

**CARACTERIZACION REOLOGICA DE UN FLUIDO DE
FRACTURAMIENTO Y MANUAL DE OPERACIONES DEL
VISCOSIMETRO VISCO 88 DEL LABORATORIO DE PRUEBAS
ESPECIALES EN LA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**ANDRÉS MAURICIO CHARRY VILLALBA
RODRIGO ANDRÉS GUALY**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA – HUILA
2008**

**CARACTERIZACION REOLOGICA DE UN FLUIDO DE
FRACTURAMIENTO Y MANUAL DE OPERACIONES DEL
VISCOSIMETRO VISCO 88 DEL LABORATORIO DE PRUEBAS
ESPECIALES EN LA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**ANDRÉS MAURICIO CHARRY VILLALBA
RODRIGO ANDRÉS GUALY**

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título

de:

INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director:

LUIS FERNANDO BONILLA CAMACHO

Ingeniero de petróleos

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
NEIVA – HUILA**

2008

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Los autores del presente trabajo desean dedicarlo sinceramente:

Quiero dedicar este proyecto a Dios por haberme dado la tranquilidad, sabiduría, entendimiento y permitirme alcanzar una de las metas más importantes en mi vida, llegar a ser un profesional.

Quiero dedicar también este proyecto a mis padres Hernán y Gladys Yolanda quienes me dieron la oportunidad hermosa de vivir, además me han apoyado en todas las decisiones que he tomado en la vida, a mis hermanos Yuly, Sandra y Marvin quienes me ofrecen su apoyo incondicional, consejos y son fuente de fortaleza y amor. Al cuñado Jairo Sepúlveda por su gran apoyo, motivación e inspiración para mí; a la alegría y dulzura que me inspiraron mis sobrinos Jairo Hernán, Paula Andrea y María José; a mis familiares que me recuerdan lo importante que soy para ellos y para las demás personas. A todas aquellas personas que hicieron parte de mi formación académica, disciplinaria, religiosa y moral y me permitieron lograr todas las metas trazadas durante mi vida.

Finalmente a mis amigos Mauricio Charry, Jaime Amariz, Juan Pablo Vaca, Karol Trujillo, Diana Hernandez, Angela Ortiz, Oscar González, Leonardo

Cuellar y Mary Luz Arias mompirris incondicionales durante toda la carrera que son y serán parte importante en mi vida.

Rodrigo Andrés Gualy Martínez

Dedico este trabajo a mi madre Maritza Villalba Cruz (Q.E.P.D.) forjadora y fuente de inspiración para este y muchos otros logros de mi vida, a mi hermano Leonel Sanoni Charry, mi abuela Gilma Cruz de Villalba, mis tías Astrid Villalba, Mireya Villalba y Nohora de Iregui por su interminable apoyo, mis primos Andrés Parra, Camilo Garaviño y Jhon Villalba por su amistad y compañía en los momentos de dificultad.

También dedico este trabajo a mis amigos Sergio Roldan, William Zapata, Ingris Mendoza, Freddy Narváez, Rodrigo Gualy y Hernán Corredor por haber compartido conmigo años de continua formación académica y ética.

Por ultimo dedico este proyecto de grado a todos los que de alguna u otra manera me han apoyado o han creído en mí y no han sido nombrados.

Andrés Mauricio Charry

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus más sinceros agradecimientos a:

Manifestamos nuestros más sinceros agradecimientos a la **Universidad Surcolombiana** que ha inculcado a sus estudiantes principios éticos que sirven como pilares para formar profesionales excelsos, teniendo como base la educación que hacen dentro de la institución.

Queremos dar gracias a los profesores que de una u otra manera aportaron al desarrollo del proyecto, entre ellos están: **Jairo Sepúlveda, Luis Fernando Ramon Bonilla, Luis Humberto Ordúz**, y a cada uno de los que participaron en el transcurso de nuestra vida universitaria, ya que sin la guía brindada por ellos no se hubiese podido lograr la consecución de los objetivos del documento.

