot \omega^2}{1 + l_i^2 \cdot \omega^2} \right\} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (23)$$

Al término en fase (el coeficiente que multiplica al término sinusoidal) se le denomina módulo de almacenamiento (G') y al coeficiente que multiplica al término coseno se le denomina módulo de pérdidas (G''), ya que de algún modo reflejan el hecho de que parte de la energía suministrada al fluido en su deformación queda almacenado y otra parte se disipa en forma de calor.

A partir de aquí se define el *espectro de relajación* como:

$$G'+G''=\sum_i G_i \cdot \frac{l_i \cdot \omega + l_i^2 \cdot \omega^2}{1 + l_i^2 \cdot \omega^2} \quad (24)$$

El interés de esta ecuación es grande. Analizándola detenidamente, se tiene:

- por un lado los parámetros G' y G'' , obtenidos experimentalmente y que son función de la frecuencia.
- por otro lado, un conjunto de coeficientes λ y G , que van a estar relacionados con las características del fluido analizado.

De hecho se prefiere trabajar con la forma integrada de la expresión anterior, de modo que si se supone que los valores consecutivos de λ_i son cercanos, puede realizarse la aproximación:

$$G'+G''=\int_{l=0}^{l=\infty} G \cdot \frac{l \cdot \omega + l^2 \cdot \omega^2}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \cdot \frac{dl}{l} \quad (25)$$

2.12.2 MODELO DE MAXWELL NORMALIZADO

Una forma convencional de presentar los resultados de pruebas de oscilación consiste en graficarlos en términos de la viscosidad dinámica normalizada $\frac{h'}{h}$ y los módulos dinámicos normalizados $\frac{G'}{G}$ y $\frac{G''}{G}$, en función

de la frecuencia normalizada ωl , donde: $l = \frac{h}{G}$ es el tiempo de relajación para el modelo sencillo de Maxwell. (Jin, L. y Chenevert, M. E., 1994)

Las cantidades normalizadas pueden ser calculadas como se indica a continuación:

$$\frac{h'}{h} = \frac{1}{1 + \omega^2 l^2} = \left(\frac{G''}{G^*} \right)^2 \rightarrow \text{Viscosidad normalizada}$$

$$\frac{G'}{G} = \left(\frac{G'}{G^*} \right)^2 \rightarrow \text{Módulo elástico normalizado}$$

$$\frac{G''}{G} = \frac{G' G''}{G^{*2}} \rightarrow \text{Módulo viscoso normalizado}$$

$$\omega l = \frac{G'}{G''} \rightarrow \text{Frecuencia normalizada}$$

En la siguiente figura se muestra el comportamiento ideal de un fluido que sigue el modelo de Maxwell:

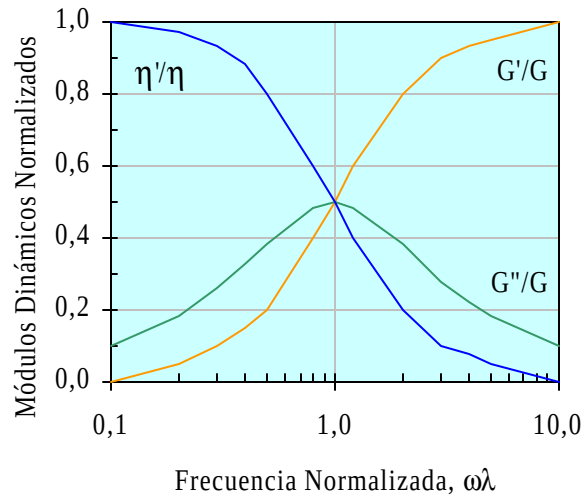


Figura 2-15: Comportamiento normalizado de un fluido de Maxwell ¹².

Se observan los módulos dinámicos normalizados y la viscosidad dinámica normalizada en función de la frecuencia normalizada. Los valores

de $\frac{G'}{G}$ denotan un comportamiento reológico particular, que se señala a continuación:

Si $\frac{G'}{G^*} = 0 \rightarrow$ representa un fluido viscoso ideal ($\frac{h'}{h} = 1$),

Si $\frac{G'}{G^*} = 1$ ($\frac{G'}{G} = 1$) $\rightarrow$ representa un cuerpo elástico ideal.

La intersección de las tres curvas en el valor de 0,5 representa el *punto de cruzamiento (cross-over)*. Esto significa que hacia la izquierda de este punto, el comportamiento del material es más viscoso que elástico; en el lado derecho domina un comportamiento elástico. Al ajustar los valores medidos de G' y G'' con el modelo de Maxwell, los módulos dinámicos normalizados caerán sobre las curvas teóricas. El grado de elasticidad estará representado por la densidad de los puntos en las curvas normalizadas. (Jin, L. y Chenevert, M. E. ,1994)

2.13 NÚMERO DE DEBORAH (De)

En la mayoría de los casos, las propiedades de los fluidos con comportamiento viscoelástico, se ven afectadas significativamente por el factor tiempo. Una medida de la influencia del tiempo en las propiedades del fluido es el Número de Deborah (De), que es la relación entre el tiempo de respuesta y el tiempo observado:

$$De = \frac{\text{tiempo} \cdot \text{de} \cdot \text{respuesta}}{\text{tiempo} \cdot \text{observado}}$$

Un ejemplo de un sistema que tiene un Número de Déborah grande es una ventana de vidrio normal. Si es bastante viejo, como por ejemplo una vieja ventana de una iglesia, se puede medir fácilmente una diferencia de

espesor en la parte de arriba y el espesor en la parte de abajo. Aunque la viscosidad del vidrio es alta, aproximadamente 1040 Pa·s, este es todavía un fluido y por consiguiente fluye. Sin embargo, el tiempo requerido para observar este movimiento es grande, quizás un par de siglos.

En la figura 2-16, se muestra un esquema de la clasificación de los modelos viscoelásticos según el rango de deformación y el número de Deborah. Se destaca que la región de viscoelasticidad lineal es muy limitada, ya que se debe cumplir que la amplitud de deformación debe ser muy pequeña. (Macosko, C.W.,1994)

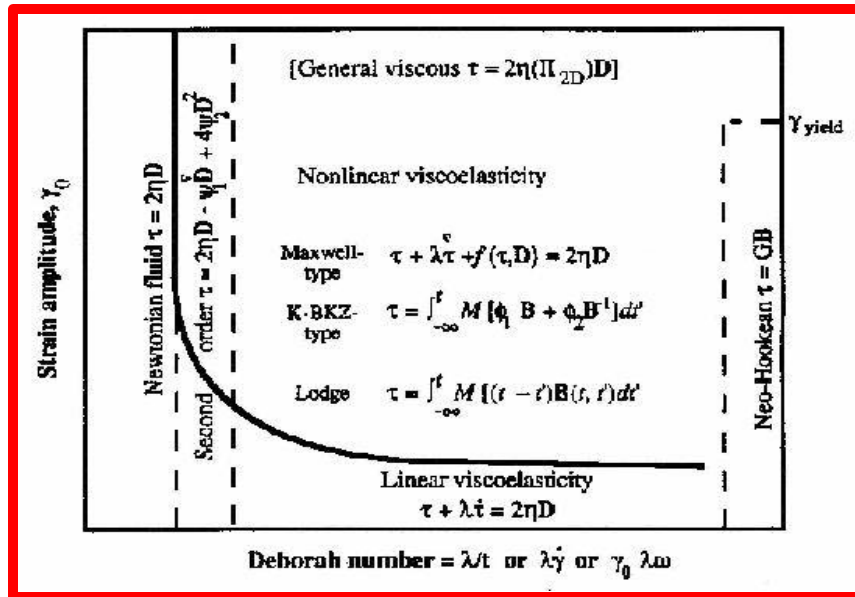


Figura 2-16 : Modelos viscoelásticos en relación al Número de Deborah ¹³.

2.14 FENÓMENOS VISCOELÁSTICOS

Los fluidos viscoelásticos se caracterizan por presentar ciertos fenómenos físicos, entre los que se tiene: la capacidad de retroceder completamente como si se tratara de una goma, el efecto de hinchamiento producido a la salida del fluido de un capilar y el efecto Weissenberg.

El fenómeno de retroceso elástico se observa en la figura 2-17. (Barnes, H.A.,1989)

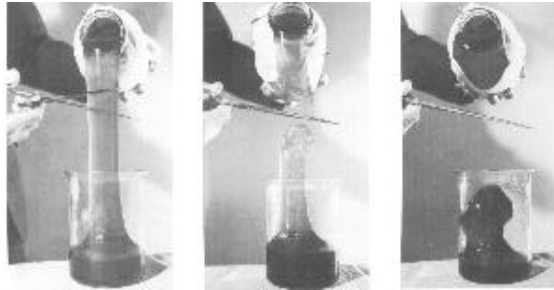


Figura2-17: Retroceso elástico ⁴.

El efecto de die swell, que se observa en la figura 2-18, es el que se produce en el fluido viscoelástico a la salida de un capilar, en donde el diámetro aumenta a medida que sale del agujero, es decir se observa un hinchamiento del fluido. Este fenómeno también se produce con los fluidos Newtonianos, pero solo a bajas tasas de corte. (Barnes, H.A.,1989)

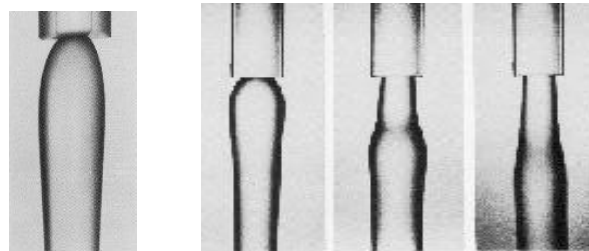


Figura2-18: Die swell ⁴.

En el efecto de « autovaciado » el fluido es capaz de seguir la tendencia generada al vaciar el recipiente en donde se encuentra, sin la necesidad de inclinar el envase, debido a las fuerzas normales, como se observa en la figura 2-19. (Barnes, H.A.,1989)

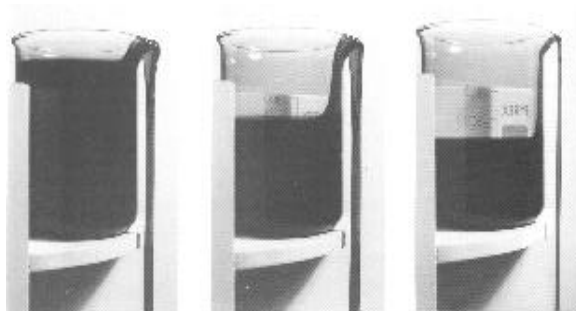


Figura 2-19: Auto-vaciado de copa (Self-emptying beaker).

Con el efecto Weissenberg, la deformación de corte desarrolla esfuerzos normales (en dirección ortogonal), adicionales a los esfuerzos de corte habituales. El fluido es capaz de «subir» por la barra de agitación, este fenómeno se observa claramente la figura 2-20.

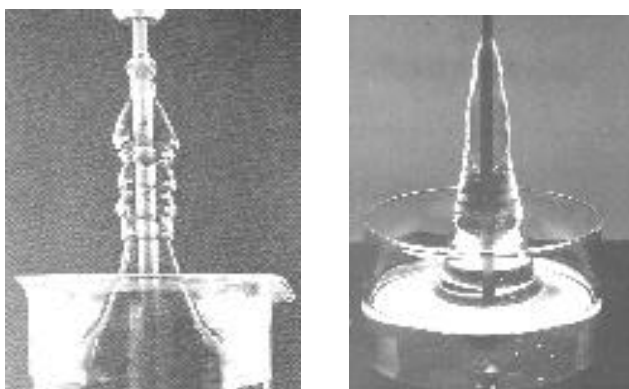


Figura2-20: Efecto Weissenberg ⁴

2.15 REOMETRÍA

Para los estudios del comportamiento reológico se utilizan aparatos llamados reómetros. Un *reómetro* es el instrumento que mide la historia de esfuerzos y deformación simultáneamente y se utiliza para determinar funciones materiales (como la viscosidad) de un material cuya relación

constitutiva es desconocida. Se pueden elaborar *reogramas* en donde se grafica la relación entre el esfuerzo (τ) y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$).

Generalmente, se dice que, si el instrumento con el cual se evalúa la viscosidad realiza movimientos rotacionales se llama viscosímetro y si realiza la medición mediante oscilaciones se llama reómetro, pero esto es solo para diferenciar ambos equipos, ya que este último es más sofisticado.

2.15.1 VISCOMETRÍA CON ESFUERZO CONTROLADO

El principio básico de la viscometría con esfuerzo controlado es someter una muestra del fluido a corte entre dos placas paralelas, a la acción de un esfuerzo de corte aplicado τ , originando un perfil de velocidades tangencial a las placas. Para el caso de dos cilindros concéntricos, se genera el siguiente perfil de velocidad:

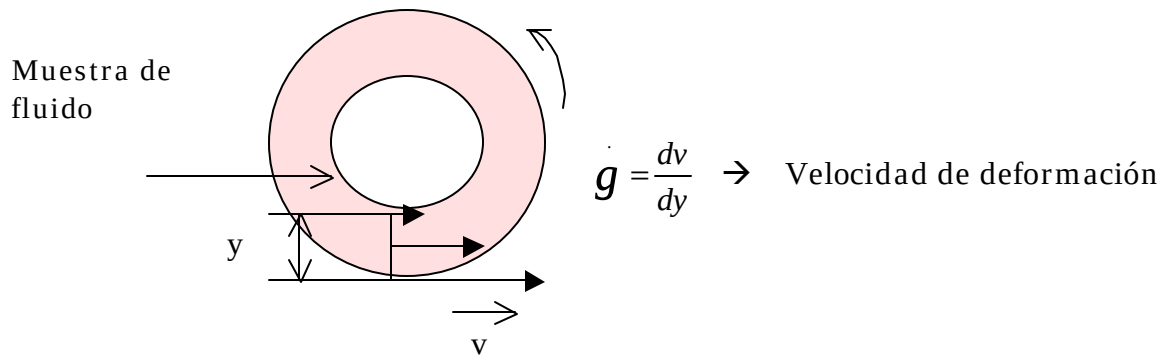


Figura2-21: Para el perfil de velocidades se considera un elemento suficientemente pequeño, para hacer la curvatura despreciable ¹⁷.

2.15.2 PRUEBAS DE OSCILACIÓN.

En una prueba de oscilación, la muestra es sometida a un esfuerzo de corte armónico, con amplitud controlada τ_0 y una frecuencia angular ω , obteniéndose una deformación, también armónica (Manual del Bohlin, 1997):

$$\text{Entrada} \rightarrow t = t_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\text{Salida} \rightarrow g = g_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - d)$$

La amplitud de la respuesta en deformación es γ_0 , y δ es el ángulo de desfase, que es una característica del comportamiento viscoelástico.

En la figura 2-22, se observan las ondas referentes a la deformación y al esfuerzo. Para analizar la onda esfuerzo se separa en dos una que se encuentra en fase y la otra en desfase con respecto a la deformación. Estas dos ondas tienen igual frecuencia que la onda de deformación una de las cuales se encuentra en fase con la de deformación ($\sin \omega t$) y la otra onda se encuentra desfasada 90° con respecto a la onda de deformación ($\cos \omega t$).

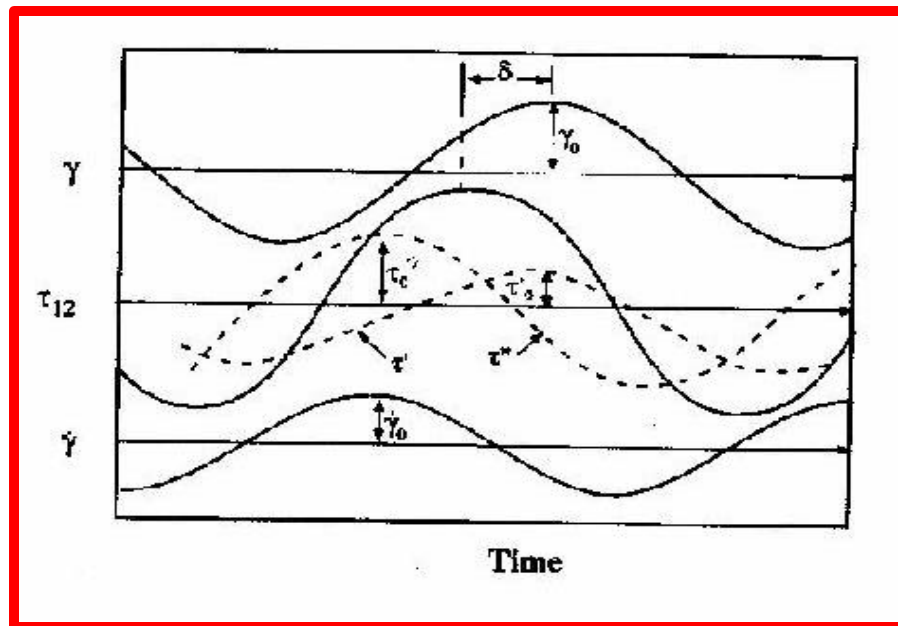


Figura2-22 : Esfuerzo y deformación en una prueba oscilatoria. Se observa que t' está en fase con g y t'' se encuentra en desfase con g ¹³.

En términos de esfuerzo y deformación los módulos dinámicos que representan la respuesta elástica y la respuesta viscosa (Ver Apéndice D, para conocer la procedencia), son los siguientes:

$$G' = \frac{t_0}{g_0} \cos d \rightarrow \text{Módulo dinámico elástico} \quad (27)$$

$$G'' = \frac{t_0}{g_0} \sin d \rightarrow \text{Módulo dinámico viscoso} \quad (28)$$

$$G^* \equiv G' + iG'' \rightarrow \text{Módulo dinámico complejo} \quad (29)$$

$$d = \tan^{-1} \left(\frac{G''}{G'} \right) \rightarrow \text{Ángulo de desfase} \quad (30)$$

2.15.3 VISCOSIDAD COMPLEJA

La viscosidad dinámica compleja η^* esta relacionada con la componentes elástica y viscosa que conforman el módulo dinámico complejo G^* , y con la frecuencia ω , y estos valores son obtenidos de la prueba de oscilación en un reómetro. Matemáticamente, es la suma de la parte real (componente elástica) y la parte imaginaria (componente viscosa) del número complejo. La parte real es usualmente llamada viscosidad dinámica. (Barnes, Hutton y Walters, 1989)

La viscosidad compleja queda representada de la siguiente manera:

$$h^* = h' - ih'' = \frac{G'}{\omega} - i \frac{G''}{\omega} \quad (31)$$

2.15.4 TIEMPO DE RELAJACIÓN

Es el tiempo que transcurre para cambiar la estructura molecular de un fluido que obedece el modelo de Maxwell al aplicar ciertos niveles de esfuerzo. Los fluidos con tiempo de relajación largo tienen mayor esfuerzo cedente y por consiguiente tienen mayor capacidad de suspensión y acarreo.

Las componentes elástica y viscosa para un modelo de Maxwell generalizado, se definen como:

$$G' = \sum_i G_i \cdot \frac{\omega^2 \cdot l_i^2}{1 + l_i^2 \cdot \omega^2} \rightarrow \text{Componente Elástica}$$

$$G'' = \sum_i G_i \cdot \frac{l_i \cdot \omega}{1 + l_i^2 \cdot \omega^2} \quad \rightarrow \quad \text{Componente Viscosa}$$

Si definimos el sistema para $i=1$ (Macosko, C.W.,1994), simplificando el sistema, se obtiene:

$$G' = \frac{G \cdot \omega^2 \cdot l^2}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \quad y \quad G'' = \frac{G \cdot \omega \cdot l}{1 + l^2 \cdot \omega^2},$$

la relación de ambas componentes queda determinada de la siguiente manera: $\frac{G'}{G''} = \omega \cdot l$ despejando λ se obtiene la siguiente ecuación:

$$l = \frac{G'}{G'' \cdot \omega}, \quad \text{el tiempo de relajación se determina para}$$

deformaciones y frecuencias muy pequeñas, por lo que se toma el límite cuando la deformación se aproxima a cero ($\gamma, \omega \rightarrow 0$):

$$l = \lim_{\gamma, \omega \rightarrow 0} \frac{G'}{\omega G''} \quad (32)$$

Generalmente, se puede determinar gráficamente el tiempo de relajación como el tiempo en que la componente elástica se iguala a la componente viscosa, y de esta igualdad se despeja este tiempo, obteniéndose el siguiente resultado: cuando $G' = G''$:

$$\frac{G \cdot \omega^2 \cdot l^2}{1 + l^2 \cdot \omega^2} = \frac{G \cdot \omega \cdot l}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \quad \rightarrow \quad \omega \cdot l = 1 \quad \rightarrow \quad l = \frac{1}{\omega}$$

2.15.5 FLUIDOS POLIMÉRICOS.

El comportamiento de cualquier polímero *depende de la distribución de masas en este polímero*. Esta distribución de masas afectará tanto a las propiedades mecánicas (capacidad de elongación, punto de rotura...) como físicas (punto de fusión, solubilidad...). No se comportará igual un polímero de cadenas cortas que otro de cadenas largas, el segundo tendrá propiedades mecánicas más fuertes.

Estos fluidos también tienen “*elasticidad*” y “*memoria*”. Cuando la fuerza de presión ejercida en un tubo con un fluido viscoelástico es removida, el fluido comienza a regresar a la posición de la cual partió, pero el mismo, no llega por completo a su estado inicial, debido a que, parece ser, que el fluido va gradualmente olvidando su lugar de origen.

2.16 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las propiedades reológicas que se miden en los lodos de perforación son principalmente la viscosidad, el punto cedente y la resistencia de gel, las cuales provienen del estudio del esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación. Para la evaluación de estas propiedades reológicas es necesario el uso de curvas de flujo realizadas con los datos obtenidos con el viscosímetro de campo y con el viscosímetro de laboratorio. Para evaluar el comportamiento viscoelástico se realizaran pruebas oscilatorias en un reómetro y la evaluación de la capacidad de filtrado se realizará mediante la prueba de filtrado API.

A continuación se explica detalladamente el procedimiento para la obtención de estas medidas:

2.16.1 VISCOSIDAD

La viscosidad evaluada es la viscosidad plástica, la cual representa la resistencia al flujo causada por la fricción mecánica entre las partículas de la fase dispersa. Se utiliza el viscosímetro de campo (Fann35), cuyo sistema de medición se basa en el de cilindros concéntricos y un vaso de calentamiento. Para los lodos base agua la temperatura de trabajo es 48,9 C (120 F), según las normas API 13B-1 (ver Apéndice E). Se toman seis (6) lecturas de esfuerzo de corte a seis (6) diferentes velocidades angulares, cuyos valores son 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm. Las lecturas en el dial están

diseñadas de manera tal que los puntos de esfuerzo obtenidos sean reportados en $\text{lbf}/100\text{pies}^2$ ($2,0833 \text{ lbf}/100\text{pies}^2$ equivale a 1Pa). La viscosidad plástica en campo se obtiene restando la lectura 300 de la lectura a 600 rpm y representa la pendiente de la recta que pasa por estos dos puntos. (BAROID, 1997)

$$V_p = L_{Fann600} - L_{Fann300} = \text{mPa}\cdot\text{s}$$

2.16.2 ESFUERZO CEDENTE

Esta medida es muy representativa para los fluidos de perforación. Un alto esfuerzo de cedencia implica que los sólidos son arrastrados con más facilidad, al circular el fluido, pero si es muy alto se traduce en problemas de filtración y pérdida de circulación.

En campo esta medida se estima suponiendo un comportamiento plástico del fluido (Modelo plástico de Bingham), según las normas API 13B-1. (Ver Apéndice E). Se realiza una gráfica utilizando las lecturas reportados por el viscosímetro versus las velocidades de corte. Se traza una recta que pase por los puntos obtenidos a 600 y 300 rpm. (BAROID, 1997) El valor del punto cedente será el valor obtenido para una velocidad de corte de 0 rpm, calculándose de la siguiente manera:

$$PC = L_{Fann300} - V_p = \text{lb}/100\text{pies}^2 = 0,48 \text{ Pa}$$

Este valor de esfuerzo cedente, en la mayoría de los casos es mayor que el esfuerzo de cedencia verdadero, sin embargo resulta muy útil para el trabajo de campo.

2.16.3 FUERZA DE GEL

Cuando un lodo se encuentra sometido a velocidades cercanas a cero durante cierto tiempo, el lodo tiende a formar un gel, y si fluimos y detenemos el corte nuevamente esta estructura se vuelve a formar. Esto se

conoce como tixotropía, y en campo para tener un grado aproximado de esta propiedad, se toman dos lecturas en el viscosímetro a una misma velocidad de 3 rpm, pero con diferente tiempo de reposo (primero a 10 segundos y luego a 10 minutos), siguiendo las normas API 13B-1. (ver Apéndice E). Una adecuada resistencia de gel, previene la sedimentación de los sólidos cuando se detiene la circulación. (BAROID, 1997)

2.16.4 LECTURA 3 RPM EN EL FANN

La lectura de esfuerzo de un fluido a 3 rpm en el Fann35, se aproxima al esfuerzo cedente verdadero de un fluido y puede ser utilizado como un indicador de la capacidad de limpieza del hoyo. Los valores óptimos varían con el tamaño del pozo, la velocidad de circulación y el ángulo del hoyo. (Patrick y Bjron, 1995)

2.16.5 PRUEBA DE ESTABILIDAD TÉRMICA.

El envejecimiento de un fluido de perforación es el proceso mediante el cual, se somete una muestra del mismo, a ciertas condiciones de temperatura, presión y rotación por un tiempo determinado simulando las condiciones de pozo. Esta prueba se realiza con la finalidad de conocer si el fluido estudiado es estable a la temperatura aplicada, además de conocer los cambios, si es que se producen, en las propiedades reológicas a estas condiciones. Se requieren celdas de envejecimiento de acero inoxidable, diseñadas para este tipo de prueba. La prueba para lodos base agua se realiza presurizando la muestra a una presión de 1034,21 Kpa (150 psi) y sometiéndola a una temperatura de 104,44C (220F) por un lapso de dieciséis (16) horas, en un horno rotativo. (Ver Apéndice E)

2.16.6 DETERMINACIÓN DEL DIÁMETRO DE GOTA DEL FLUIDO

Para determinar el diámetro de gota del fluido, se utiliza la técnica de dispersión de luz con el Mastersizer Malvern (ver sección 3.3.3.6). Esta propiedad es importante porque tiene relación directa con las propiedades reológicas y con la estabilidad de la emulsión. La viscosidad del fluido es la más afectada con el aumento o disminución del diámetro de gota. Se realizó esta medición antes y después de envejecer. (Manual del Malvern Mastersizer)

2.16.7 BARRIDO DE ESFUERZO

La prueba de barrido de esfuerzo se realiza utilizando el reómetro Bohlin, para determinar la zona de viscoelasticidad lineal. Se selecciona el intervalo de esfuerzo, la frecuencia en Hz y la temperatura con que se va a trabajar.

2.16.8 BARRIDO DE FRECUENCIA

Esta prueba se realiza después de determinar la zona de viscoelasticidad lineal con el barrido de esfuerzo. Se escoge un valor de esfuerzo que esté en el intervalo lineal, el cual va a representar la amplitud de la señal de entrada. Las frecuencias de trabajo van desde 0,1 hasta 10 Hz.

2.16.9 FILTRADO API

Esta prueba se realiza a 7,1 bar (100psi) y temperatura ambiente, según las normas API 13B-1. El filtrado API es solo una medida de los fluidos de perforación base agua. Se realiza la prueba tanto antes como después de envejecer para evaluar la estabilidad del filtrado.

2.16.10 CONTROL DE PH

Para controlar el PH de cada emulsión se utiliza un ph metro digital el cual trabaja con un electrodo. Se sumerge el electrodo en el fluido el cual se mantiene en movimiento a baja revolución, para garantizar homogeneidad del ph.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se realizaron ensayos para evaluar las propiedades reológicas y la capacidad de control de filtrado del fluido y poder estimar si este fluido representa un potencial sustituto de los fluidos aireados.

La parte experimental del proyecto se dividió principalmente en tres (3) etapas, estructuradas de la siguiente manera:

- Primer parte: *Lodos base sin microesferas de vidrio*, para determinar las formulaciones bases.
- Segunda parte: *Lodos con microesferas de vidrio*, para la evaluación del efecto de la concentración de aditivos, en el comportamiento reológico.
- Tercera parte: *Lodos con microesferas de vidrio más polímeros*, para evaluar el efecto de los polímeros como modificadores reológicos, basado en un estudio de viscoelasticidad del fluido.

En cada una de estas etapas se evaluaron las propiedades reológicas antes y después de envejecer. Se realizaron curvas de flujo para ajustar al mejor modelo reológico y determinar los cambios que se producen en estas al variar la concentración de los aditivos.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS.

Para el desarrollo de la parte experimental de este proyecto se requirió del uso de varios materiales, tanto para el proceso de formulación del fluido como para la evaluación de las propiedades reológicas. Estos materiales y equipos fueron los siguientes:

3.2.1 ADITIVOS

El fluido evaluado es una emulsión base agua (O/W), y los aditivos utilizados para su preparación son:

Sistema Tensoactivo: Es una mezcla de surfactantes emulsificantes. Se usa en conjunto con el aceite y el agua para formar la emulsión. Se presenta en forma líquida. (Arco, Blanco, Rosa y Garavito, 2000)

Aceite mineral: Es un aceite biodegradable y no tóxico y representa la fase dispersa de la emulsión. Tiene una densidad de 0,817gr/cm³.

Cloruro de Potasio (KCl): es una sal, que suministra iones de potasio para inhibir el hinchamiento de las arcillas y la dispersión de las mismas. Se presenta en forma de cristales blancos.