Rodrigo Andrés Gualy / Andrés Mauricio Charry

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	
1. REOLOGÍA	1
1.1. Comportamiento de flujo y viscosidad.	1
1.1.1. Esfuerzo de corte.	2
1.1.2. Rata de corte.	2
1.1.3. Viscosidad.	3
1.2. Variación de la viscosidad con el tiempo.	4
1.2.1. Comportamiento tiempo dependiente de muestras que no presentan endurecimiento.	4
1.2.2. Comportamiento tiempo dependiente de muestras que presentan endurecimiento.	6
1.3. Comportamiento de flujo dependiente de la temperatura.	7
1.3.1. Comportamiento dependiente de la temperatura con muestras que no presentan endurecimiento.	8
1.3.2. Comportamiento dependiente de la temperatura con muestras que presentan endurecimiento.	8
1.4 Comportamiento de flujo dependiente de la presión.	9
1.5 Comportamiento de flujo dependiente de la velocidad de deformación.	10
1.5.1. Fluidos newtonianos.	10
1.5.2. Fluidos pseudoplásticos o shear thinning.	12

1.5.3.	Fluidos dilatantes o shear thickening.	13
1.5.4.	Fluidos con esfuerzo de cedencia o yield point.	15
2.	REOMETRIA	18
2.1.	Pruebas con rata de corte controlada.	18
2.1.1.	Curvas de flujo y viscosidad.	18
2.1.2.	Curvas de viscosidad vs tiempo.	20
2.1.3.	Descomposición y regeneración estructural.	22
2.1.4.	Curvas de flujo con área de histéresis.	25
2.1.5.	Curvas de viscosidad vs temperatura.	27
2.2.	Pruebas con esfuerzo de corte controlado.	27
2.2.1.	Curvas de flujo y viscosidad.	28
2.2.2.	Curvas de viscosidad vs tiempo.	28
2.2.3.	Descomposición y regeneración estructural.	30
2.2.4.	Curvas de flujo con histéresis.	32
2.2.5.	Curvas de viscosidad vs temperatura.	33
3.	MODELOS NUMERICOS BASICOS QUE POSEE EL VISCOSIMETRO BOHLIN VISCO 88.	34
3.1.	Funciones de aproximación.	34
3.1.1.	Modelo para fluidos newtonianos.	34
3.1.2.	Modelo para fluidos pseudoplasticos y dilatantes.	34
3.1.3.	Modelos para comportamiento de fluidos que incluyen corte cero y corte infinito.	35
3.1.4.	Modelos de curvas incluyendo esfuerzo de cedencia.	36

4.	RESUMEN DE LA NORMA API RP 39 SEGUNDA EDICIÓN DE PROCEDIMIENTOS ESTÁNDAR PARA LA EVALUACIÓN DE FLUIDOS DE FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO	38
4.1	Sinopsis.	38
4.2	Norma API RP 39.	38
4.2.1	Sección 1: Preparación de la muestra de fluido de fracturamiento.	38
4.2.2	Sección 2: Medición de las propiedades hidráulicas.	39
4.2.3	Sección 3: Prueba de suspensión estática de propante.	39
4.2.4	Sección 4: Pour point y flash point.	40
4.2.5	Sección 5: Pruebas de pérdida de fluido y daños en la permeabilidad de la matriz.	40
4.2.6	Sección 6: Compatibilidad de los fluidos de fracturamiento con los fluidos de formación.	41
4.2.7	Apendice A: Perdidas de fricción a través de tuberías, anular y fracturas.	41
5.	COMPARACION ENTRE LA NORMA API RP 39 Y SU ANALOGIA CON EL VISCOSIMETRO BOHLIN VISCO 88.	42
5.1	Aplicabilidad de la norma API RP 39 al viscosímetro Bohlin Visco 88.	42
5.2	Equipos.	42
5.3	Procedimientos.	43
5.4	Análisis de datos.	43
5.4.1	Caso 1: Fluido newtoniano.	44
5.4.2	Caso 2: Fluido no newtoniano.	44
5.4.3	Caso 3: Fluidos tipo bingham.	45
5.4.4	Cálculos con los resultados obtenidos.	45

6.	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DEL VISCOSÍMETRO BOHLIN VISCO 88.	47
6.1	Descripción general del equipo.	47
6.2	Partes del viscosímetro.	48
6.3	Montajes que se pueden hacer para correr diferentes pruebas en el viscosímetro Bohlin Visco 88.	54
6.3.1	Generalidades.	54
6.3.2	Montaje para pruebas a temperatura ambiente.	54
6.3.3	Montaje para pruebas con temperaturas superiores a la temperatura ambiente.	56
6.3.4	Montaje para pruebas con temperaturas inferiores a la temperatura ambiente.	57
6.4	Procedimientos para realizar ensayos con el viscosímetro Bohlin Visco 88.	58
6.4.1	Generalidades.	58
6.4.2	Distintas pruebas que se pueden correr con el viscosímetro Bohlin Visco 88.	59
6.4.2.1	Pruebas manuales.	59
6.4.2.2	Pruebas sistematizadas.	63
6.4.2.2.1	Curvas de flujo y viscosidad.	64
6.4.2.2.2	Prueba de regeneración estructural.	75
6.4.2.2.3	Pruebas de histéresis.	92
7.	REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE LABORATORIO CON EL VISCOSÍMETRO BOHLIN VISCO 88.	102
7.1	Generalidades.	102
7.2	Fluido LAPE 001	103
7.3	Fluido LAPE 002	107
7.4	Fluido LAPE 003	112
7.5	Fluido LAPE 004	116

8.	VALIDACION TECNICA DEL VISCOSIMETRO BOHLIN VISCO 88 Y CARACTERIZACION DE LOS FLUIDOS DE FRACTURAMIENTO.	120
	8.1 Generalidades.	120
	8.2 Fluido LAPE 001.	120
	8.3 Fluido LAPE 002.	129
	8.4 Fluido LAPE 003.	137
	8.5 Fluido LAPE 004.	146
9.	CONCLUSIONES	155
10.	RECOMENDACIONES	156

INTRODUCCIÓN

El fracturamiento hidráulico se ha convertido en una práctica con mucho auge en la actualidad debido a la necesidad de aumentar la productividad de los pozos productores de petróleo que tienen las compañías operadoras en Colombia, es por ello que se requiere un extremo cuidado operacional durante la ejecución de dichas prácticas, tanto como en el manejo de las propiedades en fondo como las de superficie, sin embargo una de las mas importantes durante estas operaciones, son las propiedades reológicas de los fluidos de fracturamiento.

Es en esta parte donde se hace de vital importancia la caracterización de los fluidos de fracturamiento hidráulico para poder sostener un buen manejo operacional durante la ejecución de las pruebas y así garantizar la efectividad de estos trabajos. Los fluidos de fracturamiento hidráulico deben tener determinadas condiciones y propiedades antes de ser usados, y es por eso que se crea la norma API RP 39 con el fin de estandarizar los procedimientos y determinar las propiedades que se necesitan conocer y controlar durante dichas operaciones.

Durante el desarrollo de este proyecto se darán a conocer las pruebas estándar que se utilizan para determinar las propiedades de los fluidos de fracturamiento hidráulico, incluyendo los equipos, los procedimientos y las distintas formas de manejar la información obtenida. También se presentará un sistema análogo de desarrollar las pruebas incluidas en la norma API RP 39, el cual incluye los procedimientos operacionales y los alcances que puede alcanzar un sistema diferente al mencionado por dicha norma, en este

proyecto el sistema análogo hace referencia a un viscosímetro no estándar (viscosímetro Bohlin Visco 88) el cual puede conseguir de manera mas precisa las mismas propiedades obtenidas con un viscosímetro estándar (viscosímetro Fann 35). Como parte final durante la lectura del presente proyecto se encontrarán además de los usos que le puede dar la norma API RP 39, otros usos que también son de vital importancia durante la determinación de las propiedades de los fluidos de fracturamiento hidráulico, dichos usos hacen referencia a las curvas de caracterización de fluido, las cuales son muy útiles a la hora de la preparación de los fluidos de fracturamiento y a la hora de predecir comportamientos de un fluido en el fondo del pozo.

Capítulo 1. Reología

1. Reología

La reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes, por ejemplo. La palabra reología proviene del griego “rheos” cuyo significado tiene que ver con “el río”, “fluyendo”, “corriente”, así que etimológicamente la reología es la ciencia del flujo. De cualquier manera los experimentos reológicos no solamente revelan información acerca del comportamiento de flujo de los líquidos sino que también proporciona información sobre el comportamiento de deformación de los sólidos.