Monoetanolamina (MEA): Es una solución que se utiliza para mantener la alcalinidad. El control de la alcalinidad se realiza para evitar la corrosión de los equipos que están en contacto con el fluido, además de otras funciones. La emulsión preparada es estable con un PH entre 9,5 y 10, por lo que se utilizó 0,8 cm³ de MEA para lograr esta alcalinidad.

Esferas de vidrio: Son microesferas huecas de vidrio que se utilizan como agente reductor de densidad en fluidos de perforación y rehabilitación convencionales, para lograr densidades entre 0,66 y 0,96 gr/cm³ (5,5 y 8,0 lpg). También es usado para prevenir la posibilidad de pega diferencial. (Hojas técnicas de las micro-esferas de vidrio Scotchlite de la empresa 3M). En la siguiente tabla se presentan las características de las microesferas:

Tabla 3-1: Datos generales y estadísticos ¹¹.

Propiedad	Valor
Gravedad específica	0,38
Presión de fractura (MPa)	27,57
Tamaño promedio de partículas (µm)	36,53
Estabilidad térmica (C)	600
Alcalinidad (meq/gr.)	Máx. 0,5
Constante dieléctrica @ 100 MHz	1,2 – 1,8

La distribución del tamaño de las microesferas se muestra en la figura 3-1.

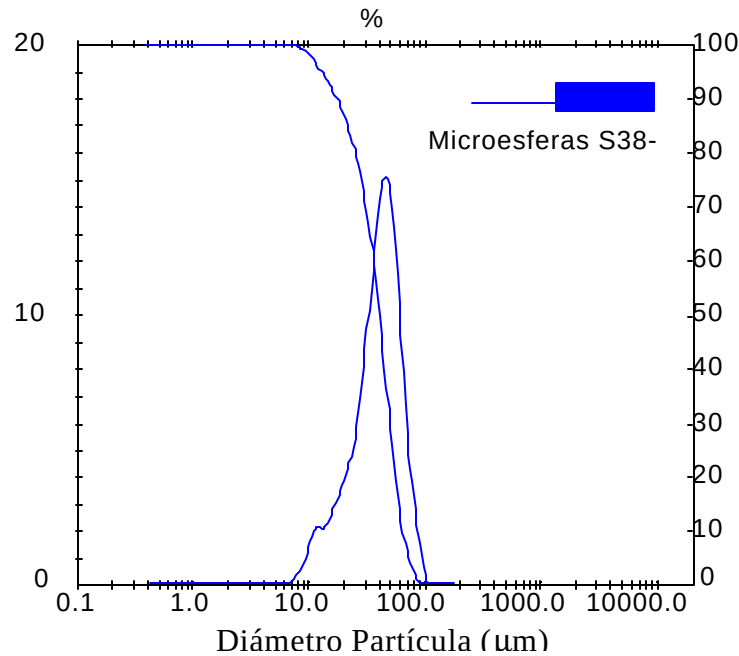


Figura 3-1: Distribución de tamaño de las microesferas⁷.

Modificadores reológicos: Los modificadores reológicos para los fluidos de perforación, generalmente son polímeros y deben cumplir con la propiedad de mantener las características reológicas del fluido a altas temperaturas, donde la mayoría de los componentes se degradan, desmejorando el comportamiento del mismo.

Para este proyecto se evaluaron seis (6) polímeros, con base en el estudio del comportamiento viscoso y del comportamiento elástico del fluido; así como la estabilidad térmica de la emulsión. Los polímeros utilizados se identificaron como Polímero1, Polímero2 y así sucesivamente hasta el Polímero6. Se utilizaron concentraciones desde 0,1 hasta 1,5gr de polímero por barril de laboratorio.

Las características de cada polímero se observan en la tabla 3-2 (Navarrete y Seheult, 2001).

Tabla 3-2: Características de los polímeros ^{19,20,21}.

Polímero	Característica
Polímero1	Polisacarido. Iónico.
Polímero2	Polisacarido. No iónico.
Polímero3	Polisacarido derivado de la Goma Xántica no acetilado.
Polímero4	Polisacarido. No iónico con estructura similar a la Goma Xántica.
Polímero5	Polisacarido. Derivado de la goma guar.
Polímero6	Derivado de celulosa. No iónico.

En general, la función de cada uno de los aditivos que forman parte de la composición del fluido evaluado se presentan en la tabla 3-3, que se muestra a continuación:

Tabla 3-3: Función de los aditivos del lodo base agua con microesferas de vidrio⁷.

Aditivos	Función
Agua	Fase continua
Aceite mineral	Fase dispersa
KCL	Inhibidor de hinchamiento
Sistema tensoactivo	Surfactante
MEA	Controlador del PH
Microesferas	Reductor de densidad
Polímero	Modificador reológico

3.2.2 EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados para el cumplimiento de las pruebas planteadas, fueron los siguientes:

3.2.2.1 MEZCLADORES

Mezcladores Hamilton Beach (10K - 15K rpm)

Como dispositivo de corte, se utilizó el mezclador Hamilton Beach modelo 936. Este agitador tiene tres velocidades a altas revoluciones con un eje de mezclado de doble aspa sinusoidal, y se utilizó para preparar todas las formulaciones.



Figura 3-2: Mezclador Hamilton Beach ¹⁰.

Mezclador Lightnin (500 - 1500 rpm)

Este mezclador es utilizado cuando se requiere agitación a baja revolución. Cumple con dos funciones principales: promover cerca del impulsor un movimiento rápido del fluido para que el campo de corte sea intenso y debe provocar dentro del vaso de mezclado un movimiento de circulación convectiva global, de tal forma que todo el fluido pase a través de la zona de corte. Para la preparación de los fluidos formulados en la parte experimental del proyecto, el Lightnin se utilizó para disolver al

polímero y para mezclar las microesferas de vidrio. El modelo de impulsor utilizado fue el tipo A100, el cual se muestra en la figura 3-4.



Figura 3-3: Agitador Lightnin ¹⁰.



Figura 3-4: Impulsor tipo A100 ¹⁰.

3.2.2.2 BALANZAS

Balanza digital

Para pesar la cantidad de aditivo a utilizar en cada formulación, se utilizó una balanza digital con una capacidad máxima de 4000 gr con una apreciación de $\pm 0,1$.

Balanza para Lodo

Este es el instrumento que generalmente se emplea para la determinación del peso del lodo. Permite mediciones de precisión entre $\pm 0,1$ lpg ($0,012\text{gr/cm}^3$). En un extremo del brazo posee una taza en donde se añade el lodo equilibrada con un contrapeso fijo ubicado en el extremo contrario. En el brazo existe una escala graduada y a través de este se desliza una guía, la cual indicará el peso del lodo, cuando la burbuja de nivel que se encuentra en el brazo se estabilice, para permitir un equilibrio preciso.



Figura 3-5: Balanza para lodo ¹⁰.

3.2.2.3 pH METRO

Para realizar las mediciones del pH de las emulsiones se utilizó el pH metro digital, de la Fann, con electrodo de vidrio. Este equipo es confiable debido a que no presenta interferencias y es diseñado para medir valores de pH entre 0 a 14.



Figura 3-6: pH metro digital ¹⁰.

3.2.2.4 VISCOSÍMETROS

Fann 35A

Es un viscosímetro de lectura directa. Se utiliza para mediciones a baja temperatura y no presurizado. El sistema de trabajo son dos cilindros concéntricos y el fluido se encuentra en el espacio anular entre los cilindros. El cilindro exterior es accionado a una velocidad de rotación constante, produciendo una torsión en el cilindro interior. Un resorte de

torsión limita el movimiento del cilindro interior y el torque es transmitido a un resorte de precisión y su deflexión es medida en un dial. Este desplazamiento representa el esfuerzo de corte en fracciones de 0,48 Pa (1lbf/100pies²). Este tipo de viscosímetro es ampliamente utilizado en campo. La cantidad de datos suministrados por este equipo es limitada, pues se obtienen solo seis (6) lecturas de esfuerzos a seis (6) velocidades de corte (3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm), pero que son suficientes para las medidas realizadas en campo. Se utilizó este equipo según el procedimiento utilizado en campo para reportar valores de viscosidad plástica, punto cedente y formación de gel, solo para comparar las propiedades obtenidas con los valores que frecuentemente se utilizan en campo.



Figura 3-7: Viscosímetro Fann35 ¹⁰.

Haake Sistema 550

El Haake modelo rotovisco VT500, es un viscosímetro rotacional que permite obtener información del comportamiento reológico del fluido, en función del gradiente de velocidad o deformación a que es sometido de manera automática, el sistema. Este viscosímetro permite reportar datos de viscosidad absoluta al definir la velocidad de corte y fijar una temperatura, con la ayuda de un software. Es utilizado para la completa

caracterización de fluidos newtonianos y no newtonianos, incluyendo las medidas de punto cedente y tixotropía. Este viscosímetro permite trabajar con cilindros concéntricos y con el sistema plato – cono. Se reporta una mayor cantidad de puntos, en comparación con el viscosímetro Fann, por lo que se obtienen resultados más exactos. Una de las ventajas principales de este viscosímetro, es la posibilidad de aplicar diferentes regímenes de tasa de corte además de que permite adaptar modelos reológicos predeterminados por el software a la curva obtenida.



Figura3-8: Viscosímetro Haake y accesorios ²⁹.

3.2.2.5 REÓMETRO BOHLIN

El modelo de este reómetro es CS de esfuerzo controlado. Es automático, al igual que el Haake. Con este reómetro se puede controlar la velocidad de deformación angular y el esfuerzo de corte. Debido a que permite realizar pruebas oscilatorias, se puede evaluar el comportamiento elástico (creep recovery) y el comportamiento viscoso del fluido. Las pruebas que se realizan en este reómetro son: de barrido de esfuerzo (shear sweep), barrido de frecuencia (oscillation), esfuerzo cedente (yield stress), tasa de corte constante (constant rate) y viscometría entre otras.

Se puede trabajar con cilindros concéntricos, plato – cono y plato – plato.



Figura 3-9: Reómetro Bohlin²⁴.



Figura 3-10: Accesorios del reómetro²⁴

3.2.2.6 MALVERN MASTERSIZER

Este equipo trabaja con la técnica de dispersión de luz, y se utiliza para medir el diámetro de gota de las emulsiones y determinar la distribución del tamaño de partícula de los fluidos de perforación. Las pruebas realizadas en este equipo son bastante rápidas, una medición dura aproximadamente tres (3) minutos. El principio de medición del equipo es la defracción de luz a través de diferentes ángulos.



Figura 3-11: Malvern Mastersizer¹⁵.

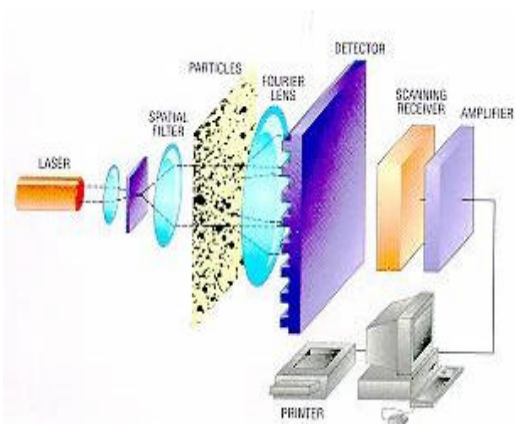


Figura 3-12: Proceso de medición¹⁵.

3.2.2.7 FILTRO PRENSA API

Este filtro prensa consiste, fundamentalmente, en una celda cilíndrica para lodos con una diámetro interior de 3 pulgadas (76,2 milímetros) y una altura de, por lo menos, 2,5 pulgadas (64,0 milímetros). Esta cámara es de materiales resistentes a las soluciones sumamente alcalinas y está equipada de manera tal que se le puede introducir cómodamente un medio de presión. Su estructura permite colocar una hoja de papel filtro de 9 centímetros en el fondo de la cámara, justo sobre un soporte apropiado. El área de filtración es de $7,1 \pm 0,1$ pulgadas cuadradas (4580 ± 60 milímetros cuadrados). Por debajo del soporte se encuentra el tubo de drenaje, para la descarga del filtrado en un cilindro graduado. La obturación se logra con empaaduras, y todo el ensamblaje se apoya en una base tipo pedestal.

3.2.2.8 CELDAS DE ENVEJECIMIENTO

Las celdas de envejecimiento son recipientes cilíndricos de acero inoxidable con una capacidad de 500 cm³. Constan de una tapa, también de acero inoxidable, en la cual va insertada una válvula especial, cuya geometría permite adaptarse a una tubería de gas nitrógeno. Para la prueba de envejecimiento la celda es presurizada y sometida a altas temperaturas en hornos rotativos.

3.2.2.9 HORNOS

Se utilizaron hornos rotativos, para las pruebas de envejecimiento, los cuales están equipados con rodillos. La rotación es producida por un sistema de poleas con cadenas. En los hornos utilizados se mantiene una circulación adecuada de aire internamente, lo que garantiza una distribución uniforme de temperatura.

3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se diseñó un procedimiento experimental estableciendo el siguiente orden:

- Formulación de los lodos.
- Evaluación de las propiedades reológicas.
- Envejecimiento de los lodos.
- Evaluación de las propiedades reológicas, después de la prueba de envejecimiento.
- Análisis del diámetro de gota.
- Pruebas oscilatorias.
- Pruebas de filtrado.

3.3.1 FORMULACIÓN DE LOS LODOS

En la primera parte: ***lodos sin microesferas***, se prepararon cinco (5) formulaciones bases, en las cuales se varió la relación aceite/agua (O/W) y se realizaron estudios del comportamiento reológicos a cada una de las emulsiones, tanto antes como después de la prueba de envejecimiento, utilizando los equipos: Fann 35 y Haake, como es sugerido en las normas API, 13B-1 (ver Apéndice C). Se preparó un barril de laboratorio (un barril de laboratorio son 350 cm³) de cada una de las formulaciones. Se determinó la cantidad en peso y en volumen de los aditivos utilizados (ver Apéndice A). Se utilizó la balanza de lodos para medir la densidad y para el cálculo de la densidad teórica se realizó un balance de masa (ver Apéndice B).

En la segunda parte: ***lodos con microesferas***, se evaluó el efecto de la concentración de microesferas en el comportamiento reológico de las formulaciones de la primera parte. A cada una de las formulaciones base se les varió la concentración de la fase dispersa. Se sustituyó parte del

volumen de fase dispersa por volumen de microesferas de vidrio, con la finalidad de reducir el peso del lodo, evaluar la influencia en el comportamiento reológico comparando con la formulación base y determinar las concentraciones óptimas de esferas. El volumen sustituido de la fase dispersa varió desde un 5 hasta un 30%.

Para la tercera parte: ***lodos con microesferas y polímeros***, se seleccionaron seis (6) formulaciones de la segunda parte, para evaluar el efecto de la incorporación de polímeros en las propiedades reológicas. El criterio para escoger las formulaciones utilizadas en esta parte del proyecto fue la densidad, la cual debería ser menor o igual a $(0,78\text{gr/cm}^3)$ 6,5 lpg. También influyeron los resultados de la prueba de envejecimiento y diámetro de gota, que indica si la emulsión es estable a una temperatura de 104,4 C (220 F). Con la incorporación del polímero, se busca aumentar la viscosidad y la elasticidad de la emulsión y obtener valores de viscosidad plástica, que estuviesen en el intervalo de 30-45 mPa.s (con el lodo después de envejecer). El comportamiento obtenido debería ser estable tanto antes como después de la prueba de envejecimiento. Las pruebas de viscoelasticidad se realizaron en el reómetro Bohlin.

El primer polímero utilizado fue el Polímero1, el cual es utilizado en campo como viscosificante en los fluidos de perforación. Se incorporó este polímero a las seis (6) formulaciones seleccionadas y se escogió la que presentó mejor comportamiento elástico y viscoso.

Con esta formulación se procedió a evaluar los cinco (5) polímeros restantes, descritos en la sección 3.2.1, utilizando igual concentración que la utilizada de Polímero1. Las propiedades reológicas y el comportamiento viscoelástico de la formulación con Polímero1, se utilizaron como marco de referencia para comparar las propiedades reológicas de la emulsión modificada con los restantes polímeros. Se compararon los resultados

obtenidos para escoger cual polímero presentaba una mejor alternativa en relación con el Polímero1. También se compararon los resultados obtenidos con un fluido comercial el cual se caracteriza por tener un comportamiento altamente elástico. Se realizaron pruebas oscilatorias tanto antes como después de envejecer.

De estas pruebas se seleccionó el polímero que proporcionara mayor estabilidad térmica a altas temperaturas y alto comportamiento viscoelástico y se procedió a realizar cambios en la concentración de la fase continua, de la fase dispersa y también en la concentración de las microesferas de vidrio, para obtener la formulación ideal.

Con la formulación final se realizaron pruebas de filtrado con la emulsión antes y después de envejecer a dos temperaturas diferentes 82,22 C y 104,44 C (180 F y 220 F). Los resultados obtenidos de las pruebas de filtrado se compararon con el comportamiento viscoelástico para determinar si existe relación entre las propiedades viscoelásticas y la capacidad de control de filtrado del fluido.

3.3.2 PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

Para la preparación de los lodos a nivel de laboratorio se siguió el siguiente procedimiento en base a un 350cm³ (volumen equivalente de barril en laboratorio):

Procedimiento de mezclado para el lodo sin microesferas de vidrio:

1. Pesar el agua en la jarra de mezclado, de acuerdo a la formulación seleccionada.
2. Pesar el KCL y disolver en el agua, mediante agitación manual, hasta lograr una completa disolución (se agita manualmente debido

a que la cantidad de KCL utilizada es mínima y se disuelve rápidamente)

3. Se pesa el surfactante y se mezcla con el agua+ KCL, también mediante agitación manual.
4. Después de pesado el aceite mineral, se agrega a la mezcla anterior y se agita hasta homogenizar. Se utiliza un mezclador tipo Hamilton beach a una velocidad de 11000 rpm, por aproximadamente tres (3) minutos.
5. Se agrega la Mono-Etanolamina (MEA), sin detener el mezclado, hasta obtener un pH entre 9,5 y 10. Se agita por dos (2) minutos adicionales.
6. Dejar todo el sistema agitando a 11000 rpm por dos (2) minutos adicionales.

Procedimiento de mezclado para el lodo con microesferas:

Se siguen los pasos anteriores para la preparación de la emulsión añadiendo los siguientes pasos:

7. Pesar las microesferas de vidrio en una balanza ubicada en una campana, para evitar la dispersión de estas en el ambiente.
8. Se procede a agregar las microesferas lentamente a la emulsión ya preparada, hasta detectar una completa homogenización.
9. Agitar la mezcla final por dos (2) minutos.

Procedimiento de mezclado para el lodo con microesferas más polímero:

Se realizaron pequeños cambios en el procedimiento de mezclado, en comparación con el patrón seguido anteriormente. Los cambios fueron:

1. Disolver el polímero en el agua ya pesada, utilizando el Lightnin a 500 rpm por quince minutos (15).
2. Agregar el KCL y agitar con el mismo equipo por espacio de cinco (5) minutos.
3. Seguir los pasos señalados anteriormente desde el 3 hasta el 9.

Debido a la fácil dispersión de las microesferas en el aire, se recomienda utilizar guantes y máscara antipolvo para evitar la irritación de la piel y la inhalación de las mismas.

3.3.3 PROPIEDADES REOLÓGICAS.

Ya formulada y preparada cada una de las emulsiones, se procedió a evaluar las propiedades reológicas, para lo cual fue necesario agitar los lodos por espacio de tres (3) minutos a 500 rpm, antes de cada medición.

Se evaluaron curvas de flujo, viscosidad plástica, punto de cedencia, geles, comportamiento elástico, comportamiento viscoso y se determinó el tiempo de relajación.

Para reportar valores de viscosidad plástica y punto cedente, se aproximó sólo con fines prácticos, un comportamiento plástico (según el modelo de Bingham) y se reportaron valores de índice de consistencia y de fluidez cuando el comportamiento reológico se aproximó al modelo de Ley de Potencia (modelo Otswald).

Para las pruebas reológicas, con esfuerzo controlado se realizaron dos ensayos: el primer consistió en un barrido de esfuerzo (stress sweep) con el objeto de determinar el intervalo de viscoelasticidad lineal y el segundo fue un barrido de frecuencia (reometría oscilatoria) con el que se observó el comportamiento elástico y viscoso, además de determinar el tiempo de relajación.

3.3.3.1 CURVAS DE FLUJO

Para cada una de las formulaciones se obtuvo la curva de esfuerzo vs. velocidad de deformación, y viscosidad aparente vs. velocidad de deformación. Se utilizó el viscosímetro Fann35, para comparar con valores trabajados en campo, y el viscosímetro Haake, para seleccionar el mejor ajuste a un modelo reológico determinado.

3.3.3.2 VISCOSIDAD.

Como los fluidos evaluados son pseudoplásticos (la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de deformación), no se puede reportar un valor de viscosidad absoluta, por lo que se consideró una relación lineal entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación angular, aproximando el comportamiento al modelo Plástico de Bingham, el cual es el principio del viscosímetro de campo (Fann35), siguiendo las normas API 13B-1 (ver Apéndice E). También se utilizó el viscosímetro Haake, el cual reporta como viscosidad, la pendiente de la recta que mejor se ajusta a la data obtenida. El intervalo de velocidad de corte con la que se trabajó, varió de 0 – 1020 s⁻¹.

3.3.3.3 ESFUERZO DE CEDENCIA.

Para el cálculo de esfuerzo cedente también se utilizó el viscosímetro de campo, siguiendo las normas API 13B-1 (ver Apéndice E) y el viscosímetro Haake.

3.3.3.4 GELES

Con esta prueba se determina la capacidad del fluido de suspender los sólidos. Para la realización de esta prueba también se siguió las normas API 13B-1 (ver Apéndice E).

3.3.4 COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO.

Para evaluar el comportamiento viscoelástico del fluido, se utilizó el reómetro Bohlin. Los módulos dinámicos y la viscosidad compleja se midieron mediante pruebas de oscilación.

Con el fin de determinar la región de viscoelasticidad lineal del fluido, se realizaron barridos de esfuerzo. De esta forma se evaluó la amplitud de esfuerzo a la cual se efectuaría el resto de las pruebas dinámicas, garantizando que la región de trabajo esté en el intervalo de viscoelasticidad lineal.

3.3.4.1 TIEMPO DE RELAJACIÓN.

El tiempo de relajación se determinó de la gráfica de módulos dinámicos, en donde se gráfico el comportamiento elástico y el comportamiento viscoso.

El tiempo de relajación se tomó como se especificó en la sección 2.15.4

3.3.5 FILTRADO API.

Se realizó la prueba de filtrado según las normas API 13-B1 (ver Apéndice E), para determinar la capacidad de filtrado de la formulación final seleccionada.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados, análisis y discusión de los resultados obtenidos en las pruebas reológicas y de filtrado realizadas a los fluidos evaluados, para cada una de las etapas en las que se dividió la parte experimental.

4.1 PRIMERA PARTE: LODO BASE SIN MICRO-ESFERAS.

Formulaciones Evaluadas:

Las formulaciones evaluadas en la primera etapa se muestran en la tabla 4-1, especificando la cantidad de cada uno de los aditivos utilizados y reportando la densidad teórica calculada mediante un balance de masa, para cada una de las formulaciones (ver Apéndice B).

Tabla 4-1: Formulaciones de los sistemas base evaluados en la primera parte.

Relación O/W	Agua gr	Aceite gr	KCL gr	Surfactante gr	MEA gr	Densidad Teórica (gr/cm ³)
70/30	85,00	200,00	0,5	20	1,36	0,8740
65/35	102,5	185,71	0,5	20	1,36	0,8830
60/40	120,0	171,43	0,5	20	1,36	0,8920
55/45	137,5	157,14	0,5	20	1,36	0,9010
50/50	155,0	142,86	0,5	20	1,36	0,9100

Propiedades reológicas:

En la tabla 4-2 se muestran los resultados de la evaluación del comportamiento reológico de las formulaciones de la primera etapa, con los viscosímetros Fann 35A y Haake.

Para reportar los valores de viscosidad plástica y punto cedente, representativos para los fluidos de perforación, se supuso que el comportamiento seguía el modelo de Bingham.

Tabla 4-2: Propiedades reológicas de los sistemas antes de envejecer.

Relación O/W	VP (mPa.s)		PC (Pa)		K (mPa.s ⁿ)	n	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
	Fann	Haake	Fann	Haake	Haake	Haake		
70/30	41	55,8	21,12	15,000	1,6920	0,5290	5,28	5,28
65/35	25	27,88	8,16	3,156	0,2596	0,6800	2,40	2,88
60/40	14	16,78	3,84	1,199	0,0920	0,7524	1,44	1,44
55/45	8	11,33	1,92	0,760	0,0661	0,7404	0,96	0,96
50/50	5	0,422	2,40	3,730	0,0181	0,8741	1,44	1,44

De los valores de n y K reportados en la tabla 4-2, se observa que n aumenta y K disminuye, lo que implica una disminución de la pseudoplasticidad del fluido a medida que aumentamos la fase continua y disminuimos la fase dispersa. Esto se debe a que la fase dispersa en la emulsión es la que produce la resistencia a fluir y si disminuimos esta fase se reduce la resistencia lo que se traduce en una disminución de la viscosidad del fluido. Si hay un aumento de la concentración de la fase continua, el fluido tiende a comportarse como un fluido homogéneo. El índice de fluidez aumenta, por lo que el lodo fluye más rápido. El índice de consistencia disminuye por lo que la viscosidad del fluido disminuye.

En la tabla 4-3 se muestran los resultados obtenidos para las formulaciones base después de la prueba de estabilidad térmica a 220F.

Tabla 4-3: Propiedades reológicas de los sistemas después de envejecer a 220°.

Relación O/W	Vp (mPa.s)		Pc (Pa)		K (mPa.s ⁿ)	n	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
	Fann	Haake	Fann	Haake	Haake	Haake		
70/30	38	63,47	23,52	19,790	2,8410	0,4752	7,20	7,20
65/35	28	37,33	11,04	5,419	0,5424	0,6176	2,88	2,88
60/40	16	18,39	2,88	1,693	0,0920	0,7524	1,92	1,92
55/45	9	11,49	2,40	0,868	0,0673	0,7434	1,44	1,44
50/50	6	7,740	1,44	0,543	0,0453	0,7415	0,96	0,96

La figura 4-1 muestra las curvas de flujo para los sistemas, antes y después de envejecer:

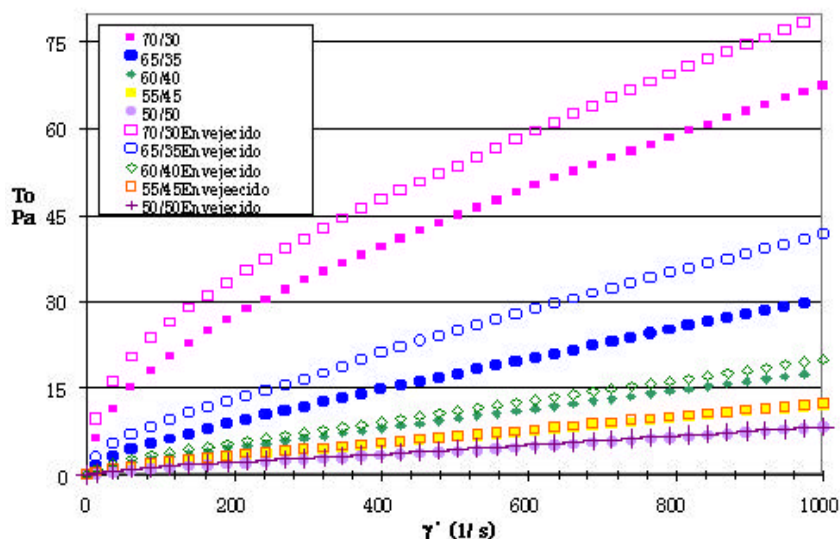


Figura 4-1: Curvas de flujo para las emulsiones base de la primera parte.

En esta gráfica se observa que los fluidos evaluados presentan un comportamiento pseudoplástico, ya que la pendiente de la curva, la cual es representativa de la viscosidad del fluido, disminuye con el aumento de la velocidad de deformación. El modelo que mejor se ajusta a estos fluidos es el de Ley de Potencia (modelo Otswald), por lo que se reportaron los índices de consistencias (K) y de fluidez (n).

Se comparan las emulsiones antes y después de envejecer y se observa un aumento del índice de consistencia y una disminución del índice de fluidez. Este cambio se observa en la pendiente de las curvas.

En resultados de las pruebas de envejecimiento, se observa un aumento tanto del índice de fluidez como del índice de consistencia, presentándose el mismo caso para cada una de las formulaciones evaluadas, por lo que la tendencia observada en las emulsiones antes de la

prueba de estabilidad térmica se sigue cumpliendo para las emulsiones después de envejecer.

4.2 SEGUNDA PARTE: LODO BASE + MICRO-ESFERAS DE VIDRIO.

En esta parte se evaluó el efecto de la concentración de micro-esferas de vidrio en el comportamiento reológico, partiendo de las formulaciones bases de la primera parte a las cuales se les sustituyó parte de la fase dispersa por micro-esferas.

Se escogieron cinco (5) formulaciones para cada emulsión base y se determinó la relación agua / aceite resultante para cada una de estas formulaciones, así como la densidad teórica de las mismas.

Formulaciones evaluadas:

La matriz resultante fue la siguiente:

Tabla 4-4: Formulaciones para evaluar el efecto de las micro-esferas.

Relación O/W	O/M/W	O/W	Agua (gr)	Aceite (gr)	Micro-esferas (gr)	Densidad Teórica (gr/cm ³)
70/30	55/15/30	64,7/35,3	85,0	157,14	19,95	0,8060
	50/20/30	62,5/37,5	85,0	142,86	26,60	0,7842
	45/25/30	60,0/40,0	85,0	128,57	33,25	0,7623
	40/30/30	57,1/42,9	85,0	114,29	39,90	0,7406
	30/40/30	50,0/50,0	85,0	85,785	53,20	0,6969
65/35	50/15/35	58,8/41,2	102,5	142,86	19,95	0,8152
	45/20/35	56,3/43,7	102,5	128,57	26,60	0,7933
	40/25/35	53,3/46,7	102,5	114,29	33,25	0,7715
	35/30/35	50,0/50,0	102,5	100,00	39,90	0,7497
	30/35/35	46,2/53,8	102,5	85,715	46,55	0,7279
60/40	55/05/40	57,9/42,1	120,0	157,14	6,650	0,8680
	50/10/40	55,6/44,4	120,0	142,86	13,30	0,8462
	45/15/40	52,9/47,1	120,0	128,57	19,95	0,8243

	40/20/40	50,0/50,0	120,0	114,29	26,60	0,8025
	30/30/40	42,9/57,1	120,0	85,715	39,90	0,7589
55/45	50/05/45	52,6/47,4	137,5	142,86	6,650	0,8772
	45/10/45	50,0/50,0	137,5	128,57	13,30	0,8553
	40/15/45	47,1/52,9	137,5	114,29	19,95	0,8335
	35/20/45	43,8/56,3	137,5	100,00	26,60	0,8117
	25/30/45	35,7/64,3	137,5	71,430	39,90	0,7681
50/50	45/05/50	47,4/52,6	155,0	128,57	6,650	0,8863
	40/10/50	44,4/55,6	155,0	114,29	13,30	0,8645
	35/15/50	41,2/58,8	155,0	100,00	19,95	0,8427
	30/20/50	37,5/62,5	155,0	85,715	26,60	0,8209
	25/25/50	33,3/67,3	155,0	71,730	33,25	0,7991

Se obtuvieron emulsiones con densidades desde 0,89 hasta 0,69 gr/cm³ (7,38 hasta 5,8 lpg).

Propiedades reológicas:

A cada una de estas formulaciones se le realizaron pruebas en los viscosímetros Fann35 y Haake, para evaluar el comportamiento reológico y graficar las curvas de flujos para analizar el efecto de la incorporación de las micro-esferas de vidrio en el sistema.

En la tabla 4-5 se reportan los valores de viscosidad plástica, punto cedente, lectura de esfuerzos a bajas tasas de corte y los geles a 10 segundos y a 10 minutos, obtenidos del Fann 35 y los índices de fluidez y de consistencia obtenidos en el Haake.

Tabla 4-5: Propiedades reológicas de las emulsiones con micro-esferas.

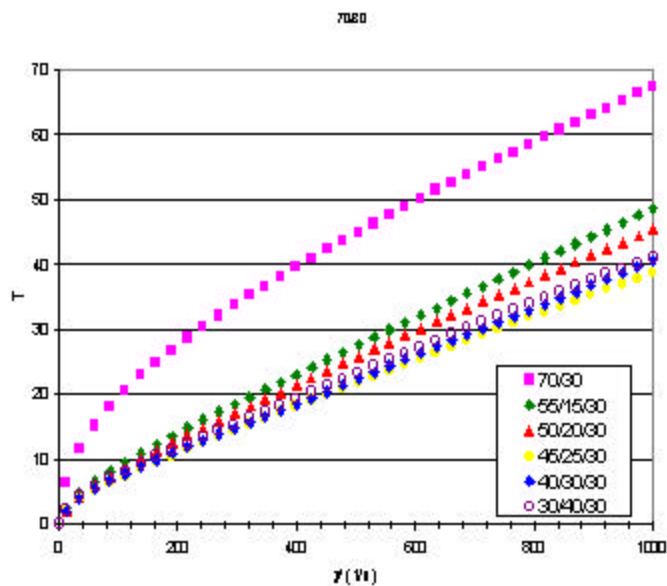
Relación O/M/W	L6 (Pa)	L3 (Pa)	VP (mPa.s)	PC (Pa)	K (mPa.s ⁿ)	n	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
55/15/30	2,40	1,92	36	8,64	0,3658	0,6982	2,40	2,88
50/20/30	2,40	1,92	34	6,72	0,3051	0,7161	1,92	2,40
45/25/30	2,40	1,92	34	7,20	0,2923	0,6964	1,92	1,92
40/30/30	2,88	2,40	33	6,72	0,3046	0,6949	2,40	2,40

30/40/30	4,32	3,84	45	8,16	0,3585	0,6933	3,36	3,36
50/15/35	1,92	1,44	19	4,32	0,1944	0,7123	1,92	1,92
45/20/35	1,92	1,44	20	3,36	0,1353	0,7403	1,92	1,92
40/25/35	1,44	0,96	18	2,88	0,1270	0,7369	1,44	1,44
35/30/35	3,36	2,88	13	9,60	0,1226	0,7396	3,36	4,32
30/35/35	1,92	1,44	26	3,84	0,1753	0,7306	1,92	2,40
55/05/40	1,92	1,44	17	3,84	0,1115	0,7127	1,92	1,92
50/10/40	1,92	1,44	14	2,88	0,0791	0,7852	1,92	1,92
45/15/40	1,44	1,44	12	1,92	0,0698	0,7618	1,44	1,92
40/20/40	1,92	1,44	16	4,32	0,1764	0,6790	1,92	1,92
30/30/40	1,44	0,96	15	2,40	0,2634	0,6654	1,44	1,44
50/05/45	1,44	1,44	8	1,92	0,04968	0,7674	1,44	1,44
45/10/45	1,44	0,96	8	1,92	0,03644	0,8133	1,44	1,44
40/15/45	1,44	0,96	8	1,44	0,02831	0,8429	1,44	1,44
35/20/45	1,44	0,96	11	3,84	0,04674	0,8082	1,44	1,44
25/30/45	2,88	2,40	21	15,84	0,07874	0,8320	2,88	2,88
45/05/50	0,96	0,96	5	1,44	0,03222	0,7790	1,44	1,44
40/10/50	0,96	0,96	5	1,44	0,01710	0,8769	0,96	0,96
35/15/50	0,96	0,96	6	0,96	0,01111	0,9384	0,96	0,96
30/20/50	0,96	0,96	6	0,96	0,04213	0,8193	0,96	0,96
25/25/50	1,44	0,96	5	1,92	0,05013	0,7999	1,44	1,44

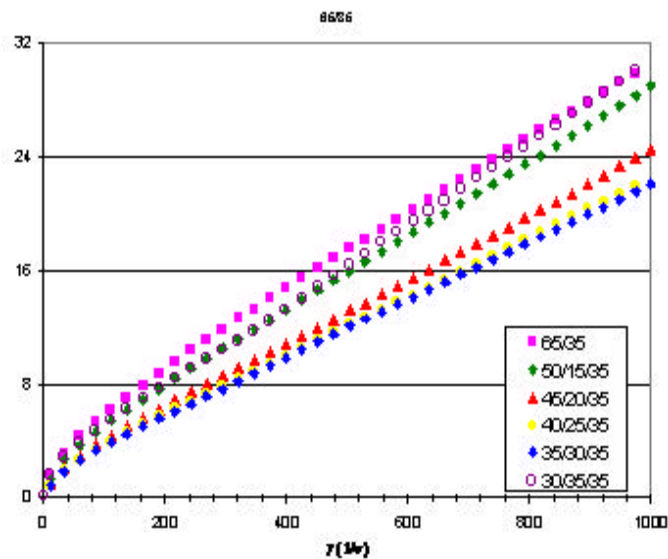
De los resultados reportados en la tabla 4-5, se observa que la viscosidad plástica disminuye al disminuir la fase dispersa, y aumenta cuando el porcentaje de micro-esferas excede el 20% en las formulaciones donde la fase continua es mayor al 40% (40,45 y 50%).

Para las formulaciones de fase continua 30 y 35% este efecto se produce con una concentración mayor de micro-esferas, por el orden del 35%. La capacidad de suspender ripios representada por el esfuerzo de corte medido a baja velocidad de corte (a 3 y 6 rpm), es mayor para las emulsiones con menor fase continua.

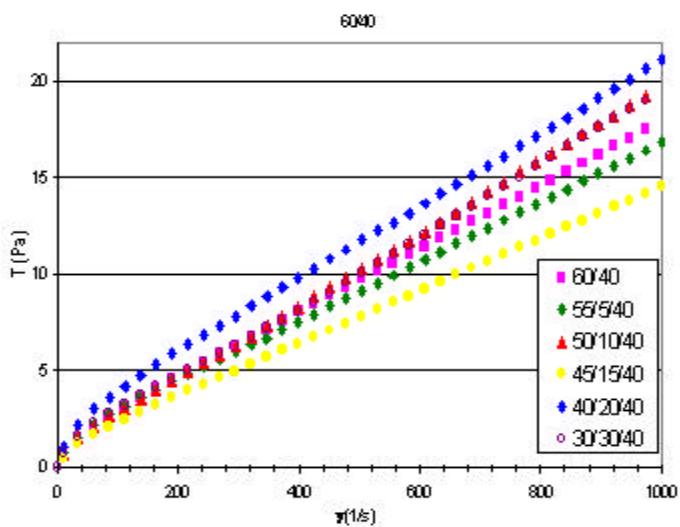
Con los datos obtenidos en el viscosímetro Haake, se realizaron curvas de esfuerzo de corte versus tasa de corte, para cada grupo de emulsiones, mostradas en las figuras 4-2.



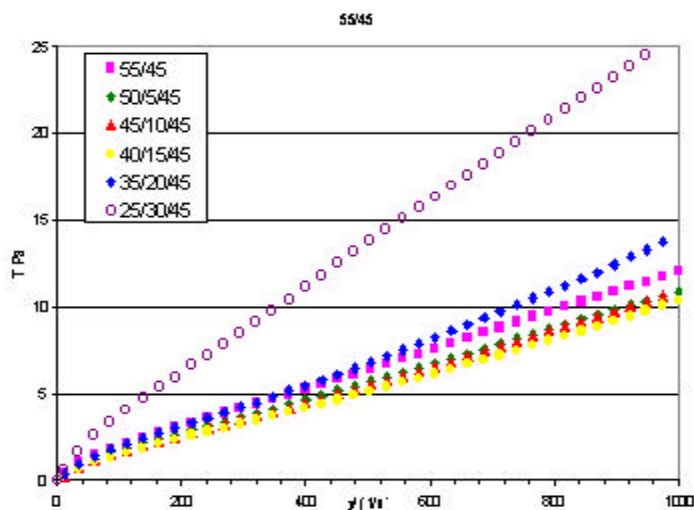
a)



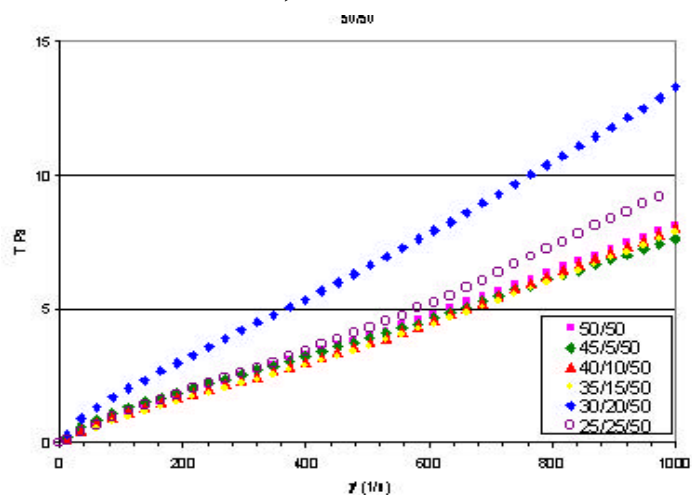
b)



c)



d)



e)

Figuras 4-2: Curvas de flujo para las emulsiones con micro-esferas de vidrio. a) Emulsiones con 30% de fase continua. b) Emulsiones con 35% de fase continua. c) Emulsiones con 40% de fase continua. d) Emulsiones con 45% de fase continua. e) Emulsiones con 50% de fase continua.

De las gráficas realizadas para cada grupo de emulsiones mostradas en las figuras 4-2, se observa la tendencia reportada por los índices de consistencia y de fluidez. Para las formulaciones con 30 y 35% de fase continua (figura 4-2 a) y b), respectivamente) y una concentración de micro-esferas menor al 35%, el índice de consistencia disminuye y el índice de fluidez aumenta al disminuir la fase dispersa de la emulsión. Cuando la concentración de micro-esferas excede el 35%, el índice de fluidez disminuye y el índice de consistencia aumenta, comportamiento que se observa con el cambio de pendiente de las curvas. Como en el caso de la figura 4-2 a), se tiene que la pendiente de las curvas va disminuyendo al disminuir la concentración de aceite (55/15/30, 50/20/30, 45/25/30), pero cuando la concentración de microesferas es mayor al 25% (40/30/30 y 35/35/30) la pendiente de las curvas aumenta. Para las formulaciones con 40, 45 y 50% de fase continua (figura 4-2 c), d) y e), respectivamente) se repite la tendencia descrita, pero a partir de una concentración de micro-esferas del 20%.

Las micro-esferas de vidrio actúan como sólidos dispersos en el fluido, por lo que cuando la concentración aumenta, la resistencia a fluir es mayor y su influencia va a depender de la relación agua /aceite con la que se está trabajando. Las emulsiones con micro-esferas de vidrio también tienen un comportamiento pseudo-plástico y el modelo reológico que mejor se ajusta a la curva es el de Ley de Potencia (modelo de Otswald), destacándose la disminución de la pendiente de las curvas a medida que aumenta la tasa de corte y la ausencia de esfuerzo de corte para una tasa de corte igual a cero.

Se realizaron pruebas de estabilidad térmica a 220F para estudiar los efectos de la temperatura en el comportamiento reológico de cada formulación y los resultados se muestran en la tabla 4-6

Tabla 4-6: Propiedades reológicas de los sistemas con micro-esferas de vidrio después de envejecer a 220F.

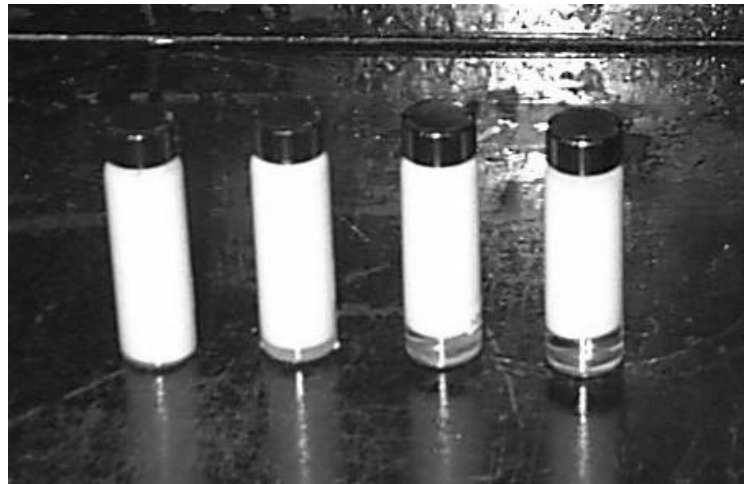
Relación O/M/W	L6 (Pa)	L3 (Pa)	VP (mPa.s)	PC (Pa)	K (mPa.s ⁿ)	n	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
55/15/30	3,36	2,40	35	9,60	0,3909	0,6822	2,40	2,40
50/20/30	1,92	1,44	30	4,32	0,1699	0,7306	1,92	1,92
45/25/30	2,88	2,40	41	5,76	0,3091	0,7062	2,40	2,40
40/30/30	4,80	4,32	36	12,0	0,2836	0,7066	2,40	2,88
30/40/30	3,84	2,88	45	8,16	0,2985	0,6998	3,36	3,36
50/15/35	3,84	3,36	22	4,32	0,1376	0,7462	1,92	1,92
45/20/35	3,36	2,40	15	9,12	0,2104	0,7188	1,92	1,92
40/25/35	3,36	2,40	23	3,84	0,2599	0,7240	1,92	1,92
35/30/35	0,96	0,96	17	2,40	0,4250	0,7182	1,44	1,92
30/35/35	2,88	1,92	28	6,72	0,4256	0,7079	1,92	2,88
55/05/40	1,92	1,44	14	3,84	0,1109	0,7322	1,92	1,92
50/10/40	1,92	1,44	15	2,40	0,0943	0,7500	1,92	2,40
45/15/40	1,44	1,44	12	1,92	0,0298	0,8904	1,44	1,44
40/20/40	1,92	1,44	18	4,32	0,1262	0,7050	1,92	1,92
30/30/40	1,44	0,96	11	2,40	0,1296	0,7070	1,92	1,92
50/05/45	1,44	0,96	9	1,92	0,08678	0,7163	1,44	1,92
45/10/45	1,44	0,96	10	1,44	0,08560	0,7292	1,44	1,44
40/15/45	1,44	0,96	11	1,92	0,03729	0,8939	1,92	1,92
35/20/45	1,44	1,44	18	3,84	0,16400	0,7257	1,44	1,44
25/30/45	2,88	1,92	32	12,0	0,16894	0,7339	1,44	1,44
45/05/50	*	*	*	*	*	*	*	*
40/10/50	1,92	1,44	6	1,44	0,0171	0,8769	1,44	1,44
35/15/50	*	*	*	*	*	*	*	*
30/20/50	0,96	0,96	6	0,96	0,05828	0,7092	0,96	0,96
25/25/50	1,44	0,96	5	1,92	0,05836	0,7198	1,44	1,44

* La emulsión se separó en un 80%, por lo que no se evaluó.

De los resultados de la prueba de estabilidad térmica reportados en la tabla 4-6, se destaca que las emulsiones con 50% de fase continua fueron las más inestables. En todas las emulsiones se evaluó el porcentaje de separación de fase continua y dispersa, así como la flotabilidad de las micro-esferas. Esta evaluación se realizó dejando una muestra de 10cm³ en reposo, por un tiempo de 24 horas. También se evaluó mediante el control

del diámetro de gota y estos resultados están en el Anexo1. Las emulsiones más estables fueron las de fase continua 30 y 35%. El porcentaje de separación para las emulsiones inestables varió desde un 5 hasta un 30%. En la figura 4-3, se muestran diferentes porcentajes de separación. La muestra número 1 resultó ser 100% estable. La muestra número 2 se separó un 5%, la muestra 3 un 15% y la muestra 4 un 20%.

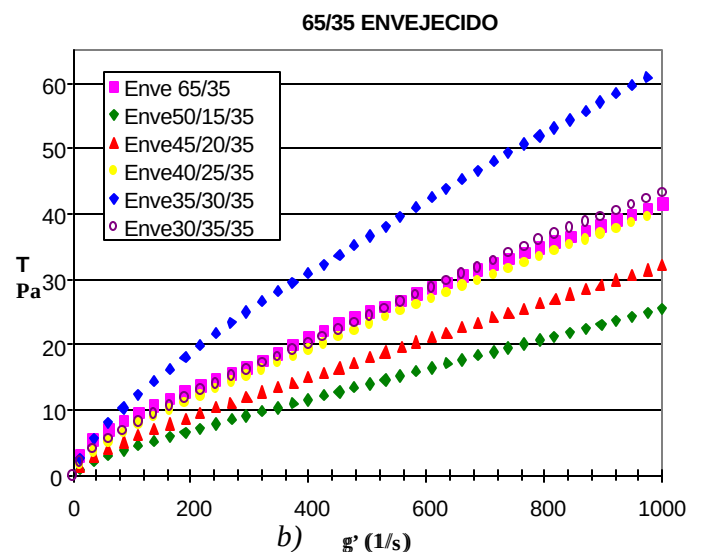
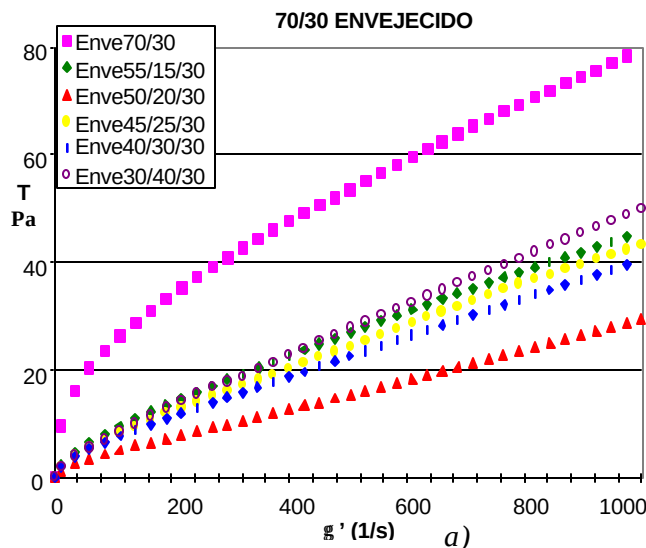
**0 % →
Separación**

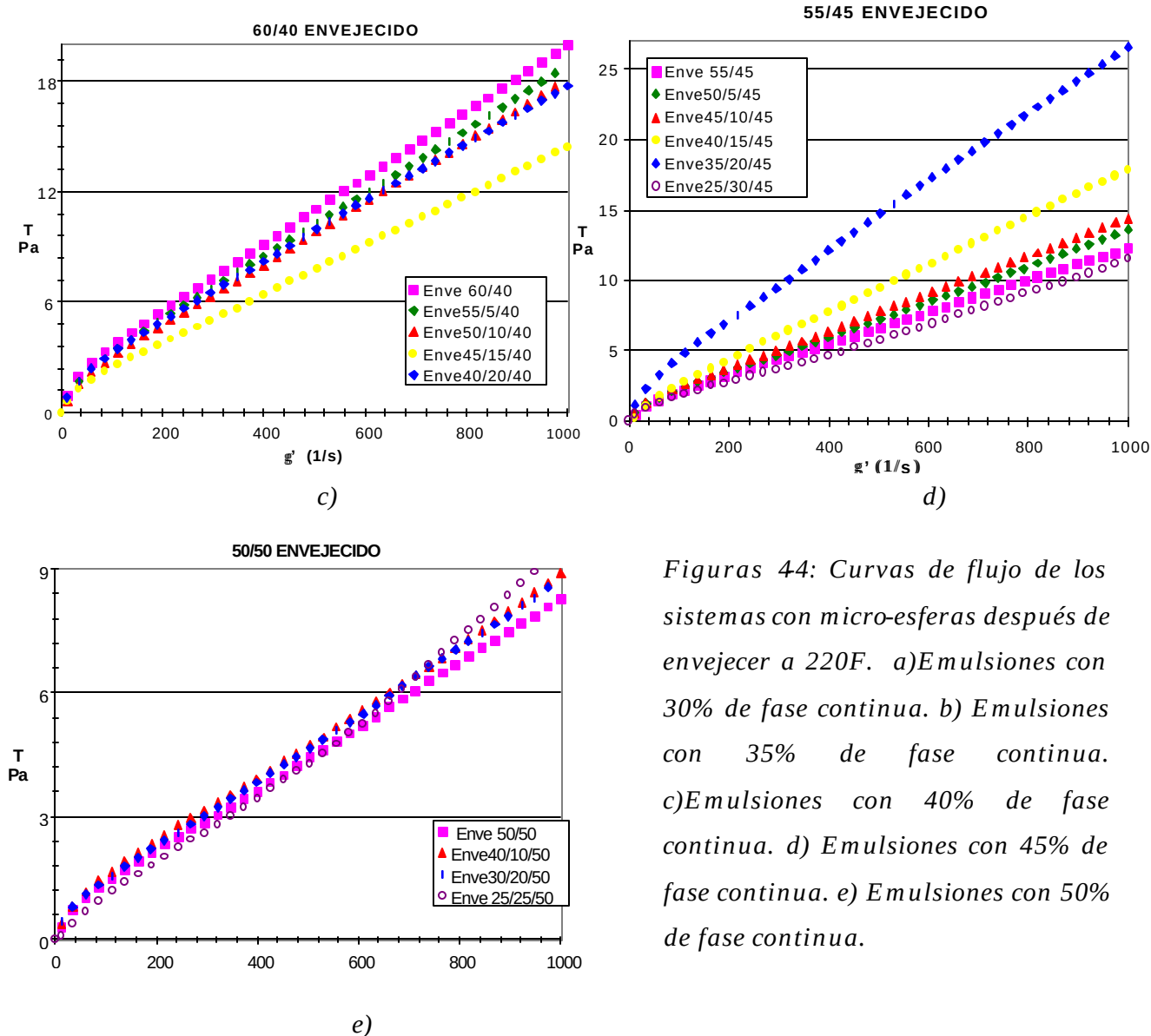


**← 20 %
Separación**

Figura 4-3: Diferentes porcentajes de separación de emulsión.

Se realizaron curvas de flujo para las emulsiones de la segunda parte, después de envejecer a 220F y estas se muestran en las figuras 4-4.





Figuras 44: Curvas de flujo de los sistemas con micro-esferas después de envejecer a 220F. a) Emulsiones con 30% de fase continua. b) Emulsiones con 35% de fase continua. c) Emulsiones con 40% de fase continua. d) Emulsiones con 45% de fase continua. e) Emulsiones con 50% de fase continua.

4.3 TERCERA PARTE: LODOS CON MICRO-ESFERAS Y POLÍMEROS.

Formulaciones evaluadas:

Las formulaciones escogidas para esta parte del sistema deben cumplir con la condición de tener una densidad menor o igual a $0,78 \text{ gr/cm}^3$ (6,5 lpg) y una viscosidad plástica menor a 35 mPa.s (cp) para que al incorporar el polímero no se obtengan viscosidades muy altas. También se

tomó como requisito que las emulsiones hubiesen resultado estables después de la prueba de envejecimiento.

Las formulaciones fueron las siguientes:



50/20/30
40/30/30
45/20/35
30/35/35
35/25/40
30/25/45

Con la incorporación del polímero se busca modificar las propiedades reológicas, principalmente el comportamiento elástico y viscoso de cada emulsión. Inicialmente se trabajó con el Polímero1 el cual es ampliamente utilizado en campo como viscosificante. La concentración del polímero fue diferente para cada una de las formulaciones, ya que para las emulsiones de baja viscosidad plástica se utilizó una cantidad mayor.

La viscosidad plástica debería estar en un intervalo de 30 – 45 mPas, después de la prueba de envejecimiento para mantener las esferas de vidrio dispersas en el sistema. Las emulsiones con su respectiva concentración de polímero se muestra en la tabla 4-7.

Tabla 4-7: Formulaciones de los sistemas con Polímero1.

Relación O/M/W	Relación O/W	Polímero1 (gr)	Densidad (gr/cm ³)
50/20/30	62,5/37,5	0,10	0,78420
40/30/30	57,1/42,9	0,15	0,74053
45/20/35	56,3/43,7	0,30	0,79335
30/35/35	46,2/53,8	0,35	0,72790
35/25/40	46,7/53,3	0,40	0,78072
30/25/45	40,0/60,0	0,60	0,78990

Propiedades reológicas:

De la evaluación de las propiedades reológicas de cada formulación con Polímero1, se obtuvo un incremento tanto de la viscosidad plástica como del punto cedente, además de la resistencia de gel, la cual tuvo cambios significativos si comparamos con los resultados obtenidos para las emulsiones sin polímero.

Los resultados de la evaluación del comportamiento reológico se reportan en la tabla 4-8.

Tabla 4-8: Propiedades reológicas de los sistemas con Polímero1.

Relación O/M/W	L6 (Pa)	L3 (Pa)	VP (mPa.s)	PC (Pa)	K (mPa.s ⁿ)	n	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
50/20/30	5,76	4,80	51	14,88	0,4237	0,7320	4,32	4,80
40/30/30	5,28	4,32	59	13,92	0,6341	0,6971	3,84	4,32
45/20/35	5,76	4,80	56	13,92	0,7090	0,6545	4,32	4,80
30/35/35	4,80	3,84	60	11,52	0,5094	0,6891	3,84	4,32
35/25/40	5,28	4,32	51	12,96	0,6593	0,6405	3,84	4,32
30/25/45	6,72	5,28	57	16,32	1,1103	0,5774	5,28	6,24

Las emulsiones con polímero presentaron valores de viscosidad plástica en un intervalo de 51-60 mPa.s (cp), y punto cedente de 11,5 – 16,3 Pa.

La emulsión 30/25/45 reportó altas lecturas de esfuerzo cedente, a baja velocidad de corte, lo cual es indicativo de una alta capacidad para suspender ripios.

Con la data obtenido en el viscosímetro Haake, se realizaron curvas de fluidez para observar la influencia del polímero en el comportamiento reológico de cada una de las formulaciones seleccionadas, especialmente en la influencia en los índices de consistencia y fluidez.

Estas curvas se muestran en la figura 4-5.