Para poder comprender a fondo la reología se hace necesario conocer algunos conceptos básicos como viscosidad, esfuerzo de corte y tasa de corte.

1.1 Comportamiento de flujo y viscosidad

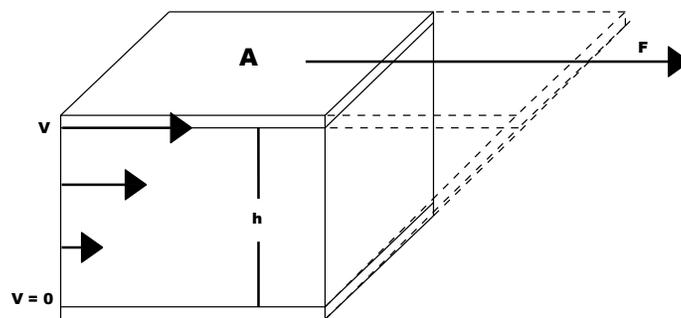


Figura 1. El modelo de los platos

Suponiendo que la figura superior son dos platos que contienen un líquido, y se aplica una fuerza F en el plato superior, se genera automáticamente una velocidad

v que va disminuyendo hasta llegar al plato inferior, el cual tiene una velocidad $v=0$, asumiendo que el plato inferior no se deslizará.

De la figura anterior, se pueden explicar algunos conceptos siempre y cuando tengamos en cuenta que para explicar dichos conceptos se hace necesaria una condición:

- El flujo resultante es un flujo laminar formado entre ambas capas.

1.1.1 Esfuerzo de corte

La definición matemática de esfuerzo de corte es:

$$\tau = F/A \quad (E-1)$$

Donde:

F, es la fuerza aplicada, está dada en [N]

A, superficie areal, está dada en [m²]

τ , esfuerzo de corte, está dado en [N/m²] o [Pas]

1.1.2 Rata de corte

La definición matemática de la rata de corte es:

$$\gamma = v/h \quad (E-2)$$

Donde:

La velocidad v esta dada en [m/s].

La altura h esta dada en [m].

La rata de corte γ tiene por unidades [1/s].

1.1.3 Viscosidad

La *viscosidad* se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Dicho concepto se introdujo en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (E-3)$$

Donde,

τ : esfuerzo cortante [mPa].

μ : Viscosidad [mPa·s]

γ : Velocidad de deformación [s^{-1}]

La tabla siguiente es una aproximación del valor de la viscosidad para sustancias muy conocidas a temperatura y presión ambientales:

Tabla 1. Valores de viscosidad para diferentes sustancias

Fluidos	Viscosidad aproximada (mPa·s)
Vidrio	10^{43}
Vidrio Fundido	10^{15}
Betún	10^{11}
Polímeros fundidos	10^6
Miel líquida	10^4
Glicerol	10^3
Aceite de oliva	10^2
Agua	10^0
Aire	10^{-2}

Existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

La viscosidad dinámica o absoluta, denominada " μ " se ha visto anteriormente en la ecuación 3(E-3). Si se representara la curva de flujo (esfuerzo de corte frente a velocidad de deformación) se define también como la pendiente en cada punto de dicha curva.

En cambio, la viscosidad aparente " μ " se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de "viscosidad" para fluidos no newtonianos.

Por último existe otro término de viscosidad " ν " denominado *viscosidad cinemática*, que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido analizado. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst].

1.2 Variación de la viscosidad con el tiempo

El comportamiento de la viscosidad a través del tiempo se debe realizar sosteniendo las condiciones de la prueba de manera constantes para luego proceder a realizar el respectivo análisis en intervalos de tiempo t .

1.2.1 Comportamiento tiempo-dependiente de muestras que no presentan endurecimiento

- *Comportamiento tixotrópico*

El termino tixotropía es de origen griego y no es tan sencillo de traducir, esta compuesto por 2 palabras, la primera es thixis que significa agitación, sacudidas, contacto y la segunda palabra trepein o trepo que significa inflexión, cambio,

transformación, así que reológicamente tixotropía puede ser descrito como el cambio que hay debido a la pérdida de resistencia de un material por efecto de una carga mecánica, y su posterior recuperación con el tiempo en un proceso isotérmico.