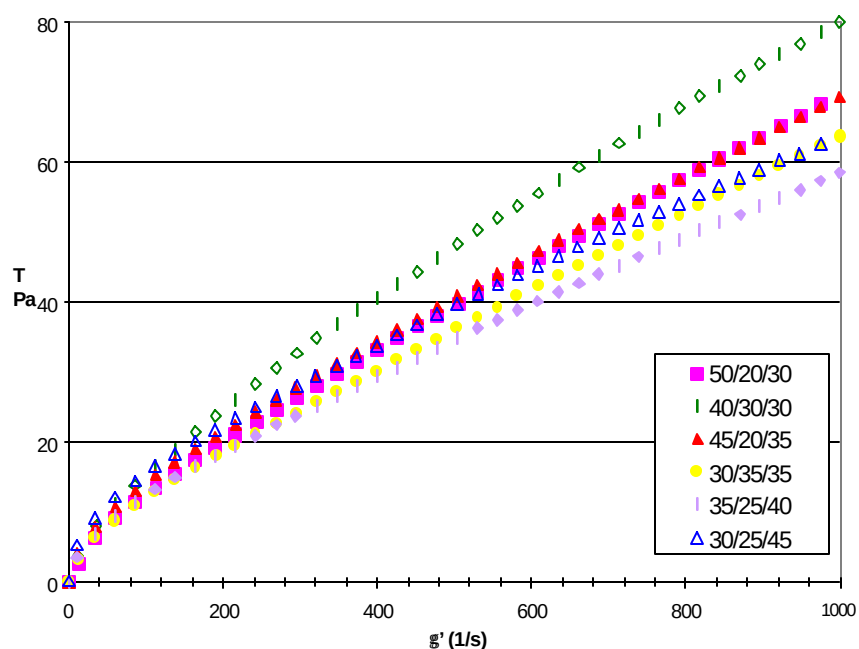


Figura 4-5: Curvas de flujo para las emulsiones con Polímero1.

De la figura 4-5 se observa un incremento del índice de consistencia y una disminución del índice de fluidez cuando la cantidad de polímero es mayor, significando esto que el fluido ofrece mayor resistencia a fluir. También se observa un aumento del esfuerzo de corte a bajas velocidades de deformación, es decir se requiere aplicar una mayor fuerza para hacer fluir al lodo. Este comportamiento fue más significativo en las formulaciones con mayor cantidad de polímero (la emulsión 35/25/40 y la 30/25/45).

El modelo que mejor se ajusta a estas curvas es el de Herschel-Bulkley (Ley de Potencia Modificada), y esto es debido a que el fluido presenta un comportamiento plástico a bajas velocidades de corte y un comportamiento pseudoplástico para altas velocidades de corte.

Se realizó la prueba de envejecimiento para evaluar la estabilidad térmica del fluido. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4-9.

Tabla 4-9: Propiedades reológicas de los sistemas con Polímero1, después de envejecer a 220F.

Relación O/M/W	L6 (Pa)	L3 (Pa)	VP (mPa.s)	PC (Pa)	Gel 10 s (Pa)	Gel 10 m (Pa)
50/20/30	4,80	3,84	45	13,44	3,84	3,84
40/30/30	3,36	2,88	47	8,640	2,88	4,32
45/20/35	3,84	3,36	39	10,56	2,88	3,36
30/35/35	3,36	2,40	32	9,600	2,40	2,88
35/25/40	2,40	1,92	28	6,240	1,92	2,40
30/25/45	2,40	1,92	29	6,720	1,92	2,40

Después de la prueba de estabilidad térmica, los valores de viscosidad plástica y punto cedente disminuyeron, lo que nos indica que el polímero utilizado no es estable a la temperatura de trabajo. Esto puede ser debido a una degradación por temperatura.

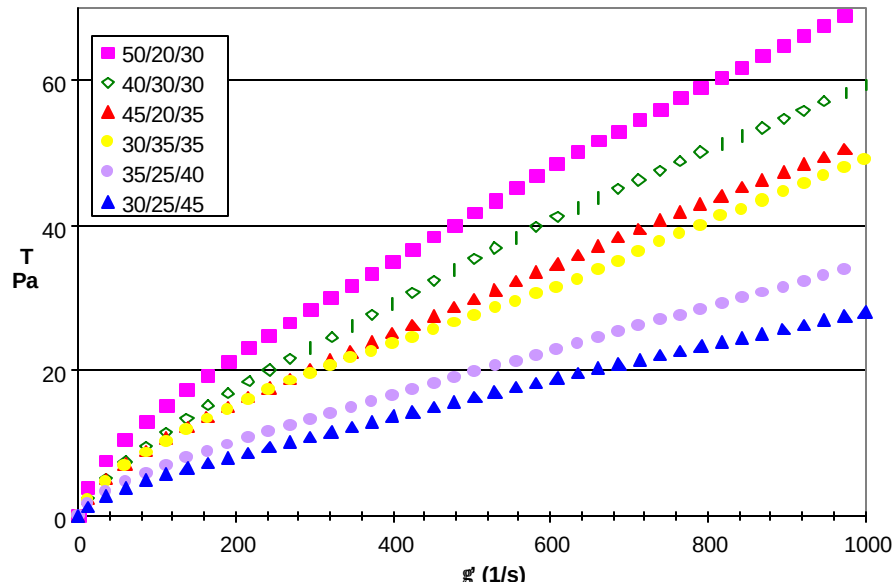
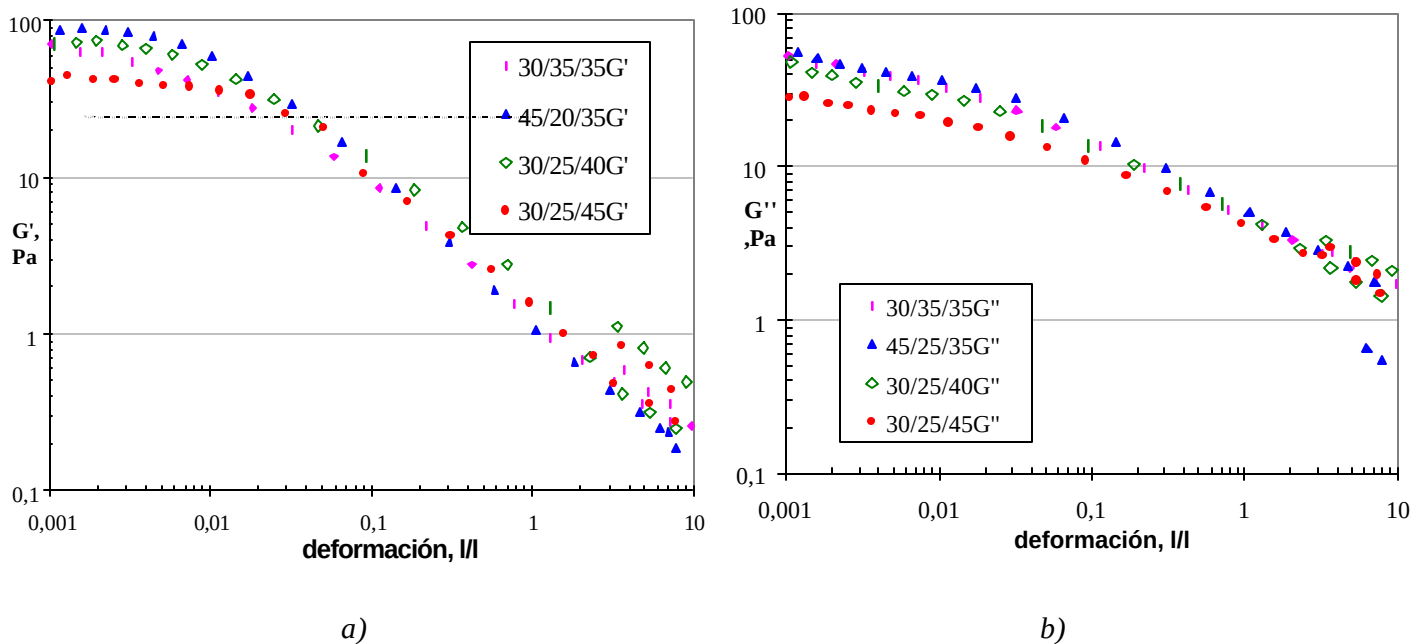


Figura 4-6: Curvas de flujo para los sistemas con Polímero1, después de envejecer a 220F.

Comportamiento Viscoelástico:

Para evaluar el comportamiento viscoelástico de cada una de las emulsiones se realizaron pruebas dinámicas. El comportamiento que se busca es un amplio intervalo de viscoelasticidad lineal, un alto valor de h_0 y un módulo elástico mayor al módulo viscoso. Esta evaluación se realizó utilizando el modelo sencillo de Maxwell. En la figura 4-7 se muestra el resultado de la prueba de barrido de esfuerzo para determinar el intervalo de viscoelasticidad lineal.



Figuras 4-7: Prueba de barrido de esfuerzo. Módulos dinámicos vs. deformación.

a) Módulo elástico G' . b) Módulo viscoso G'' .

De la figura 4-7 a) se observa que en cada formulación el módulo elástico es lineal para muy pequeñas deformaciones y en la figura 4-7 b) se destaca que el módulo viscoso no presenta linealidad. El mayor intervalo viscoelástico lo presentó la emulsión de relación O/W= 40/60 con 25% de micro-esferas (30/25/45). Aproximadamente, G' está por el orden de 38 Pa.

Resultado que se esperaba ya que es la formulación con mayor concentración de polímero.

Con una mayor concentración de polímero se obtiene una estructura capaz de soportar mayores niveles de esfuerzo de corte. Esta concentración influye en la elasticidad del fluido, incrementando la resistencia a la deformación.

Con esta formulación se procedió a evaluar el comportamiento de los cinco (5) polímeros adicionales, descritos en la sección 3.2.1, utilizando la misma concentración de Polímero1 y tomando como base los resultados obtenidos con el mismo.

Tabla 4-10: Formulación seleccionada para evaluar los cinco (5) polímeros restantes.

O/M/W	O/W	Agua (gr)	Aceite (gr)	Micro-esferas (gr)	Concentración de polímero (gr)	Densidad Teórica (gr/cm ³)
30/25/45	40/60	135	85,785	33,25	0,6	0,7887

Se evaluaron las propiedades reológicas de la emulsión 30/25/45 con los diferentes polímeros (a una misma concentración) y los resultados se muestran en la tabla 4-11.

Tabla 4-11: Propiedades reológicas del sistema con diferentes polímeros.

Polímero	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	PC (Pa)	K (mPa.s ⁿ)	n	Gel 10 s (Pa)	Gel 10 m (Pa)
Polímero 1	6,72	5,28	57	16,32	1,1103	0,5774	5,28	6,24
Polímero 2	6,72	5,76	54	16,32	0,9760	0,6278	5,76	7,68
Polímero 3	6,72	5,76	55	16,80	1,9886	0,5477	5,76	6,72
Polímero 4	7,20	5,28	37	38,40	0,4399	0,6550	4,32	9,60
Polímero 5	7,20	5,28	94	24,00	0,8571	0,6494	5,28	6,24
Polímero 6	3,36	1,92	91	24,48	1,3903	0,6283	1,92	1,92

Los polímeros 2 y 3 modificaron las propiedades reológicas del fluido de manera similar que el polímero1, tomado como base. Los polímeros 5 y 6 excedieron los valores límites de viscosidad plástica y punto cedente y el polímero 3 presentó un comportamiento reológico invertido, es decir el valor de viscosidad plástica reportado es menor que el punto cedente.

Las curvas de flujo se muestran en la figura 4-8.

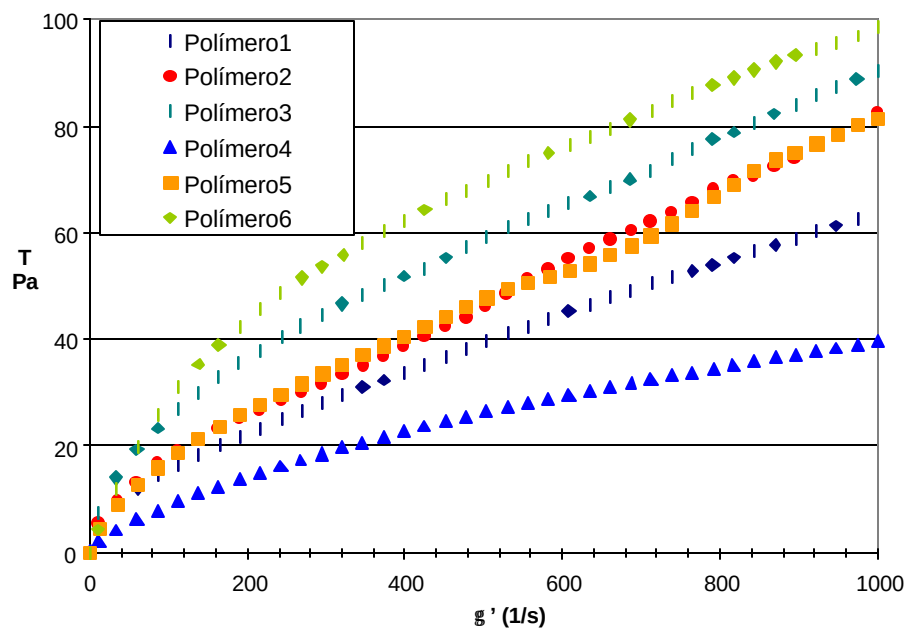
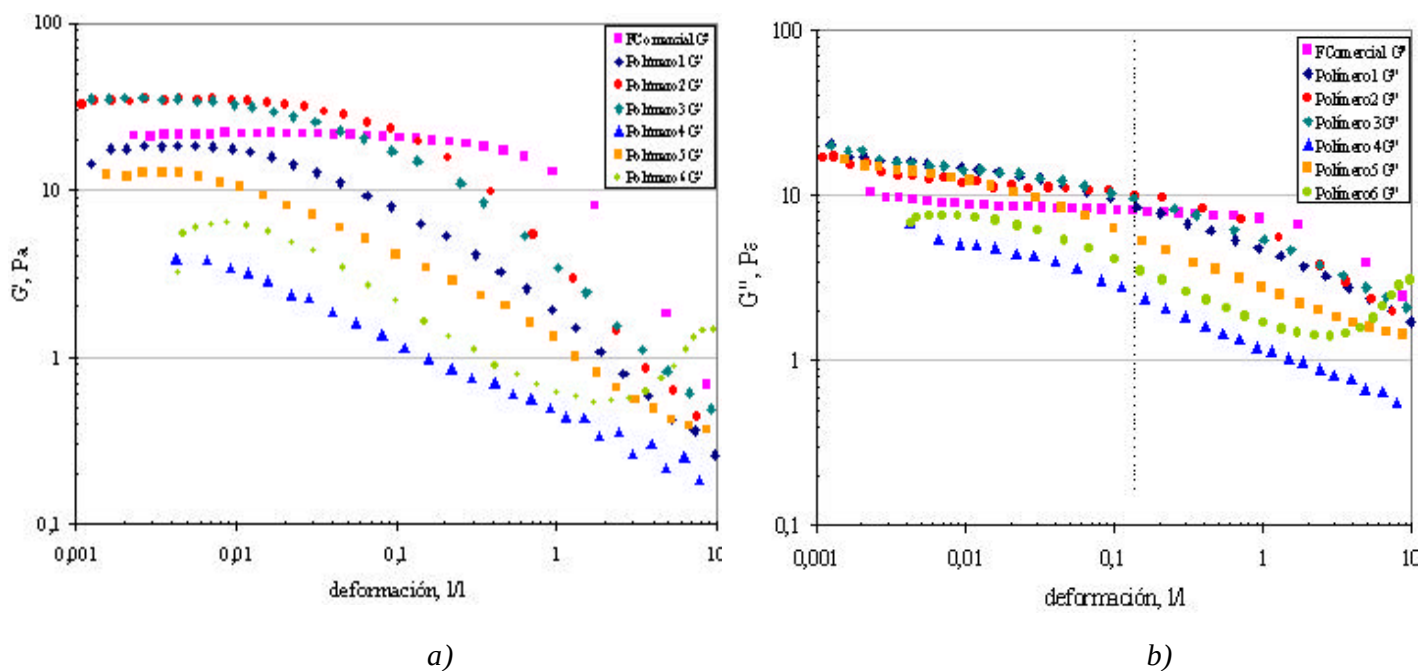


Figura 4-8: Curvas de flujo para la emulsión 30/25/45 con diferentes polímeros.

De la figura 4-8 se observa que las emulsiones con los polímeros 2, 3, 5 y 6 presentan altos valores de esfuerzo a baja velocidad de corte. El mejor modelo que se ajusta a estas curvas es el modelo de Herschel-Bulkley, a excepción del polímero 4, que presentó bajos valores de esfuerzo a bajas tasas de corte.

Se realizaron pruebas dinámicas para evaluar el comportamiento viscoelástico y los resultados se observan en las figuras 4-9.

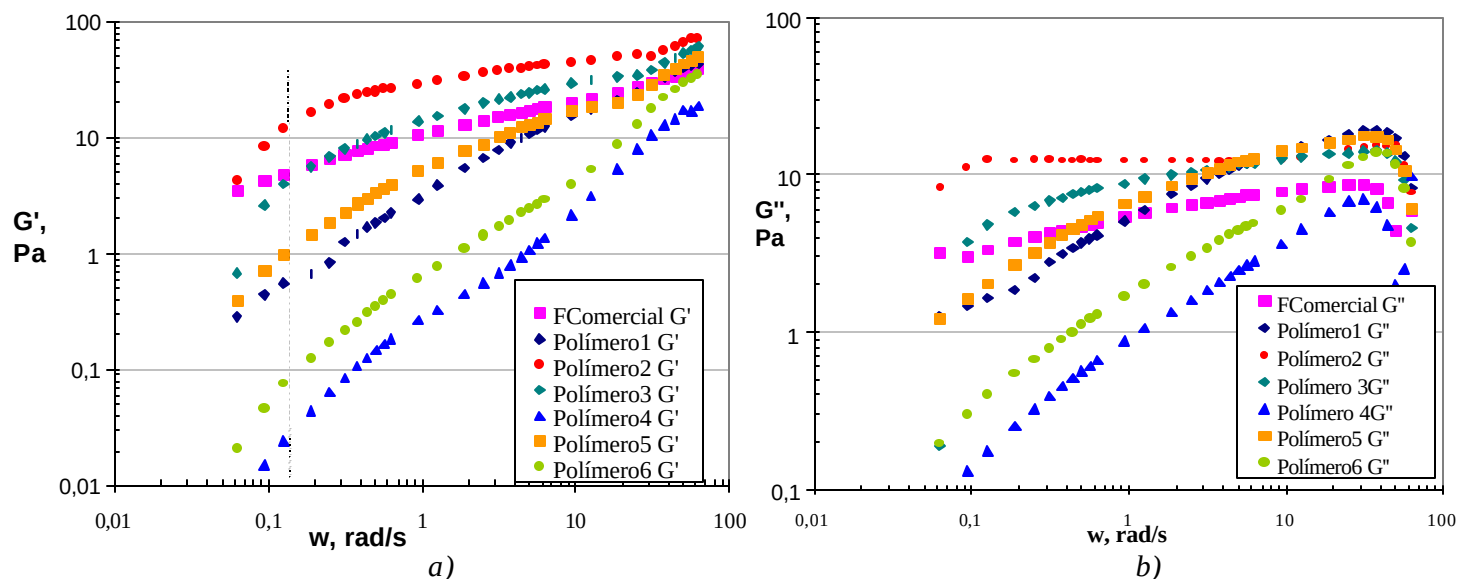


Figuras 4-9: Módulos dinámicos vs. deformación.

a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso.

De la figura 4-9a) se observa el comportamiento elástico según la deformación, presentando mayor linealidad los polímeros 2 y 3. El intervalo de viscoelasticidad es mayor que el obtenido con el Polímero 1, lo que nos indica que la emulsión con estos polímeros es capaz de soportar mayores esfuerzos, es decir, requiere de esfuerzos mayores que el polímero 1 para deformarse. Se comparan los resultados obtenidos con un fluido comercial altamente elástico, que presenta un intervalo de viscoelasticidad lineal bastante amplio.

Se realizaron pruebas de barrido de frecuencia para determinar si la emulsión con el polímero presenta un comportamiento más elástico que viscoso o viceversa, además de determinar el η_0 (Pa.s) que se refiere a la viscosidad aparente medida a una baja frecuencia y el índice de fluidez n . Los resultados de esta prueba se observan en las figuras 4-10 y en la figura 4-11.



Figuras 4-10: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia.

a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso

De las figuras 4-10, se tiene que el fluido comercial con el cual se comparan los resultados obtenidos de las pruebas oscilatorias es altamente elástico, mostrando que la componente G' es mayor que la componente G'' . Los sistemas con los polímeros 2 y 3 reportan un módulo elástico mayor al del fluido comercial, mientras que los polímeros 4 y 6 están por debajo.

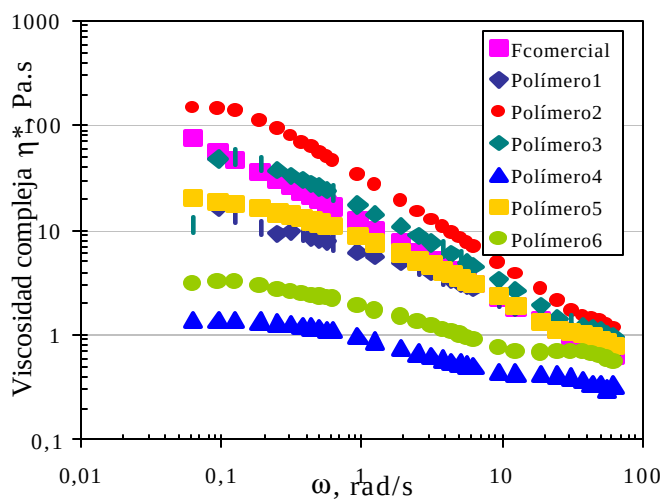


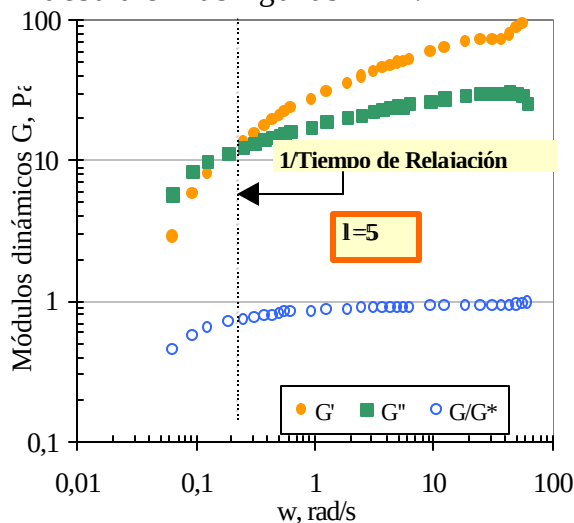
Figura 4-11: Viscosidad compleja en función de la frecuencia.

De la figura 4-11, se toma el valor de η_0 para una deformación de 0,06 rad/s, ya que por definición $h_0 = \lim_{w \rightarrow 0} h^*(w)$, estos valores se reportan en la tabla 4-12 con los índices de fluidez de cada sistema evaluado.

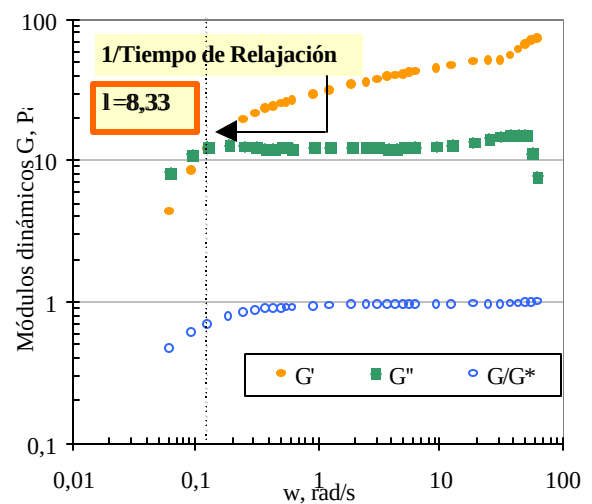
Tabla 4-12: Viscosidad a baja frecuencia e índice de fluidez.

Fluido	η_0 (Pa.s)	n
Fluido Comercial	100	0,2944
Polímero 1	20	0,5339
Polímero 2	140	0,2207
Polímero 3	10	0,3931
Polímero 4	1,5	0,7523
Polímero 5	20	0,4815
Polímero 6	4	0,7141

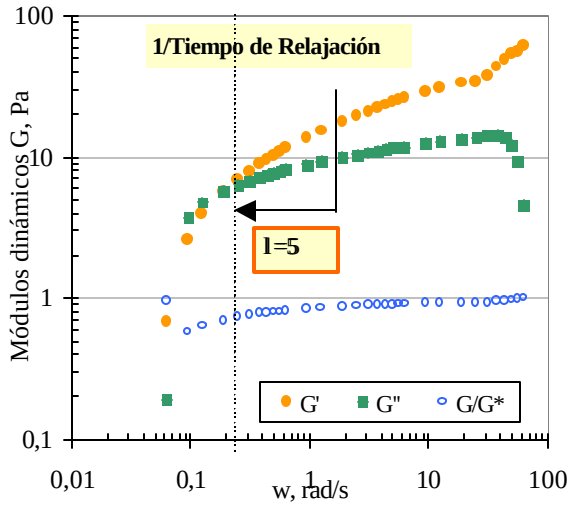
La viscosidad compleja más alta reportada a una frecuencia de 0,06 rad/s es la del sistema con el Polímero2, la cual es de aproximadamente 140 Pa.s y es mayor que la del Fluido Comercial utilizado como referencia, lo cual es indicativo de la capacidad del fluido de suspender ripios a bajas tasas de corte. Para determinar el tiempo de relajación se graficaron los módulos elásticos y viscosos para cada sistema por separado, y esto se muestra en las figuras 4-12.



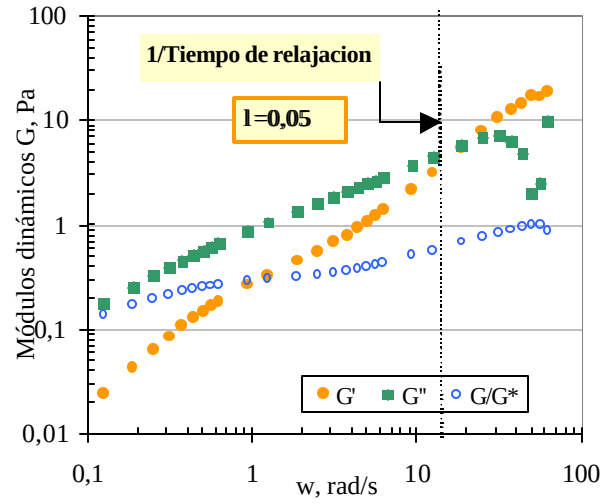
a) Sistema con Polímero1.



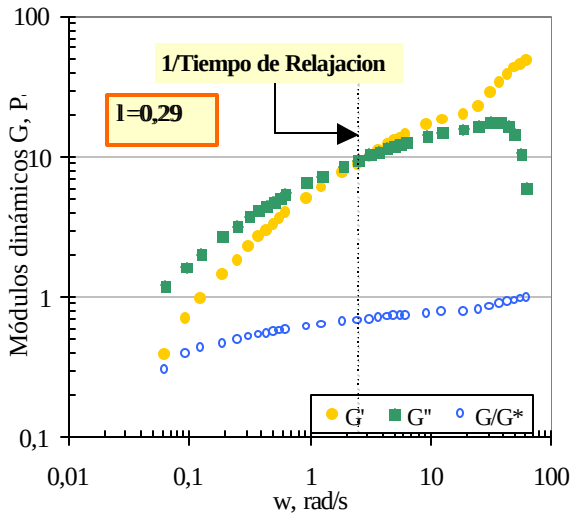
b) Sistema con Polímero2.



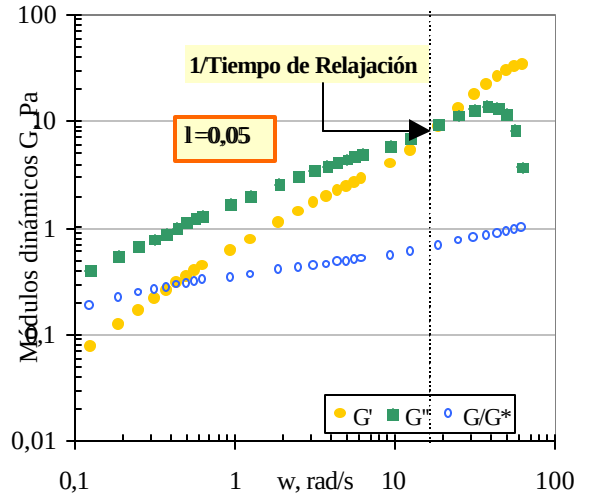
c) Sistema con Polímero3.



d) Sistema con Polímero4



e) Sistema con Polímero5.



f) Sistema con Polímero6

Figuras 4-12: Módulos dinámicos vs. frecuencia para los sistemas con polímeros.

De las figuras 4-12 se determinó el tiempo de relajación para cada emulsión con un polímero diferente. Se destaca que la emulsión presenta un módulo elástico mayor al módulo viscoso con los polímero 1, 2 y 3 (ver figura 4-12 a), b) y c)). El tiempo de relajación se calculó como el inverso de la frecuencia en la que se igualan la componente viscosa y la elástica $G' =$

G'' (como se explica en la sección 2.15.4). Los resultados de estos tiempos se muestran en la tabla 4-13.

Tabla 4-13: Tiempos de relajación para la emulsión 30/25/45 con diferentes polímeros.

Tipo de Polímero	λ (s)
Polímero1	5,00
Polímero2	8,33
Polímero3	5,00
Polímero4	0,05
Polímero5	0,29
Polímero6	0,05

El mayor tiempo de relajación lo reporta la emulsión con el polímero 2, seguida de la emulsión con el polímero 3, lo cual es indicativo de una mayor elasticidad del sistema con estos dos polímeros, en comparación con los polímeros restantes. Para determinar la relación entre elasticidad y viscosidad se grafica en la figura 4-13, la relación G'/G^* en función de la frecuencia, si este cociente es mayor que $1/\sqrt{2} \approx 0,701$, valor que corresponde al punto de cruzamiento es indicativo de una gran elasticidad, ya que se puede demostrar que en este punto $G^* = \sqrt{2} \cdot G'$ o $G'/G^* = 1/\sqrt{2}$.