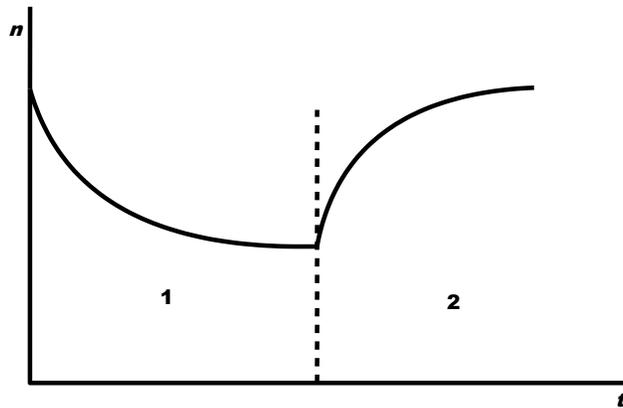


Figura 2. Curva de viscosidad de un material tixotrópico. (1) descomposición estructural tiempo-dependiente durante un alto esfuerzo constante. (2) Regeneración estructural tiempo-dependiente en la etapa de descanso.

El comportamiento tixotrópico se presenta solo cuando se cumplen las siguientes dos condiciones:

- Cuando ambas etapas o fases, la de descomposición y la de regeneración, son tomadas en cuenta.
- Cuando la prueba se desarrolla a un esfuerzo de corte constante para cada intervalo de tiempo en cada etapa o fase.
- *Comportamiento no tixotrópico*

El comportamiento no tixotrópico se puede observar en fluidos que muestren un comportamiento dependiente del tiempo y su fase de regeneración no permite que el fluido recupere las propiedades reológicas iniciales después de un largo tiempo de descanso. Para efectos prácticos se puede decir que este comportamiento a esfuerzos de corte constantes, presentan un cambio irreversible en la estructura

del fluido. Es muy común en estos casos expresar matemáticamente la regeneración parcial que presenta un fluido de este tipo en un porcentaje de recuperación comparándolo con las propiedades iniciales.

- *Comportamiento reopéctico*

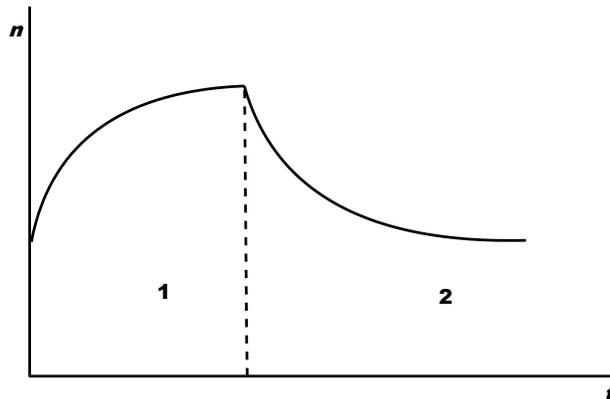


Figura 3. Curva de viscosidad de un material reopéctico. (1) Aumento tiempo-dependiente en la fuerza estructural de un fluido aplicando un alto esfuerzo constante. (2) Decrecimiento tiempo-dependiente en la fuerza estructural de material durante la fase de descanso.

Este tipo de comportamiento se presenta cuando se observa un aumento en la fuerza estructural y las propiedades reológicas del fluido durante la fase de carga del esfuerzo y una lenta o rápida fase de descomposición de la fuerza estructural en un periodo subsiguiente de tiempo sin carga o periodo de descanso.

1.2.2 Comportamiento tiempo-dependiente de muestras que presentan endurecimiento

Las pruebas reológicas son pruebas físicas las cuales usualmente asumen que la estructura química de la muestra no cambia durante la prueba o la medición. Sin embargo cuando se quiere determinar el comportamiento de flujo durante una prueba de endurecimiento como por ejemplo una prueba donde ocurra

simultáneamente una reacción química, se deberá tener constantes las condiciones de esfuerzo y temperatura. La carga de esfuerzo deberá ser de un valor bajo para asegurarse de que el proceso de cambio estructural no sea muy perturbado por la agitación y de esta manera no afectar de manera excesiva en la cinética de la reacción misma.