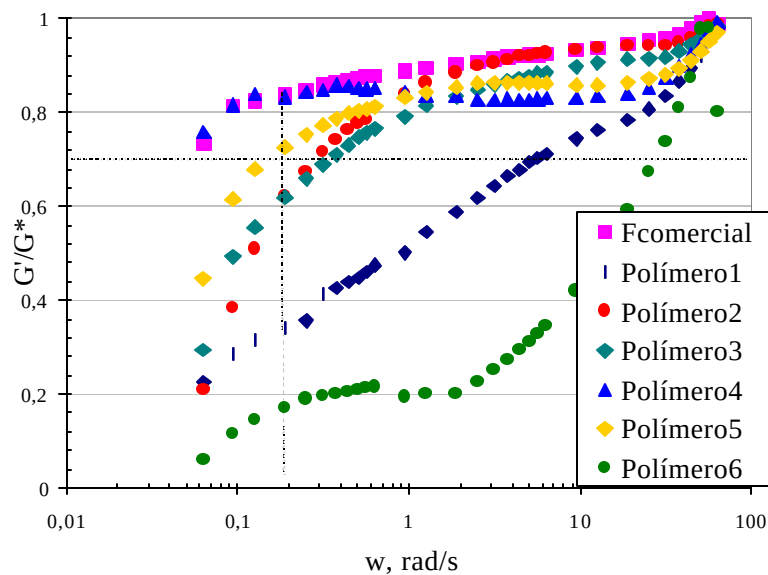
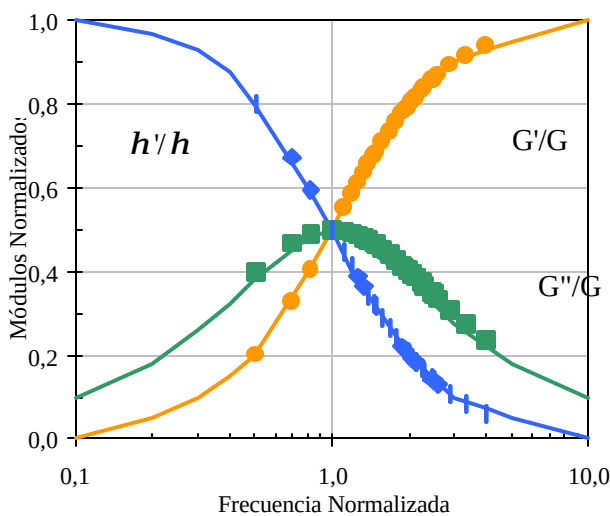


Figura 4-13: Relación G'/G^* para los sistemas con polímero.

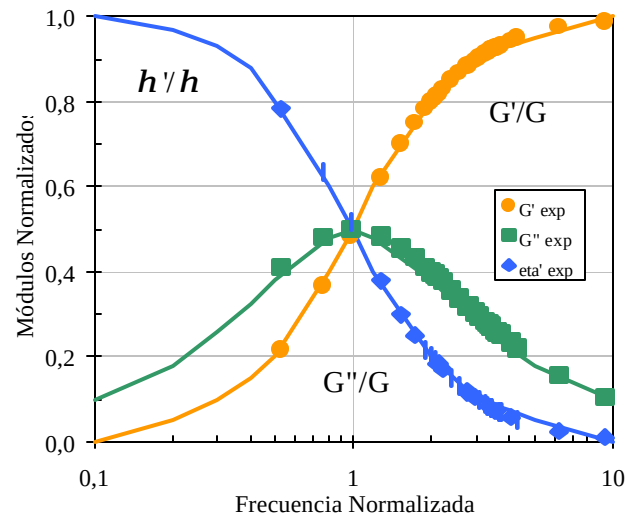
Se destaca que la relación $\frac{G'}{G^*}$, para los sistemas con los polímeros 1 y 6, está por debajo de 0,701 en casi todo el intervalo de medición, los que nos indica que el sistema presenta un comportamiento más viscoso que elástico. El polímero 4 presentó un cociente mayor a 0,701 en casi todo el rango de medición, pero se observa una ligera caída después de 1 rad/s. Los sistemas con los polímeros 2, 3 y 5 muestran un comportamiento más viscoso a bajas frecuencias y a partir de 0,3 rad/s, aproximadamente, el comportamiento es más elástico.

Para mostrar los resultados de la prueba oscilatoria de forma convencional se realizaron gráficas en términos de viscosidad dinámica normalizada y los módulos dinámicos normalizados en función de la frecuencia normalizada, para el caso de un modelo sencillo de Maxwell. (Jin, L., 1994)

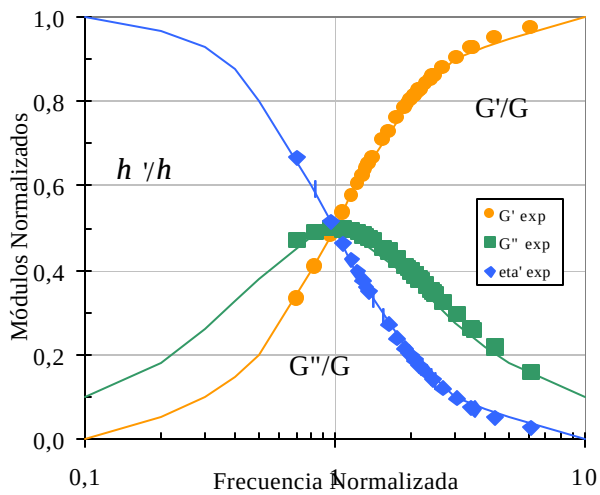
Los resultados de esta prueba para cada sistema, se muestran en las figuras 4-14.



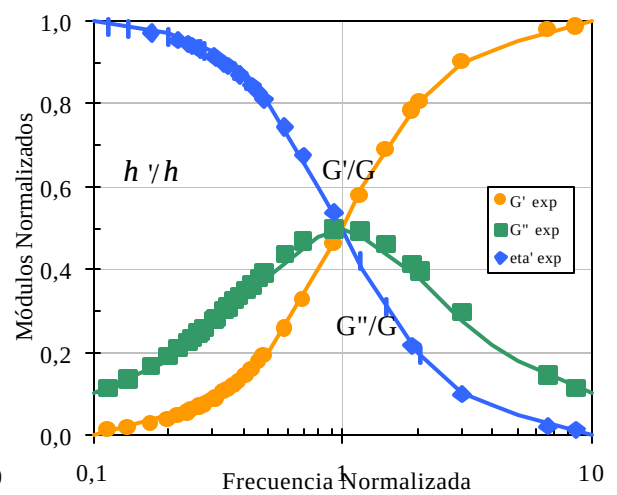
a) Sistema con Polímero 1.



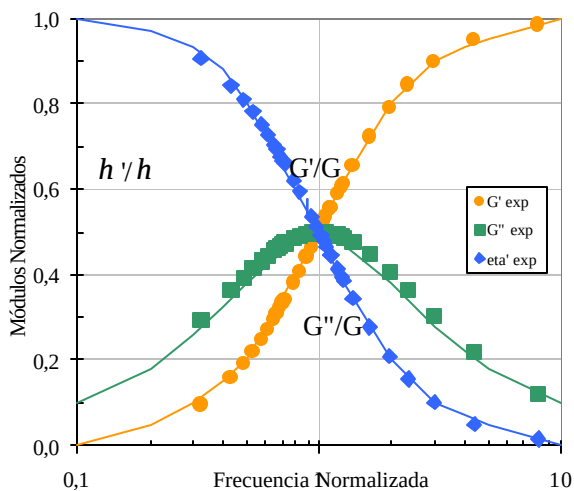
b) Sistema con Polímero 2



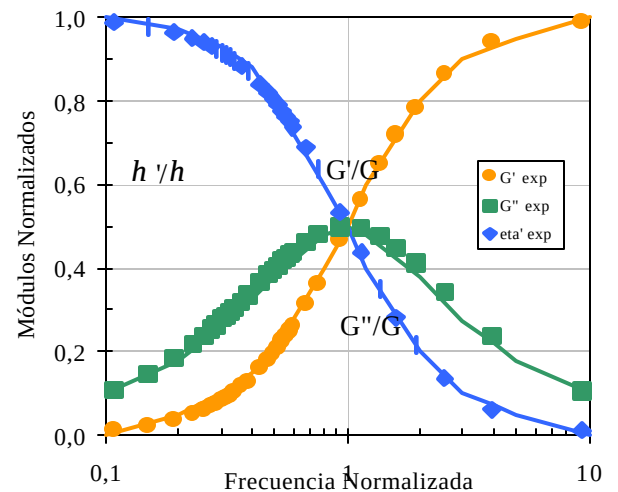
c) Sistema con Polímero3.



d) Sistema con Polímero4



e) Sistema con Polímero5.



f) Sistema con Polímero6

Figuras 4-14: Prueba dinámica para los sistemas con diferentes polímeros.

De las figuras 4-14, se obtiene que el Polímero2 es el que presenta un mayor grado de elasticidad en comparación con los cinco polímeros restantes, ya que la densidad de los puntos experimentales es mayor, y estos se encuentran ubicados del lado derecho del punto de cruzamiento, en donde el comportamiento del fluido que predomina es el elástico. El

Polímero1 y 3, presentan un comportamiento bastante similar, reportando también alta elasticidad, pero la densidad de los puntos experimentales es menor si lo comparamos con el Polímero2. Los Polímeros 4 y 6 presentan un comportamiento más viscoso que elástico, ya que la mayoría de los puntos experimentales se encuentran en el lado izquierdo de la curva, además que el grado de densidad del lado derecho de la curva (zona elástica) es muy poco.

Se realizaron pruebas de estabilidad térmica a 220 F por dieciséis (16) horas y se compararon con los resultados obtenidos por el Polímero1 y se reportan en la tabla 4-14.

Tabla 4-14: Propiedades reológicas de los sistemas, luego de envejecer a 220F.

Polímero	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	PC (Pa)	Gel 10 s (Pa)	Gel 10 m (Pa)
Polímero 1	2,40	1,92	29	6,720	1,92	2,40
Polímero 2	6,72	5,28	59	21,12	4,80	4,80
Polímero 3	2,40	1,92	32	5,280	1,92	1,92
Polímero 4	*	*	*	*	*	*
Polímero 5	*	*	*	*	*	*
Polímero 6	*	*	*	*	*	*

* *La emulsión fue inestable.*

De los resultados mostrados en la tabla 4-14 se observa que la emulsión 30/25/45 fue estable solo con los polímeros 1, 2 y 3. Comparando los resultados obtenidos para la emulsión con estos tres polímeros, se tiene que la emulsión con el polímero 2 es la más estable, ya que mantiene los valores de viscosidad plástica y punto cedente, además de reportar altas lecturas de esfuerzo a baja tasa de corte y alta resistencia de gel, que es indicativo de la capacidad de suspender ripios. Se observa un aumento de

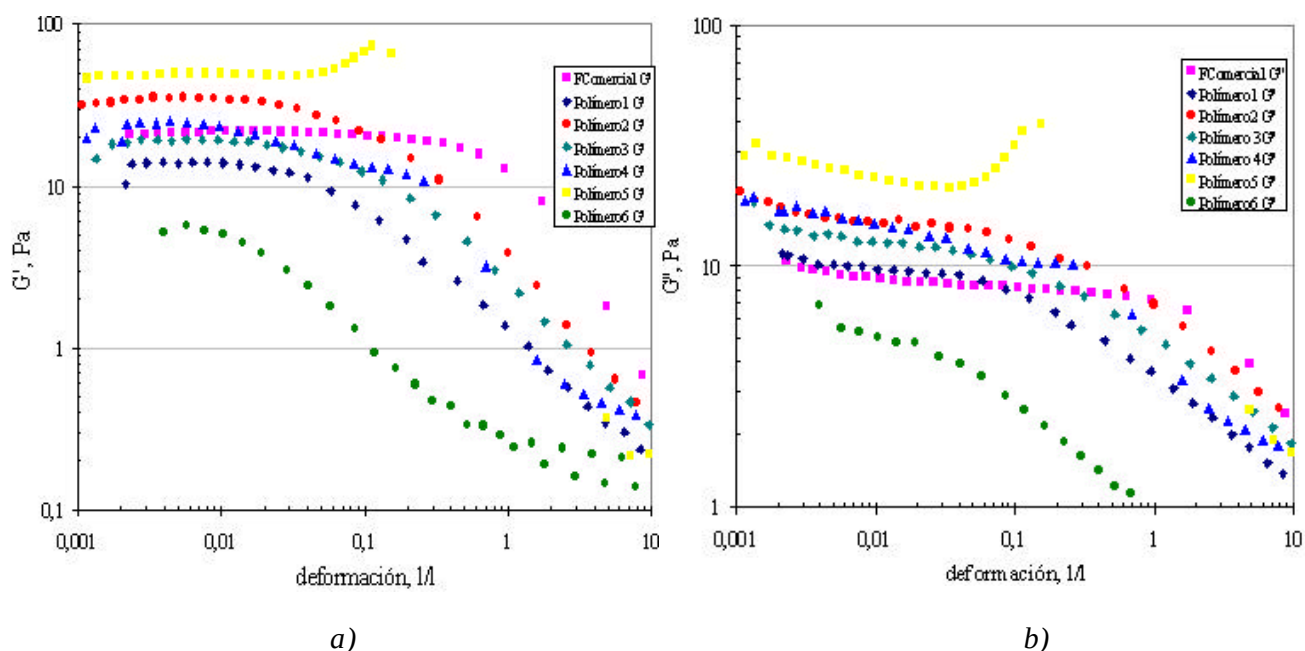
la viscosidad plástica y del punto cedente en comparación con los valores obtenidos antes de la prueba de envejecimiento. Se realizó una prueba de estabilidad térmica a 180F para poder evaluar las propiedades reológicas de la emulsión con todos los polímeros después de envejecer. Los resultados se muestran en la tabla 4-15.

*Tabla 4-15: Propiedades reológicas de los sistemas,
luego de envejecer a 180F.*

Polímero	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	PC (Pa)	Gel 10 s (Pa)	Gel 10 m (Pa)
Polímero 1	3,84	2,88	40	16,32	3,36	3,84
Polímero 2	9,12	7,68	48	22,08	7,68	8,64
Polímero 3	7,68	6,24	48	23,52	5,76	6,72
Polímero 4	5,76	3,84	28	18,72	3,84	6,24
Polímero 5	10,08	6,72	55	19,20	5,28	21,6
Polímero 6	3,84	3,36	72	12,48	3,84	3,84

De los datos mostrados en la tabla 415 se observa que todas las emulsiones fueron estables en la prueba de envejecimiento a una temperatura de 180 F. La emulsión con los polímeros 5 y 6 excedieron los valores de viscosidad plástica y punto cedente y el polímero 4 mantuvo su comportamiento reológico inverso que mostró antes de la prueba de envejecimiento. Comparando los resultados de la emulsión con los polímeros 3 y 2, se tiene que con este último se mantiene la propiedad de tener alta viscosidad a baja tasas de corte, lo cual se observa con los valores obtenidos para las lecturas de esfuerzo a 6 y 3 rpm y es representativo del comportamiento que presentará el fluido a muy bajas tasas de corte.

Para evaluar el comportamiento viscoelástico se realizaron pruebas dinámicas los cuales se muestran en las figuras 4-15.



Figuras 4-15: Módulos dinámicos vs. deformación para los sistemas con polímeros después de envejecer a 180 F. a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso.

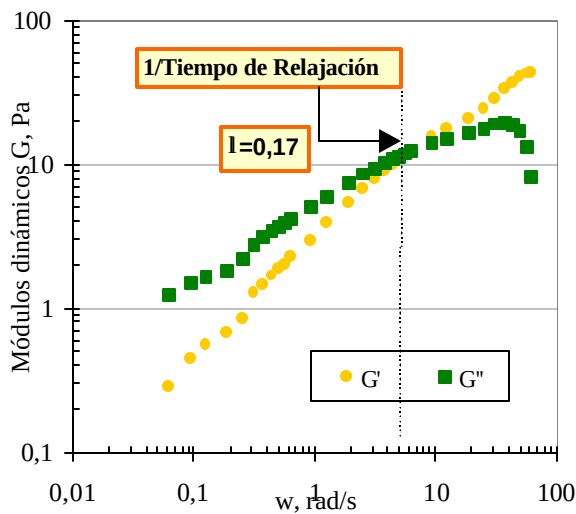
Del barrido de esfuerzo se obtuvo que los polímeros 2 y 3, son los que presentan un intervalo de viscoelasticidad lineal más estable después de la prueba de envejecimiento a una temperatura de 180 F. El polímero 5 presentó estabilidad hasta una deformación de 0,05 , y luego la respuesta elástica y la respuesta viscoso aumentaron para después caer con una mayor pendiente. El polímero 6 no mantuvo ninguna linealidad por lo que no es capaz de ofrecer resistencia a los niveles de deformación aplicados.

Para determinar el tiempo de relajación de la emulsión con diferentes polímeros se realizó un barrido de frecuencia. Para realizar esta prueba se escogió un valor de τ_0 tal que γ_0 fuera menor que 0,1, ya que de las pruebas de barrido de esfuerzo se determinó que G' y G'' son aproximadamente constantes a deformaciones menores a 0,1 siendo esto indicativo de la linealidad de la región viscoelástica.

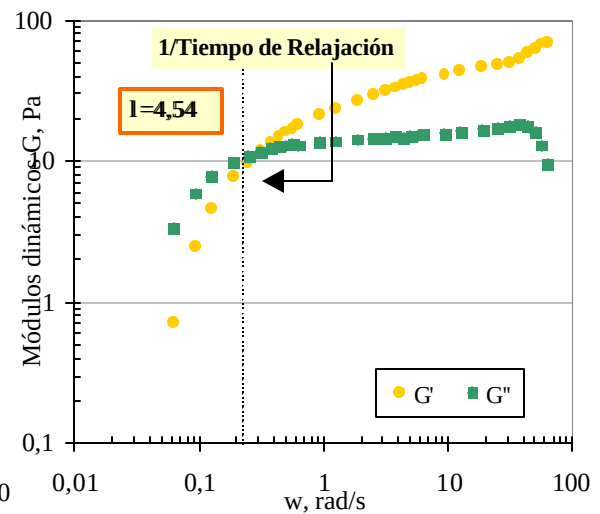
Se tomó un esfuerzo de 0,35 Pa de amplitud, ya que este valor se encontraba en el intervalo descrito para cada sistema con los diferentes

polímeros. (Este procedimiento se realizó de igual manera para las pruebas anteriores)

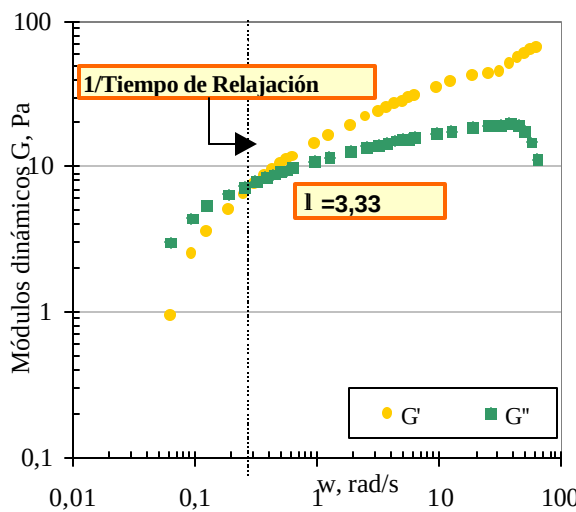
Los resultados de esta prueba se observan en las figuras 4-16, en donde se reporta el valor del tiempo de relajación como el inverso del punto de corte del módulo viscoso y el módulo dinámico..



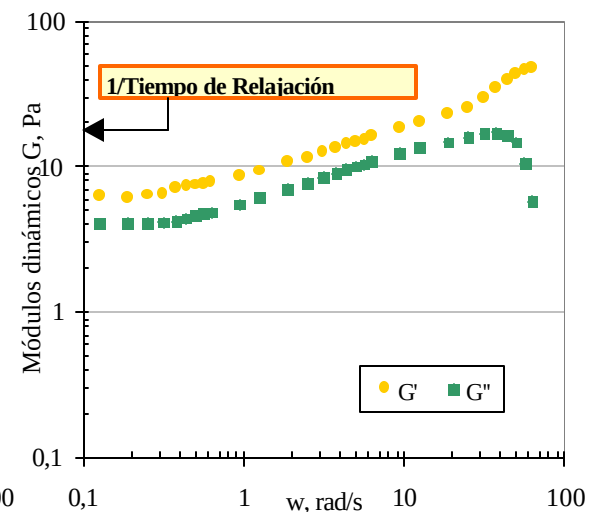
a) Sistema con Polímero1.



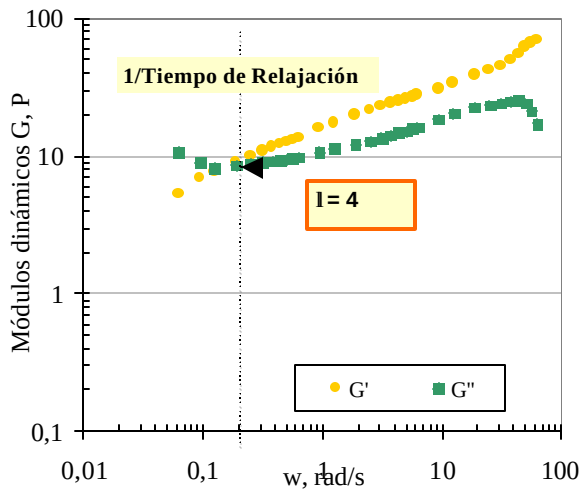
b) Sistema con Polímero2.



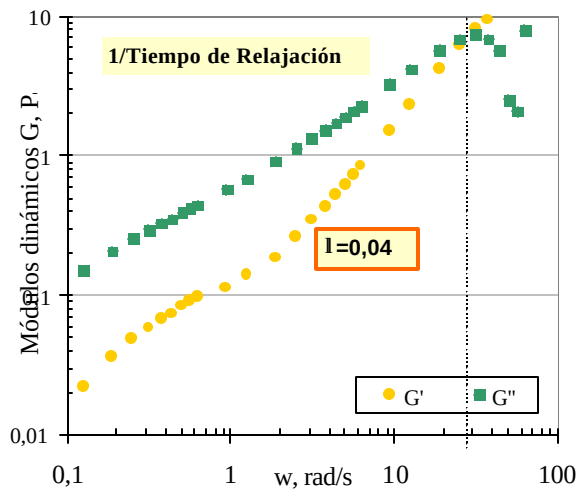
c) Sistema con Polímero3.



d) Sistema con Polímero4.



e) Sistema con Polímero5.



f) Sistema con Polímero6.

Figuras 4-16: Módulos dinámicos vs. deformación.

a) Módulo elástico. b) Módulo viscoso.

De estas figuras se observa que G' es mayor que G'' para los sistemas con los polímeros 2, 3, 4 y 5, lo que indica que un comportamiento elástico mayor que el viscoso. Mientras que para los sistemas con los polímeros 1 y 6, G'' es mayor que G' , por lo que el sistema es más viscoso que elástico. Los valores de tiempo de relajación para los sistemas con polímeros de la prueba de envejecimiento a 180F se reportan en la tabla 4-16.

Tabla 4-16: Tiempos de relajación para la emulsión 30/25/45 con diferentes polímeros, después de la prueba de envejecimiento.

Tipo de Polímero	λ (1/s) Después de 180F
Polímero1	0,17
Polímero2	4,54
Polímero3	3,33
Polímero4	0,03*
Polímero5	4,00
Polímero6	0,04

*Se determinó analíticamente.

Comparando los tiempos de relajación reportados se tiene que el mayor tiempo lo reporta el sistema con el polímero 2, lo cual es indicativo de que este sistema mantiene una estructura más estable después de la prueba de envejecimiento. El tiempo fue de 4,54 s y para este mismo sistema, pero antes de la prueba de estabilidad térmica fue de 8,33 s, lo que indica una reducción de aproximadamente del 50%.

En la figura 4-17 se muestra el comportamiento de la viscosidad compleja según la frecuencia.

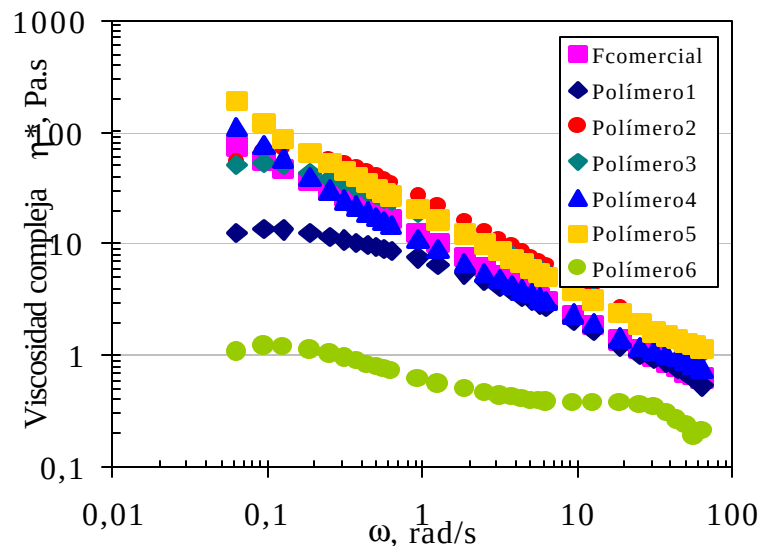


Figura 4-17: Viscosidad compleja para los sistemas después de la prueba de estabilidad térmica a 220 F

Los sistemas que se alejan de la tendencia seguida por el fluido comercial tomado como referencia, son los sistemas con polímeros 1 y 6.

En la tabla 4-17 se reportan los valores de η_0 tomados de la grafica 4-17 como la viscosidad compleja η^* a baja frecuencia. (aproximadamente 0,06 rad/s)

Tabla 4-17: Viscosidad a baja frecuencia e índice de fluidez para los sistemas, después de envejecer a 180 F.

Fluido	n	η_0 (Pa.s)
Fluido Comercial	0,2944	100
Polímero 1	0,4977	12
Polímero 2	0,3231	75
Polímero 3	0,3759	70
Polímero 4	0,3051	100
Polímero 5	0,2808	110
Polímero 6	0,7529	1

Los sistemas con los polímeros 2,3,4 y 5, después de la prueba de estabilidad térmica a 180 F, reportaron altos valores de viscosidad a baja frecuencia, característica que influye en la capacidad de suspensión del fluido a estas condiciones de trabajo.

A partir de los resultados de las pruebas dinámicas y de estabilidad térmica se procedió a escoger el polímero que proporcionara mejor comportamiento reológico. Se escogió el polímero 2 por ser el que presentó mayor estabilidad térmica a altas temperatura (220 F), además de presentar un alto comportamiento elástico.

Seguidamente se procedió a variar la concentración del polímero, de la fase dispersa, y de la fase continua con el fin de obtener la formulación ideal que cumpla con los requisitos de baja densidad y alta viscoelasticidad.

Inicialmente se trabajó con dos formulaciones denominadas formulación A y formulación B, con la siguiente relación aceite / agua:

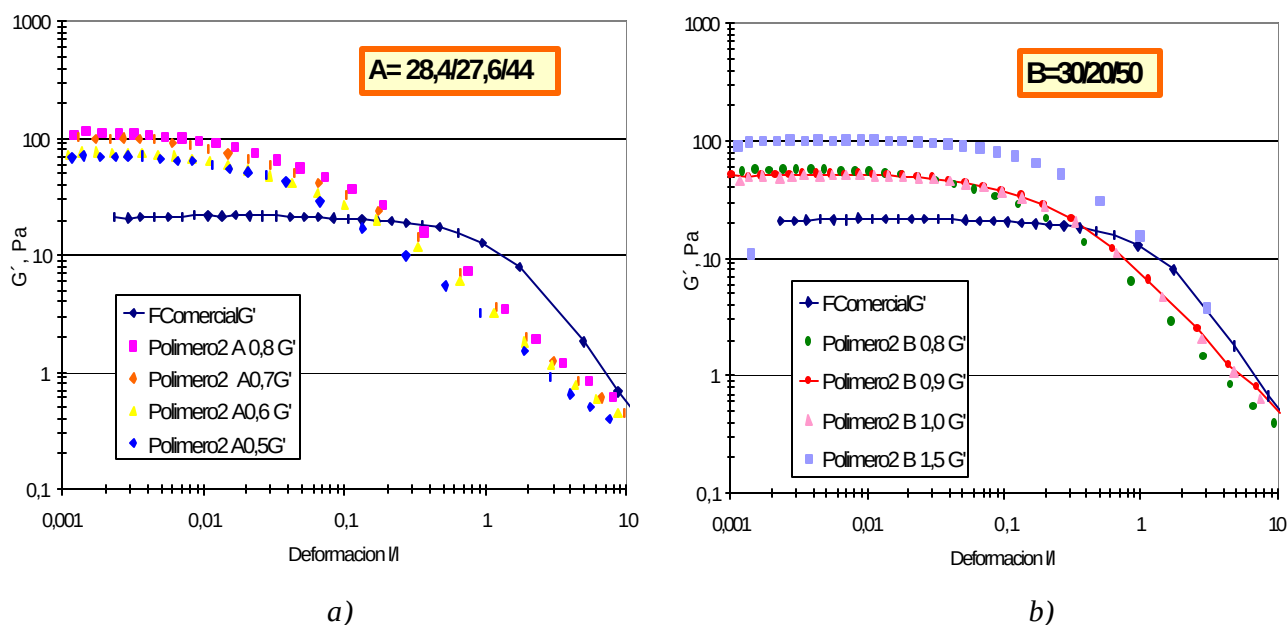
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{A} = \text{O/W} = 39,2 / 60,8 \text{ y } 27,6\% \text{ de micro-esferas} \\ \hspace{15em} (\text{O/M/W} = 28,4 / 27,6 / 44) \\ \text{B} = \text{O/W} = 37,5 / 62,5 \text{ y } 20\% \text{ de micro-esferas} \\ \hspace{15em} (\text{O/M/W} = 30 / 20 / 50) \end{array} \right.$$

Estas dos formulaciones se determinaron después de estudiar las propiedades reológicas y el comportamiento viscoelástico del Polímero2, con el análisis de la solución polimérica y variando la concentración de los aditivos utilizados. La concentración de esta solución polimérica fue de 1,5 gr de polímero en 175 cm³ de agua.

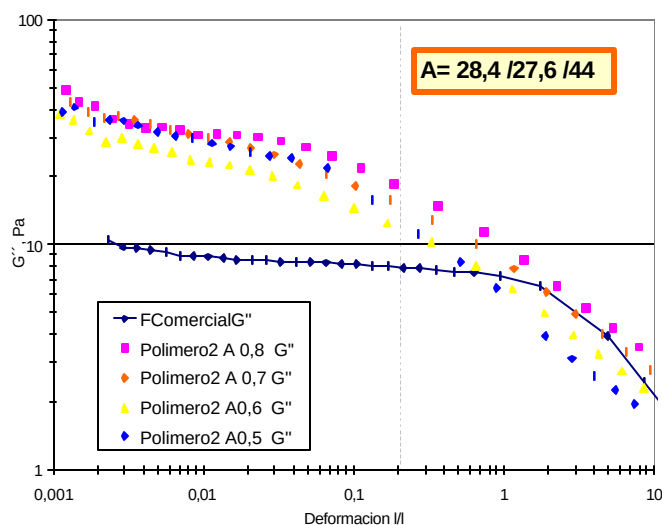
Para cada una de las formulaciones se realizó un barrido de concentración de polímero variando desde 0,5 hasta 1,5 gr por barril de laboratorio.

A cada formulación obtenida se le realizó la evaluación del comportamiento viscoelástico mediante pruebas dinámicas tanto antes como después de la prueba de estabilidad térmica.

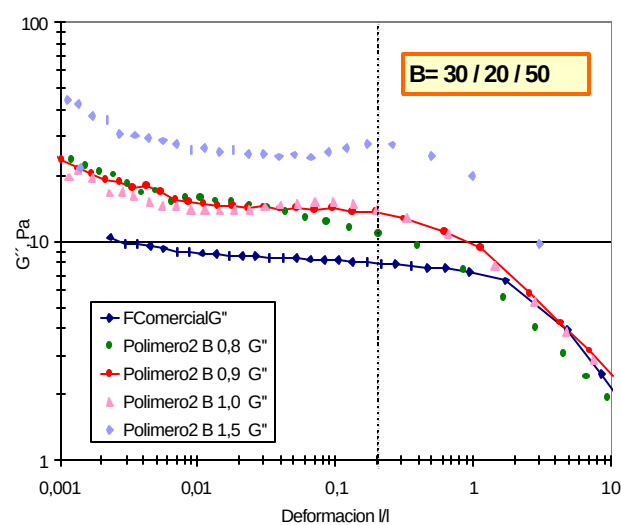
Se determinó la región viscoelástica lineal y el comportamiento se muestran en las figuras 4-18 y 4-19.



Figuras 4-18: Módulo elástico vs. deformación para las formulaciones A y B, con diferente concentración de Polímero2. a) Formulación A. b) Formulación B.



b)



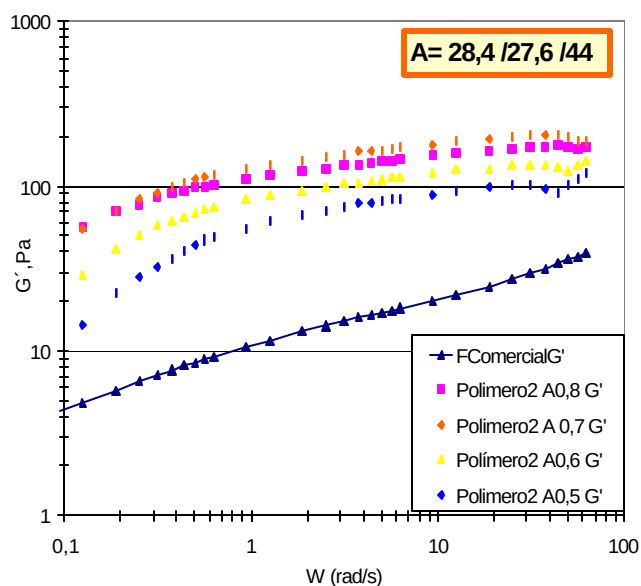
b)

Figuras 4-19: Módulo viscoso vs. deformación para las formulaciones A y B, con diferente concentración de Polímero2. a) Formulación A. b) Formulación B.

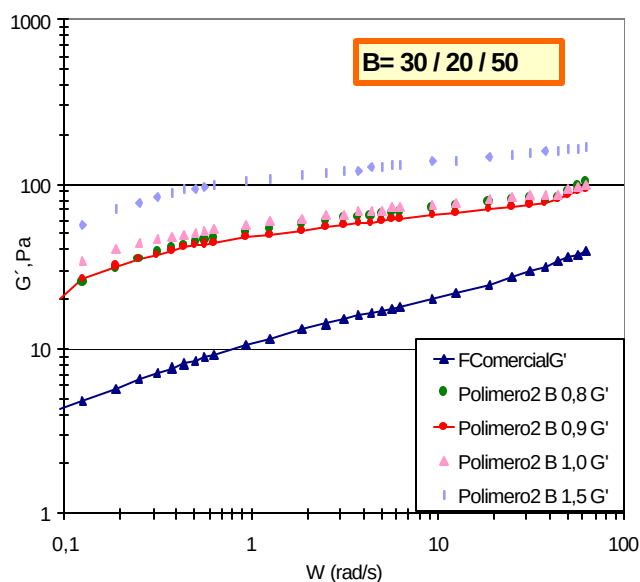
De las figuras 4-18 se observa la gran elasticidad que le proporciona el Polímero2 a cada una de las formulaciones evaluadas tanto del grupo A como del grupo B. Las emulsiones del grupo B presentaron un intervalo de viscoelasticidad lineal más amplio en comparación con las emulsiones del grupo A, esto es debido a que la concentración de Polímero2 utilizada para este grupo es mayor (tomando en cuenta la limitante de no exceder los valores de viscosidad plástica reportados por el viscosímetro de campo), ya que las emulsiones del grupo A, reportaban muy altos índices de viscosidad.

De las figuras 4-19, se observa que el comportamiento viscoso es más estable para los sistemas del grupo de formulaciones B que para las formulaciones del grupo A. Obsérvese que el valor de este comportamiento es mucho mayor que para los sistemas del grupo A, por el orden de 20 Pa.

En las figuras 4-20 y 4-21, se muestra el comportamiento elástico y el comportamiento viscoso en función de la frecuencia.

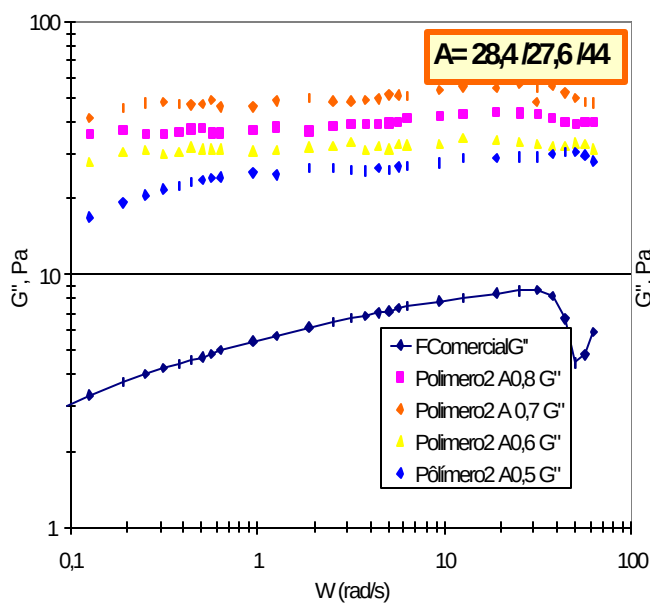


a)

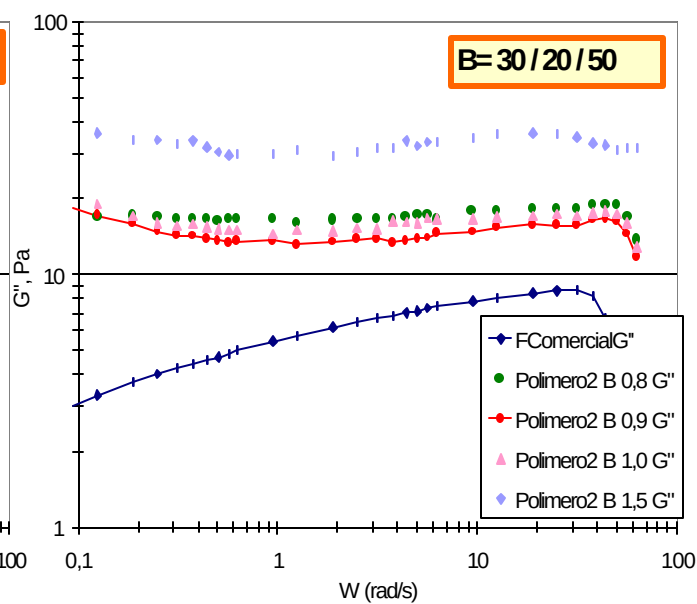


b)

Figuras 4-20: Módulo elástico de las formulaciones A y B con diferente concentración del Polímero 2. a) Formulaciones A. b) Formulaciones B.



a)



b)

Figuras 4-21: Módulo viscoso de las formulaciones A y B con diferente concentración del Polímero 2. a) Formulaciones A. b) Formulaciones B.

De las figuras 4-20 y 4-21, se tiene que las emulsiones de los dos grupos de formulaciones son altamente elásticas, el cual es el comportamiento deseado, pero estas propiedades influyen en los valores de viscosidad y punto cedente reportados de las mediciones realizadas en el viscosímetro de campo. El módulo elástico para las formulaciones del grupo A se encuentran en el orden de 80 – 160 Pa, mientras que para las emulsiones del grupo B, se encuentran en un intervalo 60 – 100 Pa.

La evaluación de las propiedades reológicas se realizó solo a las formulaciones del grupo B, ya que comparando los resultados de las pruebas dinámicas, son las que reportan un comportamiento viscoelástico más estable. Estos resultados son determinantes en la escogencia de la formulación final, para cumplir con el requisito de alta elasticidad del fluido. En la figura 4-22 se muestra la variación de la viscosidad compleja en función de la frecuencia y los valores de η_0 se reportan en la tabla 4-18.

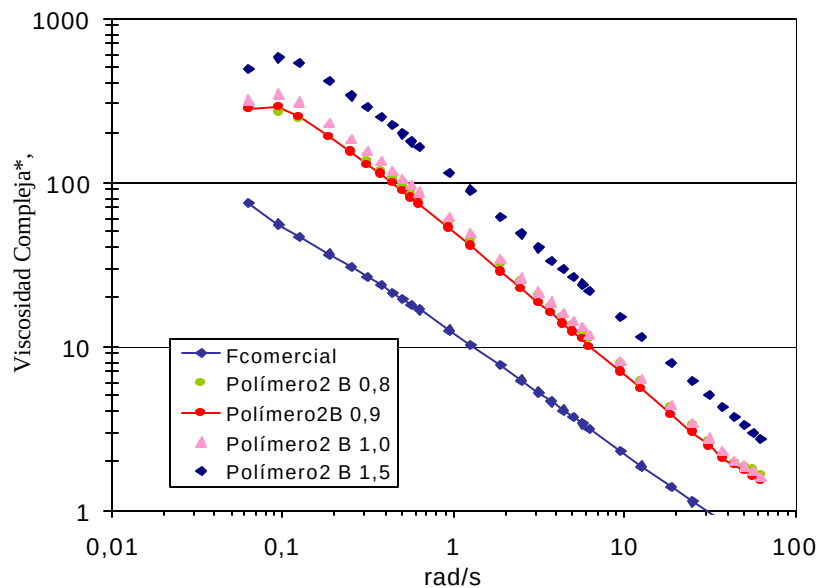


Figura 4-22: Viscosidad compleja h^* en función de la frecuencia.

En la tabla 4-18 se muestran los resultados de la evaluación de las propiedades reológicas.

Tabla 4-18: Propiedades reológicas para la emulsión 30/20/50 con diferente concentración de Polímero2.

Polímero gr.	η_0 (Pa.s)	n	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	Pc (Pa)	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
0,8	250	0,185	8,16	7,20	42	17,28	7,68	9,120
0,9	255	0,173	9,60	8,64	42	19,68	9,60	12,96
1,0	400	0,157	10,56	9,60	48	16,32	10,08	12,96
1,5	500	0,161	17,28	15,84	58	13,44	16,80	22,08

Los valores de viscosidad plástica, esfuerzo cedente y geles obtenidos para la emulsión B con concentraciones de Polímero 2, igual o menor a 1 gr por barril de laboratorio, son totalmente manejables, pero la emulsión con 1,5 gr de Polímero 2, presenta una viscosidad plástica muy alta al igual que el η_0 el cual es de 500 Pa.s, lo que indica que se requiere de un *alto esfuerzo* de corte para hacer fluir este sistema a baja tasa de corte. Los valores de η_0 son bastante altos en comparación con el fluido comercial, el cual reporta un η_0 de 100 Pa.s. Para los sistemas con 0,8 y 0,9 gr de Polímero2 se reportaron η_0 de 200 y 250 Pa.s, respectivamente. Los resultados de la prueba de estabilidad térmica a 220F, se muestran en la tabla 4-19.

Tabla 4-19: Propiedades reológicas para la emulsión 30/20/50 con diferente concentración de Polímero2 después de envejecer a 220 F.

Polímero gr	η_0 (Pa.s)	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	Pc (Pa)	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
0,8	175	8,64	7,20	46	23,04	7,20	8,64
0,9	185	9,60	8,16	42	27,84	8,16	9,12
1,0	300	11,52	9,60	51	27,84	9,60	11,04
1,5	430	17,28	14,4	69	43,68	13,4	15,36

Después de la prueba de envejecimiento todas las emulsiones fueron estables, pero los sistemas con 1,0 y 1,5 gr de Polímero2, reportaron valores de viscosidad plástica y punto cedente muy elevados, por lo que se descartan como posible solución.

Comparando los resultados de los sistemas con 0,8 y 0,9 gr; se escogió la segunda ya que su comportamiento viscoelástico fue bastante estable y los valores de viscosidad plástica y punto cedente se encuentran en el intervalo de trabajo, según la experiencia en campo.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas, se escogió la emulsión con relación O/W = 37,5 / 62,5 con 20% de micro-esferas de vidrio y 0,9 gr de Polímero2, ya que presentó alto comportamiento viscoelástico, estabilidad térmica a alta temperatura, alto valor de η_0 y valores de viscosidad plástica y punto cedente manejables en campo, en comparación con otros fluidos.

Para conseguir una densidad menor a la de la emulsión seleccionada ($0,816 \text{ gr/cm}^3 = 6,8 \text{ lpg}$) para cumplir con otro de los objetivos planteados, el cual es una densidad menor o igual a $0,78 \text{ gr/cm}^3$, se procedió a sustituir porcentaje de volumen de fase continua en la emulsión por porcentaje en volumen de micro-esferas, controlando los valores de viscosidad plástica y punto cedente. Se evaluaron las propiedades reológicas, tanto antes como después de la prueba de estabilidad térmica y los resultados se muestran en las tablas 4-20 y 4-21, respectivamente.

Tabla 4-20: Propiedades reológicas sustituyendo agua por microesferas .

% Fase continua	η_0 (Pa.s)	% Micro-esferas	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	Pc (Pa)	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
50	350	20	9,6	8,64	42	19,68	9,60	12,96
48	400	22	9,6	8,64	44	19,68	8,64	12,00
46	510	24	10,08	9,12	44	23,04	9,12	12,48

Tabla 4-21: Propiedades reológicas después de envejecer a 220F

%Fase continua	η_0 (Pa.s)	% Micro-esferas	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	Pc (Pa)	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
50	260	20	9,60	8,16	42	27,84	8,16	9,12
48	100	22	9,60	7,68	55	21,60	7,68	9,12
46	380	24	10,08	8,64	59	30,24	8,16	9,60

Para la emulsión con un 46% de fase continua los valores de viscosidad y punto cedente después de envejecer se incrementan significativamente, por lo que se descarta como posibles solución. Para la emulsión con un 48% de fase continua y 22% de micro-esferas de vidrio se obtuvieron valores manejables por lo que se selecciona como formulación final con una densidad de 0,8043 gr/cm³ (6,7 lpg), tomando en cuenta que para cumplir con el objetivo de alta elasticidad, se sacrifica un poco el requisito de baja densidad.

4.4 FORMULACIÓN FINAL

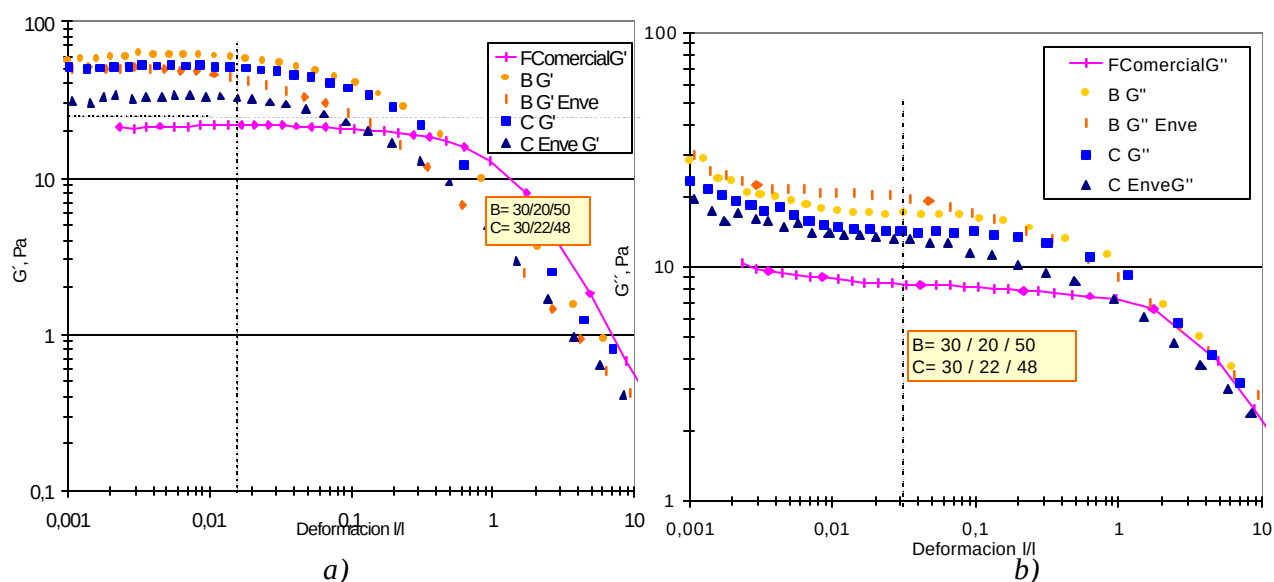
La formulación final es la siguiente:

Tabla 4-22: Formulación final.

O/M/W	O/W	Agua gr	Aceite gr	Micro-esferas gr	Polímero2 gr	Densidad Teórica (gr/cm ³)
30/22/48	37,5/62,5	145,5	85,785	29,26	0,9	0,8043

Esta formulación final se identificó como formulación C, y se determinó la región viscoelástica lineal para compararla con la formulación B, y controlar que con la disminución de la fase continua, no se hayan afectado las propiedades viscoelásticas de manera significativa, tanto antes como después de la prueba de estabilidad térmica.

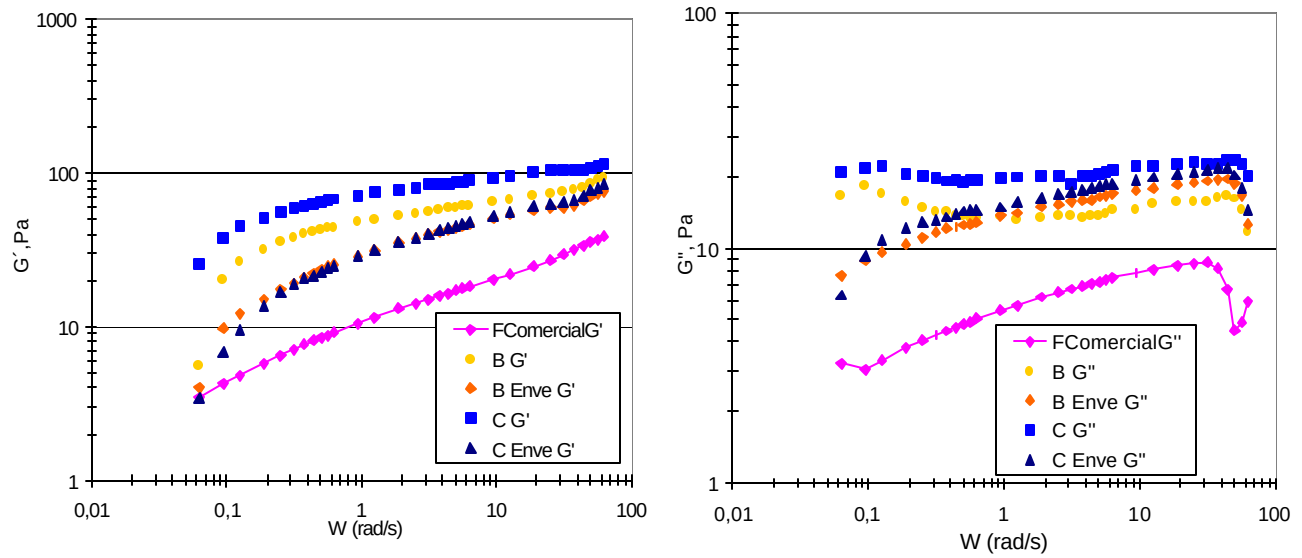
En las figuras 4-23 se muestra la prueba de barrido de esfuerzo para determinar el rango de viscoelasticidad lineal de la formulación final C, tanto antes como después de la prueba de estabilidad térmica a 220F y se compara con la formulación B y con el fluido comercial utilizado como referencia.



Figuras 4-23: Barrido de esfuerzo para las formulaciones B y C antes y después de envejecer a 220F. a) Módulos elásticos. b) Módulos viscosos.

El intervalo de viscoelasticidad lineal de la formulación final es similar al obtenido por el de la formulación B, por lo que la sustitución de volumen de agua por volumen de micro-esferas no influyó en el mismo, y se mantuvo estable con un módulo elástico de 55 Pa (ver figura 4-23a)) y un módulo viscoso de 18 Pa (ver figura 4-23b)). El comportamiento de la formulación final después de la prueba de estabilidad térmica fue más significativo, debido ha que se obtuvo un intervalo de viscoelasticidad lineal mayor que para la formulación B después de envejecer a la misma temperatura. En las figuras 4-24 se observan los resultados de la prueba de barrido de

frecuencia y en la figura 4-25 se muestra la variación de la viscosidad compleja en función de la frecuencia.



a) b)
Figuras 4-24: Barrido de frecuencia para las formulaciones B y C, antes y después de envejecer a 220F. a) Módulos elásticos. b) Módulos viscosos.

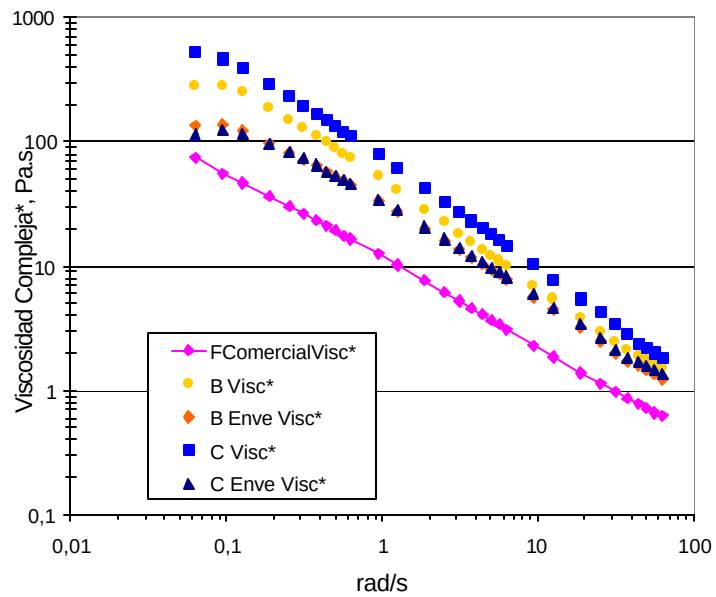


Figura 4-25: Viscosidad compleja en función de la frecuencia para las formulaciones B y C, antes y después de envejecer a 220F.

Los valores de η_0 se reportan en la tabla 4-23.

Tabla 4-23: Valores de h_0 reportados para 0,06 rad/s

Fluido	h_0 (Pa.s)
Formulación B	250
Formulación B después de 220F	180
Formulación C	400
Formulación C después de 220F	100

Para mostrar los resultados de la prueba de barrido de frecuencia de forma convencional se realizaron gráficas en términos de viscosidad dinámica normalizada y los módulos dinámicos normalizados en función de la frecuencia normalizada. Los resultados se observan en las figuras 4-26.

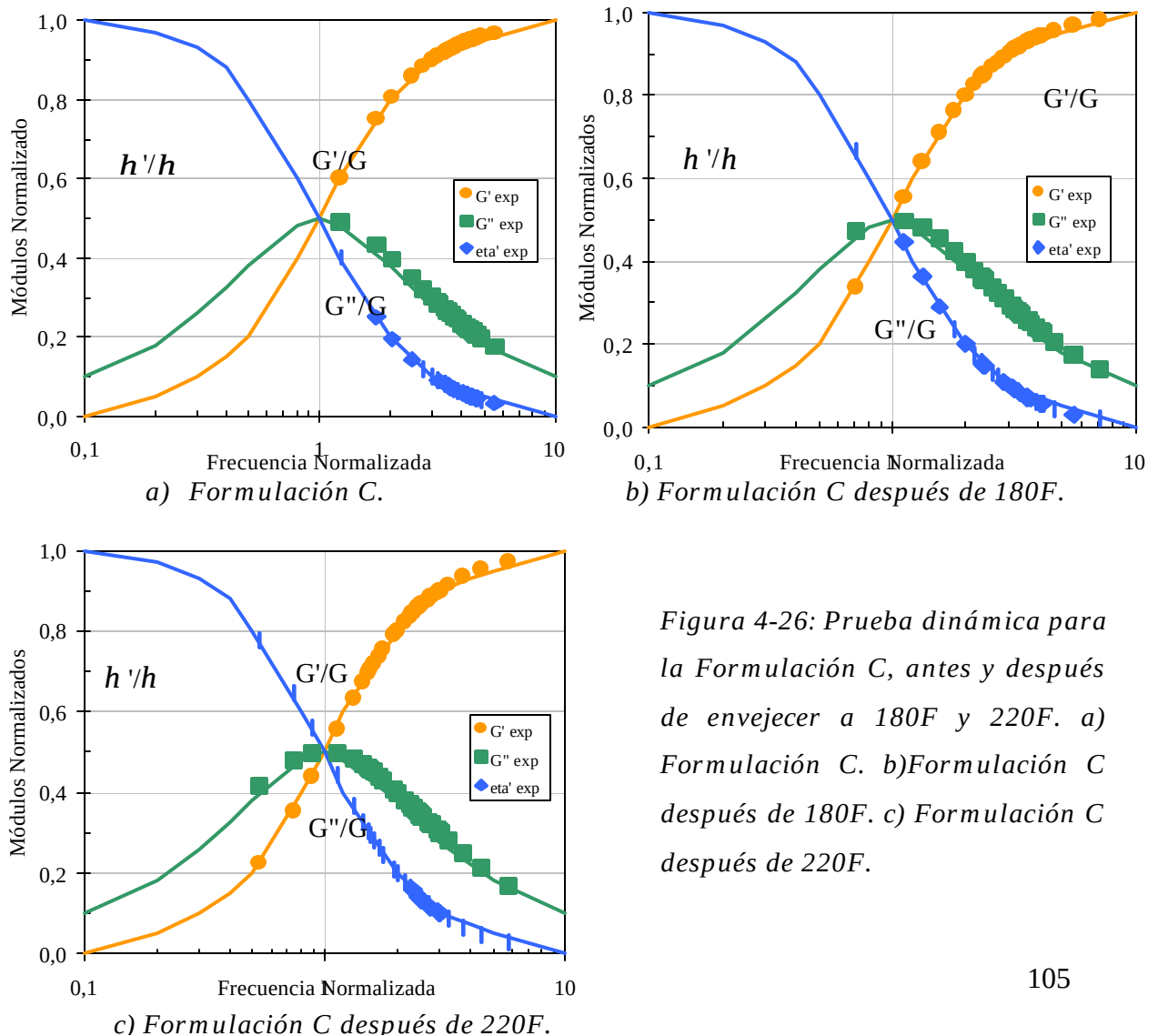


Figura 4-26: Prueba dinámica para la Formulación C, antes y después de envejecer a 180F y 220F. a) Formulación C. b) Formulación C después de 180F. c) Formulación C después de 220F.