- *Viscosidad mínima, tiempo de gel y punto de gel*

Si se graficara un diagrama de $\eta(t)$ y se coloca el tiempo t en el eje x se puede notar en la grafica que se genera una viscosidad η_{min} después de cierto periodo de tiempo. Un ejemplo claro de esto se nota en las aplicaciones del revestimiento, practica en la cual el pozo tiene que estar bien nivelado y centrado mientras el cemento alcanza este punto, pues si no se hace bien el procedimiento la capa de cemento puede quedar muy delgada y no quedar lo suficientemente rígida. El tiempo de gel y el punto de gel son alcanzados cuando la viscosidad se eleva hasta un punto predefinido por el usuario.

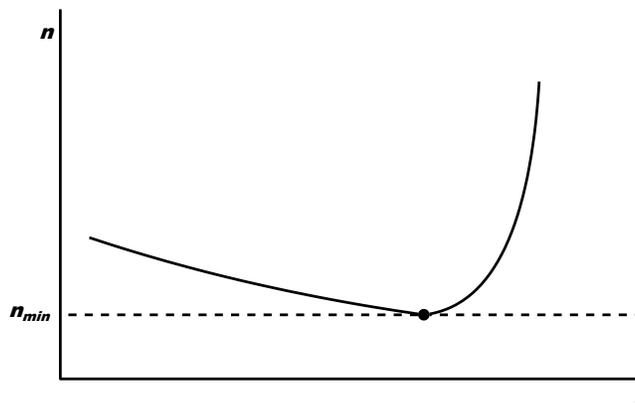


Figura 4. Curva de viscosidad durante la formación de gel.

1.3 Comportamiento de flujo dependiente de la temperatura.

En esta sección analizaremos los tipos de comportamientos que muestra un fluido al ser sometido a diferentes temperaturas. Cabe mencionar que para poder

analizar a fondo estos tipos de comportamientos, se deben realizar pruebas tratando de asegurar un esfuerzo constante.

1.3.1 Comportamiento dependiente de la temperatura de muestras que no presentan endurecimiento

La viscosidad siempre dependerá de la temperatura de la muestra. La tendencia general es que la viscosidad disminuya cuando la muestra es calentada. Se puede resaltar también que las muestras con mayor viscosidad usualmente presentan una mayor dependencia de la temperatura que los materiales que poseen una viscosidad relativamente baja. Debido a la extrema dependencia de la temperatura con las variables reológicas, los valores exactos de la medida de temperatura deberán ser reportados para cada valor de las variables reológicas, por eso se hace esencial tener un buen control de la temperatura de la muestra en los distintos tipos de pruebas.

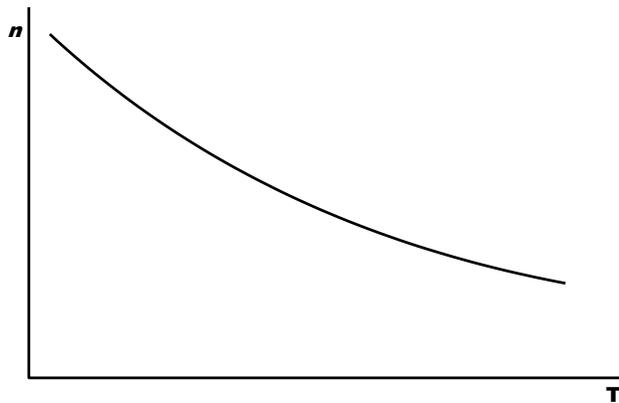


Figura 5. Viscosidad vs temperatura durante el efecto común del blandecimiento.

1.3.2 Comportamiento dependiente de la temperatura de muestras que presentan endurecimiento

Para explicar este tipo de comportamiento podemos usar la siguiente grafica.