De las figuras 4-26, se observa la diferencia en la densidad de los puntos experimentales que caen sobre las curvas teóricas en cada prueba. En general, estos puntos se localizan hacia la derecha del punto de cruzamiento, lo que indica una alta elasticidad del fluido. En la figura 4-23 b) en donde se observa el comportamiento del fluido después de la prueba de estabilidad térmica a 180F, se destaca que los puntos se corren hacia la izquierda del punto de cruzamiento con el aumento de la temperatura, lo que sugiere una leve pérdida de elasticidad. Con la formulación C envejecida a 220F se tiene un aumento de la componente viscosa y una disminución de la componente elástica en un mayor grado que para la formulación envejecida a 180F.

Diámetro de gota:

Con la evaluación del diámetro de gota se verificó la estabilidad de la emulsión después de la prueba de envejecimiento. Esta distribución es del tipo bimodal, ya que una moda se refiere al tamaño de las gotas de aceite dispersas en la emulsión y la otra moda evalúa el diámetro de las microesferas de vidrio. Los resultados se muestran en la tabla 4-24.

Tabla 4-24: Resultados de la evaluación del diámetro de gota para la formulación antes y después de envejecer.

Formulación	D [4,3] μm	D [3,2] μm	D (V, 0.1) μm	D (V, 0.5) μm	D (V, 0.9) μm
Antes	15,53	3,82	1,82	4,35	48,89
Después 180F	21,11	4,41	1,91	5,40	57,20
Después 220F	22,50	4,46	1,92	5,43	59,24

Los valores reportados en la tabla 4-24, son resultados de un promedio entre las dos modas que se diferencian en la figura 4-27. La moda

que se encuentra en el intervalo entre 1,0 y 10 μm , se refiere al diámetro de gotas de aceite dispersas en la fase continua y la moda que se encuentra en el intervalo entre 10 y 100 μm , representa el diámetro de partícula de las micro-esferas de vidrio.

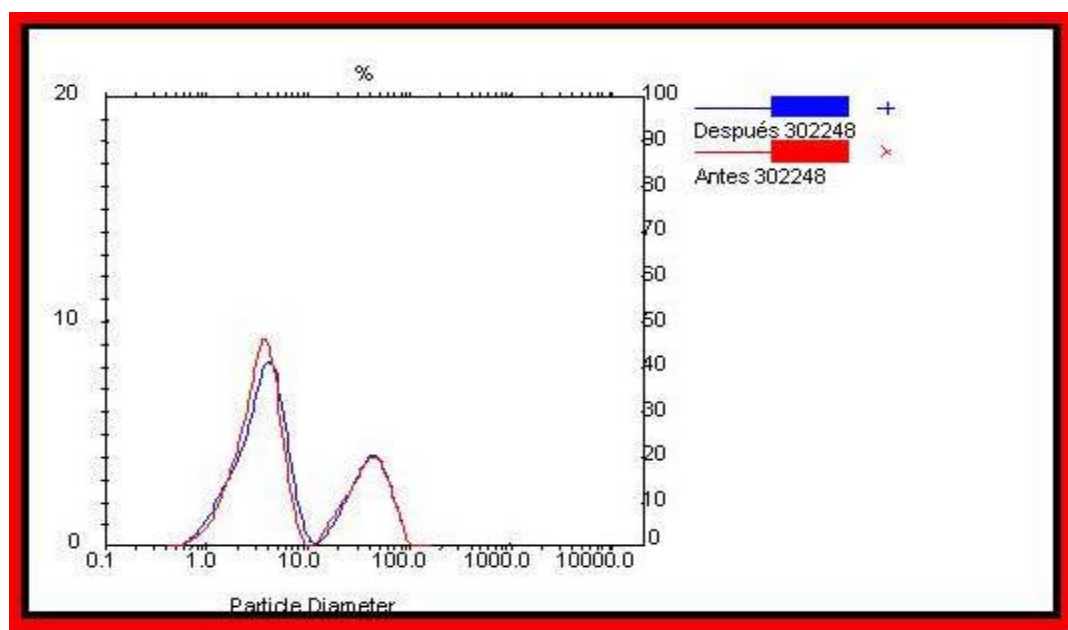


Figura 4-27: Diámetro de gota antes y después de envejecer a 180F.

Pruebas de filtrado con la formulación final:

Con la formulación final se procedió a realizar pruebas de filtrado y analizar como influye el comportamiento viscoelástico de un fluido en este tipo de prueba. Se realizó la prueba para el fluido antes y después de envejecer. Los resultados se muestran en la tabla 4-25 y figura 4-28.

Tabla 4-25: Resultados de la prueba de filtrado para la emulsión 30/22/48 antes y después de envejecer a 180F y 220F.

Filtrado API	Antes	Después de 180 F	Después de 220 F
Volumen (cm ³)	3,4	19	44

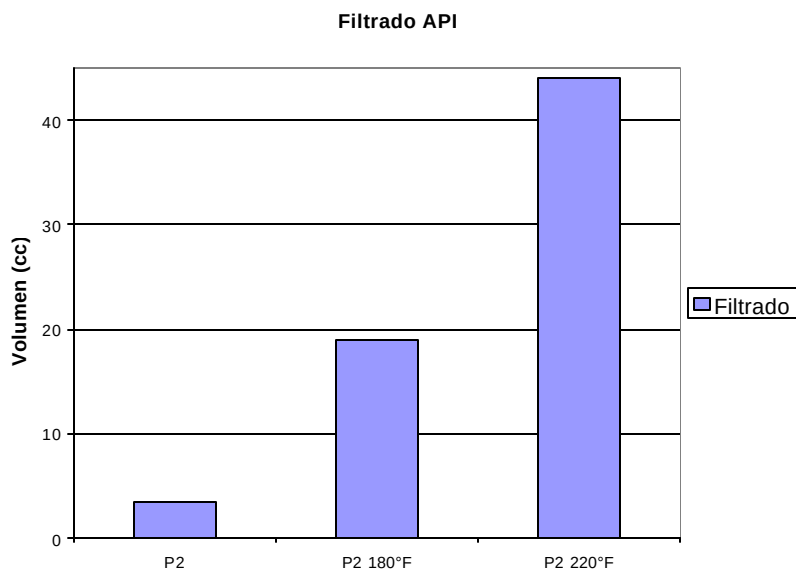


Figura 4-28: Filtrado API para la emulsión 30/22/48 antes y después de envejecer a diferentes temperaturas.

Se evaluaron las propiedades reológicas de la formulación final tanto antes como después de la prueba de estabilidad térmica a 180 y 220F y los resultados se reportan en la tabla 4-26.

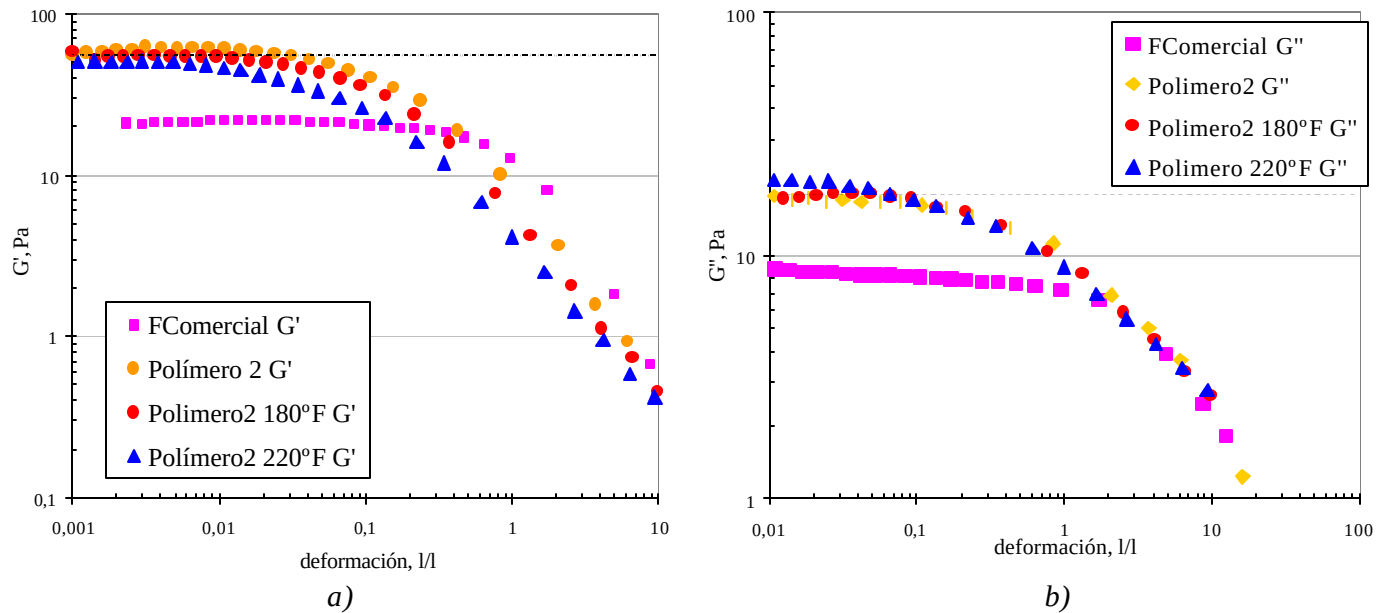
Tabla 4-26: Propiedades reológicas antes y después de envejecer.

Fluido	L6 (Pa)	L3 (Pa)	Vp (mPa.s)	Pc (Pa)	Gel 10s (Pa)	Gel 10m (Pa)
Antes	9,60	8,64	44	19,68	8,64	12,0
Después de 180F	11,52	10,08	46	24,96	9,60	12,0
Después de 220F	9,60	7,68	55	21,60	7,68	9,12

El filtrado con el sistema envejecido a 180 se redujo en más del 50% en comparación con el sistema envejecido a 220F. La viscosidad plástica aumentó en el fluido después de envejecer a 220F, sin embargo, el filtrado desmejoró.

Se procedió a analizar estos resultados en función del comportamiento viscoelástico obtenido en las pruebas dinámicas. Los

resultados de las pruebas dinámicas se muestran en las figuras 4-29 y 4-30 y se comparan con el fluido comercial.

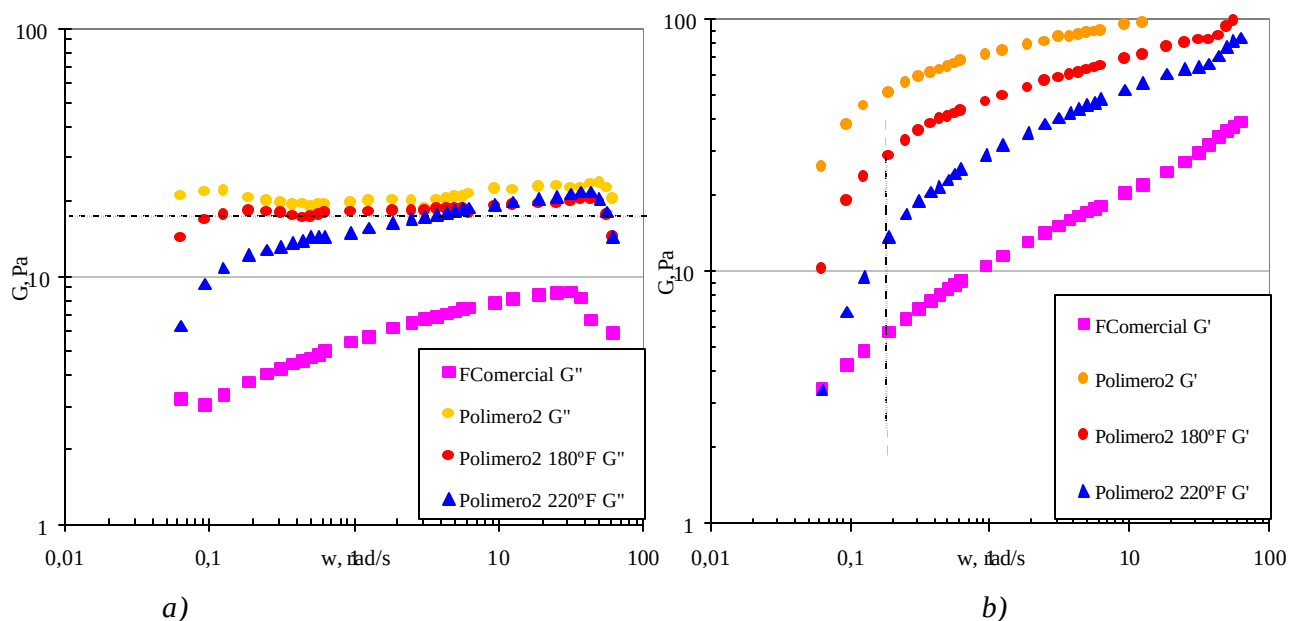


Figuras 4-29: Barrido de esfuerzo para la emulsión C,
antes y después de envejecer a 180 y 220 F
a) Módulo elástico b) Módulo viscoso.

Comparando el intervalo de viscoelasticidad lineal para la formulación final, a las dos temperaturas de envejecimiento con respecto al sistema antes de someterlo a la prueba de estabilidad térmica, se destaca una disminución de este intervalo por efecto de la temperatura.

La interacción entre los componentes del sistema después de envejecer a 220F es menor, por lo que se deforma más rápido que el sistema envejecido a 180F cuando aplicamos un mismo nivel de esfuerzo.

Se tomó un $\tau_0 = 0,35$ Pa para las pruebas de barrido de frecuencia para cada uno de los sistemas anteriores, y poder realizar una comparación entre estas. Estos resultados se muestran en las figuras 4-30.



Figuras 4-30: Barrido de frecuencia para la formulación C, antes y después de envejecer a 180 y 220 F
a) Módulo elástico b) Módulo viscoso.

En estas figuras se observa la perdida tanto del comportamiento elástico, como del comportamiento viscoso después de la prueba de estabilidad térmica a 180F y a 220F. La η^* varía de la siguiente manera:

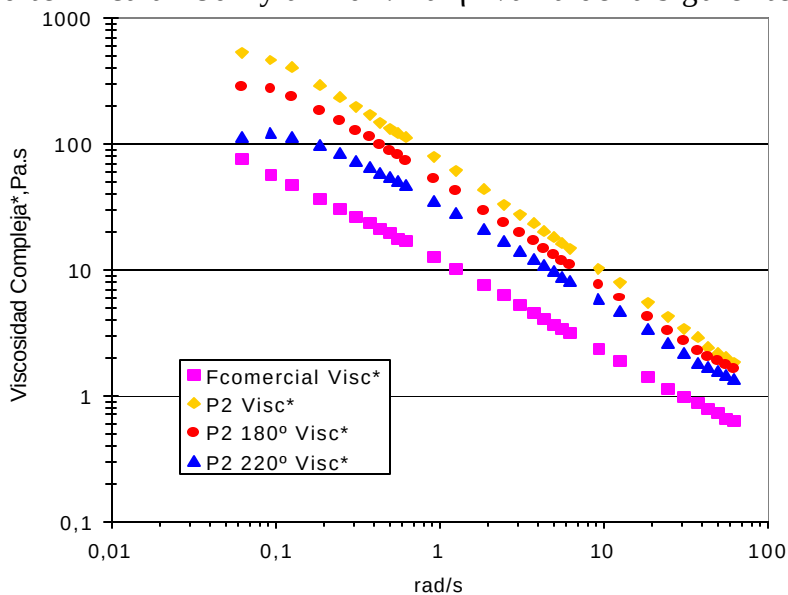


Figura 31: Viscosidad Compleja en función de la frecuencia.

Los valores de η_0 se tomaron a una frecuencia de 0,06 rad/s y estos valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4-27: Valores de h_0 reportados para 0,06 rad/s

Fluido	h_0 (Pa.s)
Formulación Final	400
Formulación Final después de 180F	220
Formulación Final después de 220F	100

A pesar de que el valor de h_0 disminuye con la temperatura, los valores reportados son suficientemente altos como para garantizar la capacidad de sustentación a estos niveles de frecuencia.

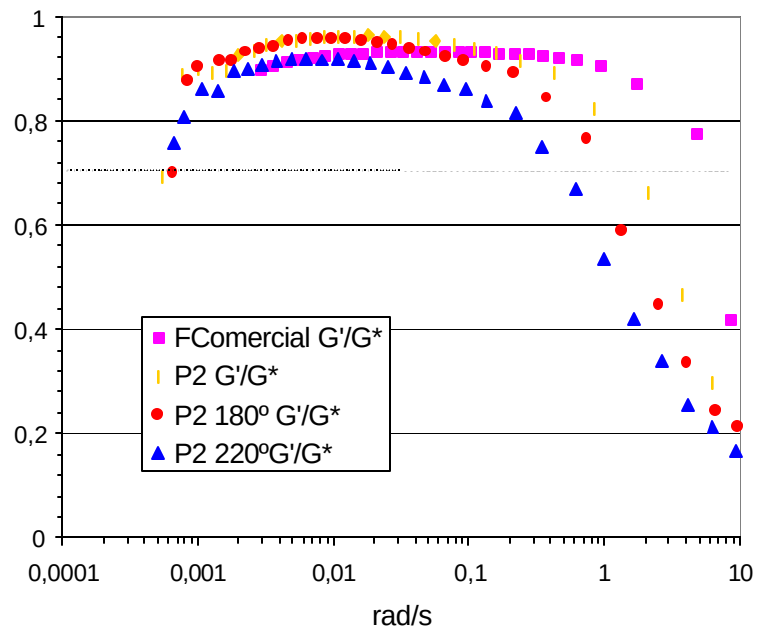


Figura 4-32: Relación G'/G^* en función de la frecuencia.

El sistema con el Polímero2 presenta un comportamiento bastante elástico, como se observa en la figura 4-32, ya que la relación G'/G^* para el sistema se encuentra por encima de 0,71, el cual es el valor del punto de

punto de cruzamiento. Después de 0,2 rad/s se observa una caída de la relación G'/G^* para el sistema después de envejecer a 220F, lo que indica una pérdida de la elasticidad del fluido.

De las pruebas oscilatorias se tiene que la componente elástica después de la prueba de envejecimiento es mayor para la emulsión envejecida a 180F en comparación con la envejecida a 220F, además de que se obtuvo un intervalo viscoelástico más lineal para esta emulsión. Si relacionamos esto con la prueba de filtrado, en la cual se somete el fluido a cierta presión para desplazarlo, venciendo la resistencia de las fuerzas viscosas y las fuerzas elásticas del fluido, se tiene que a medida que la componente elástica sea mayor que la viscosa y que su variación con respecto a la deformación sea lo más constante posible se obtendrá mejor control de filtrado. Esto se debe a que en un material viscoelástico la componente elástica ofrece mayor resistencia a la deformación que la componente viscosa.

Si observamos los valores de viscosidad plástica obtenidos en la tabla 4-26, en donde la viscosidad plástica fue mayor para la emulsión después de envejecer a 220F, y el resultado de la prueba de filtrado de la tabla 4-25, se demuestra que un alto valor de viscosidad plástica no es significativo para un buen control de filtrado o por lo menos en el caso de este sistema. Pero si observamos los resultados de h_0 reportados en la tabla 4-27, observamos que el sistema antes de envejecer, el cual presentó mejor capacidad de filtrado, reportó un h_0 de 400 Pa.s y el sistema después de envejecer a 220F, que no presentó control de filtrado, reportó un h_0 de 100 Pa.s, por lo que la tendencia es que un alto valor de h_0 puede garantizar un control de filtrado. De estos resultados se deduce la importancia de la evaluación de h_0 más que la evaluación de la viscosidad plástica, para un fluido viscoelástico.

CONCLUSIONES

Con la utilización de polímeros modificadores reológicos, es posible desarrollar una formulación de un fluido de perforación de baja densidad, que presente alto comportamiento elástico, que minimice la invasión de fluido hacia la formación, lo que se traduce en un menor daño a la formación y un aumento en la producción.

Se encontró aplicable el uso del Polímero2 en el control de propiedades reológicas y comportamiento viscoelástico del fluido de perforación evaluado, así como en el control de filtrado.

El fluido evaluado muestra un comportamiento altamente elástico debido a que el módulo de elasticidad G' es mayor que el módulo viscoso G'' , además de que el cociente $\frac{G'}{G''}$ es mayor que 0,71, valor que corresponde al punto de cruzamiento.

El fluido evaluado muestra un comportamiento altamente pseudoplástico, con altos valores de viscosidad a muy baja tasa de corte $\dot{\gamma}$ y/o muy baja frecuencia ω , definida como: $h_0 = \lim_{\omega \rightarrow 0} h^*(\omega) = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow 0} h(\dot{\gamma})$, propiedad que influye en la capacidad de suspender ripios en el anular en ausencia de circulación, además de reportar alto valor de esfuerzo cedente.

El fluido evaluado presenta una disminución de la elasticidad y pseudoplasticidad cuando se somete a pruebas de temperatura y corte.

La estructura del polímero, así como la cantidad utilizada son de gran importancia en el control de las propiedades reológicas del fluido de perforación. Tiene influencia directa en la flotabilidad de las microesferas en la emulsión, en la estabilidad de la emulsión y en las propiedades del filtrado.

Si un fluido viscoelástico reporta un tiempo de relajación largo, cuando la muestra se ve sometida a ciertas deformaciones, es indicativo de una mayor estabilidad, por lo que garantiza mantener las propiedades reológicas por más tiempo.

Un alto valor de η_0 se relaciona con la capacidad de control de filtrado del fluido, y esto es debido a que el fluido es capaz de soportar altos valores de esfuerzo sin llegar a deformar su estructura, ofreciendo mayor resistencia a fluir.

En un fluido viscoelástico, altos valores de viscosidad plástica no son indicativos de un mejor control de filtrado, por lo que es más conveniente evaluar el módulo de la viscosidad compleja a baja frecuencia.

En un fluido viscoelástico el control de filtrado es influenciado más por el comportamiento elástico que por el comportamiento viscoso.

El modelo de Maxwell normalizado indica el grado de elasticidad y viscosidad de un fluido viscoelástico, de manera muy gráfica, por lo que es de gran utilidad para caracterizar este tipo de respuestas.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio más amplio entre la relación que existe entre la capacidad de filtrado de un fluido viscoelástico y la viscosidad a baja frecuencia y/o baja tasa de corte.

Agregar un aditivo a la formulación final, que disminuya la degradación del polímero por temperatura, para que la pérdida de elasticidad y de pseudoplasticidad del fluido, después de la prueba de estabilidad térmica, sea muy ligera, garantizando un óptimo rendimiento.

Utilizar diferentes tamaños de microesferas de vidrio con la finalidad de obtener mayor área de contacto y evaluar su influencia en las propiedades de filtrado.

Realizar prueba de hinchamiento de arcilla, para conocer las propiedades inhibitorias de la formulación final, sin aditivos adicionales, y relacionar los resultados con el comportamiento viscoelástico del fluido.

Evaluar formulaciones en donde se mantenga la misma relación de aceite en agua (O/W) y variar la concentración de microesferas.

Formular un fluido con la mínima cantidad de aceite y la máxima cantidad de Polímero2, para evaluar el máximo comportamiento viscoelástico del sistema.

Evaluar el comportamiento reológico del Polímero2 a diferentes temperaturas, para conocer la influencia de la temperatura en la viscosidad mediante una solución polimérica.

Realizar un estudio comparativo entre este tipo de sistema formulado y los fluidos de alta densidad, en cuanto a rendimiento, costo y daño a la formación.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Petroleum Institute. 1995. Práctica Recomendada Procedimiento Estándar para las Pruebas de Laboratorio con Fluidos de Perforación. API PP 13-B. Quinta Edición.
2. Arco, Manuel J., Blanco José G., Márquez, Rosa L. y Garavito, Sandra M. 2000. Field Application of Glass Bubbles as a Density-Reducing Agent. SPE 62899. Texas.
3. Barberil, Efrain E. 1998. El pozo ilustrado. FONCIED. Caracas.
4. Barnes, H. A., Hutton, J. F. y Walters K. 1989. An Introduction to Rheology. Serie 3. Elsevier Science Publishers. B.V. New York.
5. BAROID. 1997. Manual de fluidos Baroid. BAROID. Houston, Texas.
6. Barry, B.W. 1975. Viscoelastic Properties of Concentrated Emulsions. Advances in Colloid Interface Science.
7. Blanco, José G., Márquez, Rosa L. y Gabay, Reinaldo. 1999. LITEDENTM agente reductor de densidad para los sistemas INTEFLOW[®] / INTOILTM. PDVSA. Intevep. Los Teques.
8. Bourgoyne Jr., Adam y Chenevert, M.E. 1991. Applied Drilling Engineering.
9. Brookey, Tom. 1998. Micro-Bubbles: New Aphron Drill-In Fluid Technique Reduces Formation Damage in Horizontal Well. SPE 39589. Louisiana.
10. Fann. 2000. [On line]. Disponible en: http://www.fann.com/product_info_main.asp
11. Hojas técnicas de las microesferas de vidrio Scotchlite de la empresa 3M.

12. Jin, L. y Chenevert, M. E. 1994. A study of particle settling in Non-Newtonian fluids - Part II: Rheological characterization of polymer solutions. Trans. of the ASME. Texas.
13. Macosko, C. W. 1994. Rheology: principles, measurements and applications. VCH Publishers. New York.
14. Manual de Baroid. 1997. [On line]. Disponible en: [http:// www.baroid.com](http://www.baroid.com)
15. Manual del Malvern Mastersizer. The basic principles of particle size analysis.
16. Manual del usuario para el reómetro Bohlin, modelo CS.
17. Manual del viscosímetro Haake. Alemania.
18. Mc Cray, Arthur W. y Cole, Frank W. 1970. Tecnología de la perforación de pozos petroleros". Compañía Editorial Continental, S.A.
19. Navarrete, R. C. 2001. New Bio-Polymer for Coiled Tubing Applications. SPE 68487. Houston.
20. Navarrete, R. C. y Seheult, J. M. 2000. New Bio-Polymers for Drilling, Drill-in, Completions, Spacer Fluids and Coiled Tubing Applications. SPE 62790. Malasia.
21. Navarrete, R. C. y Seheult, J. M. 2001. New Bio-Polymers for Drilling, Drill-in, Completions, Spacer and Coil-tubing Fluids, Part II. SPE 64982. Houston.
22. Patrick, Kenny y Bjron, Risuik. 1995. Drilling fluid guidelines. Statoil B&B BOT SOS.
23. Prieto O., Alí. 1997. Tecnología Aplicada a los Fluidos de Perforación. CIED.
24. Reómetros Bohlin 2000. [On line]. Disponible en: [http:// www.bohlinusa.com/rheometers-asp](http://www.bohlinusa.com/rheometers-asp)

25. Roca Vila, R. 1978. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. México.
26. Romay, Irán y Ortiz, Omar. 1987. Fluidos de Perforación. Programa Corporativo de Adiestramiento en Perforación. Cepet. Maraven, S.A. Cabimas.
27. Salager, Jean Lois. 1993. Emulsión. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y Recuperación de Petróleo. U.L.A. Cuaderno 232. Mérida.
28. Salager, Jean Lois. 1993. Emulsiones, propiedades y formulación. Laboratorio de Fenómenos Interfaciales y Recuperación de Petróleo. U.L.A. Cuaderno 231. Mérida.
29. ThermoHaake 1999. [On line]. Disponible en: http://www.Thermo.com/ethermo/CDA/BU_Home/BU_Homepage/0,12482,108,00.htm

APÉNDICES:

APÉNDICE A: FORMULACIÓN.

Para determinar la formulación de un sistema es necesario conocer el porcentaje en volumen del aditivo con el cual se desea trabajar.

Se trabaja con 350 cc de volumen total de fluido, el cual es el valor correspondiente a un barril de laboratorio:

$$1 \text{ Barril de Laboratorio} \rightarrow 350 \text{ cm}^3 \text{ volumen.}$$

Se considera este valor para mantener una relación con los procedimientos empleados en campo, ya que la concentración se expresa en lbm/bbl, y se puede demostrar que 1 gr de aditivo en 350 cm³ de fluido es equivalente a 1 lbm de aditivo en un barril de lodo.

Si se desea formular un fluido con X porcentaje en volumen del aditivo A, la concentración en volumen queda determinada de la siguiente manera:

$$V_A = \frac{V_T \cdot X}{100\%} \rightarrow \text{Volumen del aditivo A}$$

donde V_T es 350 cm³. Si se desea conocer la cantidad en masa del aditivo A equivalente a este volumen, se multiplica por la densidad del aditivo.

$$r_A = \frac{m_A}{V_A} \rightarrow \text{Densidad del aditivo A}$$

En nuestro caso, se determinó inicialmente la relación aceite/ agua de los sistemas base, conociendo la concentración en volumen del agua y el aceite.

Para los sistemas con microesferas de vidrio se sustituyó parte del volumen de aceite por volumen de microesferas, quedando de la siguiente manera:

Por ejemplo: Sistema O/M/W = 30/25/45

$$V_O = \frac{350cm^3 \cdot 30\%}{100\%} = 105cm^3$$

$$V_M = \frac{350cm^3 \cdot 25\%}{100\%} = 87,5cm^3$$

$$V_A = \frac{350cm^3 \cdot 45\%}{100\%} = 157,5cm^3$$

APÉNDICE B: DENSIDAD DEL FLUIDO.

Para determinar la densidad total del fluido se hace un balance de masa, se suman las masa de los aditivos que conforman el sistema para obtener la masa total.

El principio es el siguiente:

$$V_1 \cdot r_1 + V_2 \cdot r_2 + \dots + V_n \cdot r_n = V_T \cdot r_T$$

De donde despejando la densidad total se tiene lo siguiente:

$$r_T = \frac{V_1 \cdot r_1 + V_2 \cdot r_2 + \dots + V_n \cdot r_n}{V_T}$$

En el caso en donde exista más de una incógnita se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$V_1 + V_2 \dots + V_n = V_T$$

En el caso en que los volúmenes sean aditivos.

APÉNDICE C: FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL SISTEMA DEL MODELO SENCILLO DE MAXWELL.

Para un modelo sencillo de Maxwell la respuesta esfuerzo deformación tiene la siguiente expresión:

$$t' + \frac{1}{l} t = G \cdot g' \quad \rightarrow \quad (1c)$$

Para determinar la relación de transferencia empleamos la transformada de Laplace de la siguiente respuesta:

$$L\left\{\frac{d^n}{dt^n} \cdot X(t)\right\} = S^n \cdot X(S) - S^{n-1} \cdot X(0) - S^{n-2} \cdot X'(0) \dots \quad \rightarrow \quad (2c)$$

aplicando 2c a 1c, se obtiene la siguiente expresión:

$$[S \cdot t(S) - t(0)] + \frac{t}{l} = G \cdot [S \cdot g(S) - g(0)] \quad \rightarrow \quad (3c)$$

si suponemos condiciones iniciales iguales a cero, tenemos lo siguiente:

$$S \cdot t(S) + \frac{t}{l} = G \cdot S \cdot g(S) \quad \rightarrow \quad (4c)$$

agrupando los términos correspondientes obtenemos la *relación de transferencia*:

$$\frac{t(s)}{g(s)} = \frac{l \cdot G \cdot s}{l \cdot s + 1} \quad \rightarrow \quad (5c)$$

Para determinar la función de transferencia suponemos una perturbación del tipo sinusoidal del siguiente tipo:

$$g(s) = \frac{M \cdot \omega}{s^2 + \omega^2} \quad \rightarrow \quad (6c)$$

donde M y ω son la amplitud y la frecuencia de la perturbación, respectivamente. Sustituyendo 6c en 5c obtenemos la función de transferencia:

$$t(s) = \frac{M \cdot \omega \cdot l \cdot G \cdot s}{(l \cdot s + 1) \cdot (s^2 + \omega^2)} \rightarrow (7c)$$

Para determinar la respuesta en el tiempo aplicamos la transformada inversa a 7c, quedando de la siguiente manera:

$$t(t) = L^{-1}\{t(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{M \cdot \omega \cdot l \cdot G \cdot s}{(l \cdot s + 1) \cdot (s^2 + \omega^2)}\right\} \rightarrow (8c)$$

para separar en parciales la función de Transferencia se aplica el teorema del residuo:

$$\frac{s}{(l \cdot s + 1) \cdot (s^2 + \omega^2)} = \frac{A}{l \cdot s + 1} + \frac{B}{s^2 + \omega^2} + \frac{C \cdot s}{s^2 + \omega^2} \rightarrow (9c)$$

primero se calcula la constante A, para poder calcular las constantes B y C.

$$A = \frac{s}{(s^2 + \omega^2)} \Big|_{s=-\frac{1}{l}} = \frac{-l}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \rightarrow (10c)$$

sustituyendo 10c en 9c, se tiene:

$$\frac{s}{(l \cdot s + 1) \cdot (s^2 + \omega^2)} = \left(\frac{-l}{1 + \omega^2 \cdot l^2}\right) \cdot \frac{1}{l \cdot s + 1} + \frac{B}{s^2 + \omega^2} + \frac{C \cdot s}{s^2 + \omega^2} \rightarrow (11c)$$

el procedimiento para calcular las constantes restantes es el siguiente:

$$s = \frac{-l \cdot (s^2 + \omega^2)}{1 + \omega^2 \cdot l^2} + \frac{B(l \cdot s + 1)}{1 + \omega^2 \cdot l^2} + \frac{C \cdot s \cdot (l \cdot s + 1)}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \rightarrow (12c)$$

de donde se deriva el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{-l}{1 + \omega^2 \cdot l^2} + Cl = 0, \text{ despejando C se tiene: } C = \frac{1}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \rightarrow (13c)$$

$$B \cdot l + C = 1$$

$$B - \frac{l \cdot \omega^2}{1 + \omega^2 \cdot l^2} = 0, \text{ despejando B se tiene: } B = \frac{l \cdot \omega^2}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \rightarrow (14c)$$

sustituyendo 13c y 14c en 11c, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{s}{(l \cdot s + 1) \cdot (s^2 + \omega^2)} = \left(\frac{-l}{1 + \omega^2 \cdot l^2}\right) \cdot \frac{1}{l \cdot s + 1} + \frac{l \cdot \omega^2}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \cdot \frac{1}{s^2 + \omega^2} + \frac{1}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \cdot \frac{s}{s^2 + \omega^2}$$

por lo que la función de transferencia queda expresada de la siguiente manera:

$$t(s) = \left(\frac{M \cdot G \cdot l \cdot \omega}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \right) \cdot \left(\frac{-1}{l \cdot s + 1} + \frac{\omega^2}{s^2 + \omega^2} + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) \rightarrow (15c)$$

de donde:

$$t(t) = L^{-1}\{t(s)\} = L^{-1}\left\{ \frac{M \cdot \omega \cdot l \cdot G}{1 + \omega^2 \cdot l^2} \cdot \left(\frac{-1}{l \cdot s + 1} + \frac{\omega^2}{s^2 + \omega^2} + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right) \right\} \rightarrow (16c)$$

utilizando las siguientes transformadas de Laplace, se obtiene la respuesta en el tiempo:

$$L\{e^{\pm a \cdot t}\} = \frac{1}{s \mp a} \rightarrow \text{Función Exponencial}$$

$$L\{\text{sena} \cdot t\} = \frac{a}{s^2 + a^2} \rightarrow \text{Onda Sinusoidal}$$

$$L\{\text{cosa} \cdot t\} = \frac{s}{s^2 + a^2} \rightarrow \text{Onda Cosenoidal}$$

la respuesta en el tiempo es la siguiente:

$$t(t) = M \cdot G \cdot l \cdot \omega \cdot \frac{(-e^{-t/l} + \cos(\omega \cdot t) + l \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t))}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \rightarrow (17c)$$

para tiempos lo suficientemente largos el transitorio exponencial desaparece, y para simplificar suponemos una amplitud de perturbación igual a la unidad (M=1), quedando la siguiente expresión:

$$t(t) = \frac{G \cdot l \cdot \omega}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{G \cdot l^2 \cdot \omega^2}{1 + l^2 \cdot \omega^2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \rightarrow (18c)$$

Los dos términos de esta ecuación van a representar la respuesta elástica y viscosa del sistema. El término sinusoidal representa la componente elástica y el término cosinoidal representa la componente viscosa.

APÉNDICE D: RESPUESTAS DE LA PRUEBA DE OSCILACIÓN.

En una prueba de oscilación, la muestra es sometida a un esfuerzo de corte armónico con una amplitud controlada t_0 y una frecuencia angular.

$$t = t_0 \cos \omega t \quad \rightarrow \quad (1d)$$

La respuesta en deformación, también armónica, se expresa de la siguiente manera:

$$g = g_0 \cos(\omega t - d), \quad \rightarrow \quad (2d)$$

donde g_0 es la amplitud de la respuesta en deformación, que debe ser medida, y d es el desfase, que es una característica del comportamiento viscoelástico.

Esta prueba oscilatoria es de esfuerzo controlado, y para este tipo de sistema se mide la *Compliance* J y se define como:

$$J(t) = \frac{g}{t_0} = \frac{g_0}{t_0} (\cos d \cos \omega t + \sin d \sin \omega t) \quad \rightarrow \quad (3d)$$

Separando la ecuación (7) en sus componentes de *compliance* en fase o 90° fuera de fase con respecto al esfuerzo impuesto, se obtienen la *storage compliance* J' y la *loss compliance* J'' , respectivamente.

$$J' = \frac{g_0}{t_0} \cos d \quad \rightarrow \quad (4d)$$

$$y \quad J'' = \frac{g_0}{t_0} \sin d \quad \rightarrow \quad (5d)$$

Luego, el ángulo de desfase d es:

$$d = \tan^{-1} \left(\frac{J''}{J'} \right) \quad \rightarrow \quad (6d)$$

La *Compliance* dinámica compleja que agrupa los dos términos se define de la siguiente forma:

$$J^* = \frac{g^*}{t^*} = J' - iJ'' \quad \rightarrow \quad (7d)$$

El inverso de J^* es el módulo dinámico complejo $G^* \equiv G' + iG''$, cuyas componentes G' (módulo dinámico elástico) y G'' (módulo dinámico viscoso) vienen dados en términos de J' y J'' . Se puede demostrar que, en términos del esfuerzo y la deformación, los mencionados módulos dinámicos se definen así:

$$G' = \frac{t_0}{g_0} \cos d \quad \rightarrow \quad (8d)$$

y

$$G'' = \frac{t_0}{g_0} \sin d \quad \rightarrow \quad (9d)$$

Por lo que el ángulo de desfase d será:

$$d = \tan^{-1} \left(\frac{G''}{G'} \right) \quad \rightarrow \quad (10d)$$

Finalmente, la viscosidad dinámica compleja h^* está relacionada con las componentes del módulo dinámico complejo G^* y la frecuencia ω como sigue:

$$h^* = h' - i h'' = \frac{G''}{\omega} - i \frac{G'}{\omega} \quad \rightarrow \quad (11d)$$

APÉNDICE E: NORMAS API.

API 13-I: PRÁCTICA RECOMENDADA PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR PARA LAS PRUEBAS DE LABORATORIO CON FLUIDOS DE PERFORACIÓN.

10.3.4 Hornos

Existen muchos tipos de hornos disponibles en el mercado o contruidos según requerimientos del cliente, los cuales se utilizan para envejecer el fluido de perforación.

10.3.4.2 Para la efectividad del envejecimiento, es esencial mantener una circulación de aire dentro de los hornos, asegurando así una distribución uniforme de la temperatura.

10.3.4.3 Los hornos pueden haber sido diseñados para operar a temperaturas desde 150F (65 C) hasta 500 F (260 C).

10.3.4.4 Los hornos pueden ser estáticos o estar equipados con rodillos o sistemas de poleas para dar vueltas a las jarras o celdas o rotar las celdas sujetadas dentro del horno.

PRECAUCIÓN: Los hornos utilizados con los fluidos de base aceite no deben tener elementos de calentamiento al descubierto que puedan causar ignición de los materiales combustibles en el caso de una fuga de la muestra.

10.7 Procedimiento- envejecimiento a elevadas temperaturas por encima de 150 F (65 C).

10.7.1 Recipientes de preparación y almacenamiento

Las muestras de fluidos de perforación a ser envejecida a temperaturas significativamente elevadas se mezclan generalmente a temperaturas ambiente como se describe en 20.3.2 a 20.4.

10.7.1.1 las cantidades adicionales de componentes pre-existentes o materiales nuevos diseñados para aumentar la estabilidad a elevadas temperaturas se pueden agregar a las lechadas que ya han sido envejecidas a temperatura ambiente o elevada.

10.7.1.2 Una vez que se cruza el umbral de 150 F (65 C, solamente se pueden utilizar las celdas de metales adecuados, como se explica en 20.2.2.3

10.7.2 Envejecimiento

10.7.2.1 La temperatura de envejecimiento con frecuencia se selecciona cerca de la temperatura de fondo esperada y cerca de la temperatura esperada para las aplicaciones donde se utilizan sistemas o aditivos específicos. Las celdas de envejecimiento deberán ser construidas de manera tal que puedan cumplir o superar los requerimientos de temperatura y presión de los parámetros de pruebas de envejecimiento.

10.7.2.3 El mayor porcentaje del envejecimiento de los fluidos de perforación entre 150 F y 400 F (65 C y 190 C) se lleva a cabo en celdas construidas con diferentes grados de acero inoxidable (303, 304 o 316, pero no 314).

10.7.2.6 Una consideración clave en el uso de las celdas metálicas a altas temperaturas es el cuidado de no rebosar las celdas.

10.7.2.6.1 Cuando el líquido encerrado se expande con el aumento de la temperatura, un espacio insuficiente de gas (aire) puede conducir el efecto de pistón, pues el líquido ejerce presión hidráulica contra la tapa de la celda.

10.7.2.6.2 Dejar un espacio de 1,5-2 pulgadas (40-50 milímetros) entre el líquido y la tapa de la celda (o no rellenar más allá de 85-90 por ciento del volumen de la celda) parece ser una medida adecuada para lograr la

operación segura bajo condiciones de envejecimiento entre 150 y 400 F (65 y 190 C).

10.7.2.7 Si se ha establecido una combinación perfecta entre la metalurgia de la celda y el fluido de perforación para una cierta temperatura elevada, la muestra puede ser envejecida en un horno, de manera estática o dinámica, como se describe en 20.5.3.

10.7.2.8 El envejecimiento dinámico se debe realizar en hornos de rolado que puedan alcanzar y mantener, de manera segura, temperaturas de 150-400 F (65-190 C). Generalmente se recomienda un tiempo de 16 horas. Dependiendo de la estabilidad del producto (o productos) en estudio, se pueden ajustar el tiempo y la temperatura.

10.7.2.10 Para los pozos de altas temperaturas [>300 F (>135 C)], el intervalo usual de 16 horas de envejecimiento permite una simulación razonable para una viaje de la mecha. Para operaciones más largas, como durante corridas prolongadas de perfilaje eléctrico, es más apropiado trabajar con periodos de envejecimiento de 48 a 72 horas.

10.7.2.11 Al seleccionar una temperatura de prueba es necesario recordar que el fluido que se deja en el hoyo puede requerir muchas horas para acercarse a la temperatura de fondo real. Los pozos son enfriados por el fluido circulante. Por lo tanto, una temperatura de prueba menor que la de fondo puede ser una simulación más realista de las condiciones de fondo, para períodos de viajes con mechas.

API 13-1: PRÁCTICA RECOMENDADA PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR PARA LAS PRUEBAS DE CAMPO CON FLUIDOS DE PERFORACIÓN DE BASE AGUA.

2.1 Peso del lodo (Densidad)

2.2 Descripción

Este procedimiento es un método para la determinación del peso de un cierto volumen de líquido. El peso del lodo se puede expresar en libras por galón (lb/gal), libras por pie cúbico (lb/ft³), gramos por centímetro cúbico (g/cm³) o kilogramos por metro cúbico (kg/m³).

2.3 Equipo

Se requiere el equipo siguiente:

- a. Se puede utilizar cualquier instrumento de suficiente precisión como para permitir la medición dentro de $\pm 0,1$ libras por galón (o 0,5 libras por pie cúbico, 0,01 gramos por centímetro cúbico o 10 kilogramos por metro cúbico). La balanza de lodo (Fig. 1 y 2) es el instrumento que generalmente se emplea para la determinación del peso del lodo. Esta balanza se encuentra diseñada de manera tal que la taza de lodo, en un extremo del brazo, se encuentra equilibrada por un contrapeso fijo ubicado en el otro extremo, como una guía deslizante que se mueve libremente a lo largo de una escala graduada. Una burbuja de nivel se encuentra en el brazo, para permitir un equilibrio preciso (cuando sea necesario, se pueden emplear extensiones para aumentar el alcance de la balanza).
- b. Termómetro: 32-220 F (0-105 C)

2.4 Procedimiento

El siguiente es el procedimiento de prueba que se aplicará:

- a. La base del instrumento debe estar bien asentada sobre una superficie plana y pareja.
- b. Mida la temperatura del lodo y regístrela en la planilla del Informe de Lodos de Perforación.
- c. Llene la taza, que deberá estar limpia y seca, con el lodo a ser sometido a prueba. Ahora tape la taza llena y gire la tapa hasta que quede bien asentada. Asegúrese que parte del lodo sea expulsado a través del orificio en la tapa, para así poder liberar el aire o gas que haya quedado atrapado.
- d. Manteniendo la tapa firmemente sobre la taza de lodo (con el orificio cubierto), lave o frote la parte exterior de la taza, para limpiar, y después séquela.
- e. Coloque el brazo sobre el soporte de la base y equilibrelo moviendo la guía a lo largo de la escala graduada. El equilibrio se logra cuando la burbuja se encuentra bajo la línea central.
- f. Lea el peso del lodo en la guía, hacia la taza de lodo. Si utiliza extensiones de la escala, haga las correcciones apropiadas.

3.4 Viscosímetro De Lectura Directa

3.4.1 Equipo

- a. Los viscosímetros de lectura directa son instrumentos rotatorios accionados por un motor eléctrico o una manivela (acción manual). El fluido de perforación se coloca en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos. El cilindro exterior o forro rotor es accionado a una velocidad de rotación constante (revoluciones por minuto). La rotación del forro rotor en el fluido produce torque en el cilindro

interior o carrete. Un resorte de torsión limita el movimiento de dicho carrete, y un cuadrante unido al mismo indica su desplazamiento.

Las constantes del instrumento se han ajustado de manera tal que se pueda obtener la viscosidad plástica y el punto de cedencia utilizando las lecturas para velocidades alcanzadas por el forro rotor iguales a 300 y 600 revoluciones por minuto.

Especificaciones – Viscosímetro de lectura directa

1. Forro rotor:

Diámetro interior: 1,450 pulgadas (36,83 milímetros)

Longitud total: 3,425 pulgadas (87,00 milímetros)

Línea de referencia: 2,30 pulgadas (58,4 milímetros)

Estas dimensiones son por encima del forro del tamiz.

Dos hileras de orificios de 1/8 pulgadas (3,18 milímetros) separados 120 grados (2,09 radianes), alrededor del forro rotor, justo por debajo de la línea de referencia.

2. Carrete:

Diámetro: 1,358 pulgadas (34,49 milímetros)

Longitud del cilindro: 1,496 pulgadas (38,00 milímetros)

El carrete posee una base plana y su parte superior es cónica

3. Constante de torsión del resorte: 386 dinas-centímetro/grado de deflexión

4. Velocidades del rotor

Alta velocidad: 600 revoluciones por minuto

Baja velocidad: 300 revoluciones por minuto

3.4.2 Procedimiento

PRECAUCION: La temperatura máxima de operación es de 200 F (93 C). Si se van a someter a prueba fluidos por encima de 200 F (93 C), es necesario emplear un carrete de metal sólido o hueco con un carrete de metal sólido o hueco con un interior completamente seco. El líquido atrapado dentro de un carrete hueco puede evaporarse al ser sumergido en un fluido a alta temperatura y hacer que el carrete explote.

El procedimiento es el siguiente:

- a. Coloque la muestra en el recipiente y sumerja el forro rotor exactamente hasta la línea de referencia. Las mediciones en el campo deberán realizarse con una demora mínima (menos de cinco minutos, si es posible) y una temperatura lo más cercana posible a la del lodo en el sitio donde se tomó la muestra [no deberá tener una diferencia mayor de 10 F (6 C)]. El lugar donde se tomó la muestra deberá ser especificado en el informe.
- b. Registre la temperatura de la muestra.
- c. Con el forro rotando a 600 revoluciones por minuto, espere hasta que la lectura del cuadrante alcance un valor estable (el tiempo requerido depende de las características del lodo). Registre la lectura del cuadrante para 600 revoluciones por minuto.
- d. Cambie ahora a 300 revoluciones por minuto y espere que la lectura del cuadrante llegue a un valor estable. Registre la lectura.
- e. Agite la muestra del fluido de perforación durante 10 segundos a alta velocidad.
- f. Permita que la muestra del fluido de perforación repose durante 10 segundos. De manera lenta y firme, gire volante en la dirección que arroja una lectura positiva en el cuadrante. La lectura máxima será la resistencia gel inicial. Para instrumento que tengan una velocidad

de 3 revoluciones por minuto, la lectura máxima obtenida después de iniciar la rotación a 3 revoluciones por minutos, es la resistencia gel inicial. Registre la resistencia gel inicial (gel de 10 seg.) en libras por 100 pies cuadrados (Pascales).

- g. Vuelva a agitar la muestra del fluido de perforación a alta velocidad y durante 10 segundos. Ahora permita que el lodo repose durante 10 minutos. Repita las mediciones como se indica en 4.3.2, punto f, y registre la lectura máxima como gel de 10 minutos en libras por 100 pies cuadrados (Pascales).

3.4.3 Cálculos

Se utilizarán los siguientes cálculos:

Viscosidad Plástica, $cp = [\text{lectura para 600 rpm}] - [\text{lectura para 300 rpm}]$

Punto de Cedencia, $lb/100 \text{ ft}^2 = [\text{lectura para 300 rpm}] - \text{Viscosidad Plástica}$

Viscosidad Aparente, $cp = [\text{lectura para 600 rpm}] / 2$

4.1 Filtración

4.2 Descripción

La medición del comportamiento de filtración y las características de la formación del revoque de lodo son fundamentales para el control y tratamiento de los fluidos de perforación, así como también lo son las características del filtrado, como el contenido de aceite, agua o emulsión.

Estas características se ven afectadas por los tipos y cantidad de sólidos en el fluido y sus interacciones físicas y químicas, las cuales, a su vez, son afectadas por la temperatura y la presión. Por lo tanto, las pruebas se realizan en condiciones de baja presión/baja temperatura y alta

presión/alta temperatura, y cada una requiere equipos y técnicas diferentes.

4.3 Prueba A Baja Temperatura /Baja Presión

4.3.1 Equipo- Prueba a baja temperatura baja presión

Se requiere el equipo siguiente para la prueba de baja temperatura /baja presión:

- a. Un filtro prensa: este consiste, fundamentalmente, en una celda cilíndrica para lodos con una diámetro interior de 3 pulgadas (76,2 milímetros) y una altura de, por lo menos, 2,5 pulgadas (64,0 milímetros). Esta cámara es de materiales resistentes a las soluciones sumamente alcalinas y está equipada de manera tal que se le puede introducir cómodamente un medio de presión y la cámara se purga desde arriba. Su estructura es tal que se puede colocar una hoja de papel filtro de 9 centímetros en el fondo de la cámara, justo sobre un soporte apropiado. El área de filtración es de $7,1 \pm 0,1$ pulgadas cuadradas (4580 ± 60 milímetros cuadrados). Por debajo del soporte se encuentra el tubo de drenaje, para la descarga del filtrado en un cilindro graduado.

La obturación se logra con empaaduras, y todo el ensamblaje se apoya en una base tipo pedestal.

4.3.2 Procedimiento – Prueba a Baja Presión – Baja Temperatura

El siguiente es el procedimiento de la prueba de baja temperatura / baja presión:

- a. Asegúrese de que cada pieza de la celda, especialmente la rejilla, esté limpia y seca, y que las empaaduras no estén deformes o

gastadas. Vierta la muestra de lodo en la celda hasta $\frac{1}{2}$ de pulgada (13 milímetros) de la parte superior de la celda (para minimizar la contaminación del filtrado con CO₂) y complete el ensamblaje con el papel de filtro en su lugar.

- b. Coloque un cilindro graduado seco por debajo del tubo de drenaje, para que reciba el filtrado. Cierre la válvula de alivio y ajuste el regulador de manera tal que se aplique una presión de 100 ± 5 psi (690 ± 35 kilopascales) en 30 segundos o menos. El periodo de la prueba se inicia en el momento de la aplicación de la presión.
- c. Al final de los 30 minutos, mida el volumen de filtrado. Interrumpa el flujo que pasa por el regulador de presión y abra cuidadosamente la válvula de alivio. El intervalo de tiempo, si no es de 30 segundos, deberá registrarse.
- d. Registre el volumen de filtrado en centímetros cúbicos (con una precisión de 0,1 centímetros cúbicos) como filtrado API, y también registre la temperatura inicial del lodo en F (C). Guarde el filtrado para ser posteriormente sometido a las correspondientes pruebas químicas.
- e. Saque la celda de su soporte, asegurándose primero de que se haya liberado toda la presión. Con extremo cuidado para guardar el papel de filtro sin perturbar el revoque, desmonte la celda y deseche el lodo. Lave el revoque sobre el papel, con un chorro de agua suave.
- f. Mida y registre el espesor del revoque con una precisión de $1/32$ de pulgada (0,8 milímetros).
- g. Si bien las descripciones del revoque suelen ser subjetivas, anotaciones como “duro”, “blando”, “gomoso”, “firme”, etc. Pueden transmitir información importante sobre la calidad de dicho revoque.

8.1 pH

8.2 Descripción

Las mediciones del pH de los fluidos de perforación (o del filtrado), que se realizan en el campo, y los ajustes a ese mismo pH, son fundamentales para el control de dichos fluidos de perforación. Las interacciones de las arcillas, la solubilidad de los diferentes componentes y contaminantes y la efectividad de los aditivos, así como el control de los procesos de corrosión por sulfuro y ácidos, dependen del pH.

Anexos

ANEXO 1: DIÁMETRO DE GOTA PARA LOS SISTEMAS DE LA PRIMERA Y SEGUNDA PARTE

Formulación O/W	Formulación O/M/W	D [4,3] um	D [3,2] um	D (v, 0.1) um	D (v,0.5) um	D (v,0.9) um
70/30		3,31	2,10	1,31	2,29	3,86
70/30 Envejecido		2,93	2,17	1,35	2,33	4,12
	60/10	6,74	2,26	1,30	2,51	13,54
	60/10 Envejecido	8,24	2,45	1,32	2,68	27,38
	55/15	2,48	2,07	1,31	2,27	3,78
	55/15 Envejecido	10,66	2,75	1,42	2,77	37,53
	50/20	11,44	2,50	1,27	2,63	42,75
	50/20 Envejecido	27,53	4,83	1,62	27,87	58,67
	45/25	13,66	2,94	1,47	2,94	45,95
	45/25 Envejecido	17,63	3,39	1,54	3,59	53,73
	40/30	14,41	2,79	1,35	2,93	46,33
	40/30 Envejecido	18,75	3,31	1,47	3,62	55,68
	40/30 (2)	19,48	3,29	1,48	3,53	57,46
	40/30 Envejecido(2)	22,69	3,94	1,60	6,56	60,02
	30/40	23,53	3,61	1,43	12,60	58,53
	30/40 Envejecido	26,94	4,79	1,71	20,93	62,53
	25/45	29,36	4,39	1,52	28,88	63,78
	25/45 Envejecido	30,11	4,85	1,62	28,27	65,80
65/35		2,54	2,10	1,33	2,30	3,75
65/35 Envejecido		3,51	2,15	1,31	2,35	4,27
	50/15	12,34	2,60	1,36	2,77	46,17
	50/15 Envejecido	8,49	2,73	1,42	2,86	27,73
	45/20	13,59	2,83	1,42	3,12	49,23
	45/20 Envejecido	13,52	2,89	1,42	3,19	47,91
	40/25	15,66	3,14	1,48	3,62	51,84
	40/25 Envejecido	14,61	3,27	1,51	3,79	46,76
	35/30	16,27	3,33	1,49	4,03	49,77
	35/30 Envejecido	16,40	3,37	1,45	4,30	48,35
	35/30 (2)	14,77	2,98	1,40	2,98	45,41

	35/30 Envejecido(2)	19,94	3,73	1,63	4,29	57,62
	30/35	22,75	3,63	1,50	4,40	60,01
	30/35 Envejecido	36,08	12,71	10,66	34,66	62,40
60/40		2,47	2,13	1,37	2,32	3,77
60/40 Envejecido		2,77	2,22	1,39	2,43	4,20
	55/5	4,29	2,18	1,30	2,40	4,50
	55/5 Envejecido	5,25	2,30	1,36	2,49	4,99
	50/10	7,49	2,40	1,33	2,62	23,84
	50/10 Envejecido	9,66	2,54	1,37	2,74	34,87
	45/15	4,26	2,49	1,42	2,84	5,80
	45/15 Envejecido	10,54	2,98	1,48	3,31	37,42
	40/20	13,78	2,84	1,35	3,25	48,46
	40/20 Envejecido	10,26	2,71	1,32	3,11	37,01
	40/20 (2)	14,36	2,99	1,43	3,45	50,82
	40/20 Envejecido (2)	20,41	4,01	1,61	6,37	54,75
	30/30	21,65	3,37	1,40	3,92	59,41
	30/30 Envejecido	21,20	3,59	1,49	4,44	58,15
55/45		3,11	2,36	1,40	2,69	5,07
55/45 Envejecido		4,64	2,46	1,41	2,76	5,84
	50/5	5,14	2,22	1,31	2,39	4,99
	50/5 Envejecido	*	*	*	*	*
	45/10	6,48	2,35	1,31	2,54	17,81
	45/10 Envejecido	*	*	*	*	*
	40/15	13,22	2,70	1,34	2,98	49,32
	40/15 Envejecido	*	*	*	*	*
	35/20	14,75	2,91	1,38	3,06	49,23
	35/20 Envejecido	13,65	3,06	1,43	3,60	47,72
	25/30	26,23	3,56	1,31	17,16	64,32
	25/30 Envejecido	25,35	3,57	1,32	16,12	62,24
50/50		2,8	2,24	1,34	2,54	4,59
50/50 Envejecido		3,17	2,30	1,32	2,62	5,32
	45/5	6,03	2,23	1,25	2,48	5,80
	45/5 Envejecido	*	*	*	*	*
	40/10	9,54	2,41	1,27	2,61	36,46

40/10 (2)	9,58	2,41	1,28	2,59	38,52
40/10 Envejecido	8,17	2,59	1,36	2,84	28,92
35/15	15,79	2,82	1,33	3,00	53,46
35/15 (2)	15,04	2,94	1,34	3,38	50,43
35/15 Envejecido	*	*	*	*	*
30/20	16,25	2,71	1,25	2,93	54,39
30/20 Envejecido	19,32	3,04	1,31	3,48	57,39
25/25	22,57	3,49	1,39	5,01	60,44
25/25 Envejecido	*	*	*	*	*

* La emulsión fue inestable por lo que no se realizó la medición

O= % de aceite

W= % de agua

M= % de microesferas