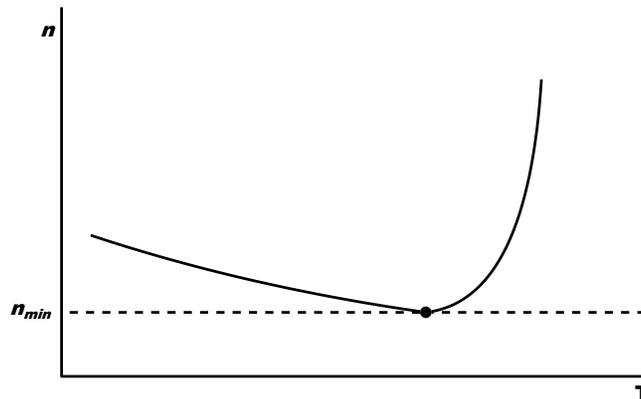


Figura 6. Viscosidad vs temperatura durante la formación de gel.

- Viscosidad mínima, tiempo de gel y punto de gel

Si se graficara un diagrama de $\eta(t)$ y se coloca la temperatura T en el eje x se puede notar en la grafica que se genera una viscosidad mínima η_{min} después de cierto periodo de tiempo. Dicho punto o η_{min} es llamado temperatura de fusión o temperatura de blandecimiento. El tiempo de gel y el punto de gel son alcanzados cuando la viscosidad se eleva hasta un punto predefinido por el usuario.

1.4 Comportamiento de flujo dependiente de la presión

En la mayoría de los casos, la viscosidad de los fluidos aumenta con los aumentos de presión. De cualquier manera, los efectos de la presión sobre la viscosidad en la mayoría de los líquidos son muy pequeños.

Para la mayoría de los líquidos la viscosidad se incrementa con los aumentos de presión debido a que la cantidad de volumen libre en la estructura interna del fluido disminuye debido a la compresión, provocando así una movilidad limitada por parte de las moléculas del fluido. Esto genera un aumento en las fuerzas de fricción internas y como consecuencia la resistencia a fluir. La dependencia de η/p se aumenta con el grado de ramificación de las moléculas internas del fluido.

El agua no se comporta como la mayoría de los líquidos. A $T < 32^{\circ}\text{C}$ bajo presiones hasta de 20 mPa, la estructura tridimensional del hidrogeno se mantiene, la cual es relativamente fuerte en comparación de las estructuras de otras moléculas bajas de algunos fluidos, las cuales se rompen. Es por eso que la viscosidad en estos casos disminuye mientras se incrementa la presión. A $T > 32^{\circ}\text{C}$, el agua comienza a tener el mismo comportamiento de los otros líquidos y la viscosidad aumenta con los aumentos de presión.

1.5 Comportamiento de flujo dependiente de la velocidad de deformación.

Si se aplica un esfuerzo a un fluido, este empezará a deformarse, de acuerdo a este principio se pueden distinguir 3 tipos de fluidos básicos. Los cuales son:

- *Fluidos Newtonianos*
- *Fluidos no Newtonianos*
- *Fluidos Viscoelásticos.*

1.5.1 Fluidos Newtonianos

Como su nombre lo indica, estos fluidos cumplen con la ley de Newton, la cual enuncia que existe una relación lineal entre el esfuerzo de corte (shear stress) y la rata de corte (shear rate). Esto indica que si en una prueba de reología en un fluido newtoniano, se duplica el esfuerzo de corte, la rata de corte se duplicara también. Esto es debido a que la viscosidad es constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo de corte aplicado, ni de la duración del esfuerzo aplicado, ni del ángulo del esfuerzo aplicado. Cabe recordar también que aunque el esfuerzo aplicado a la muestra no genere cambios en la viscosidad para este tipo de fluidos, la temperatura y la presión del mismo si provocan cambios en su viscosidad.

Lo descrito anteriormente se puede representar mediante la siguiente ecuación

$$\tau = \eta * \gamma$$

Donde:

η es la viscosidad del fluido

γ es la rata de corte

τ es el esfuerzo de corte

Algunos ejemplos de este tipo de fluidos son el agua, los solventes, aceites minerales, crudos estándar, bitúmen puro y limpio, el plasma sanguíneo, etc.

El comportamiento característico de este tipo de fluidos, se puede representar mediante un reograma (curva de flujo) y una curva de viscosidad.

- Reograma

Este tipo de diagrama, muestra una curva que representa la relación directa que existe entre la rata de corte y el esfuerzo de corte; si se grafica la rata de corte en el eje x y el esfuerzo de corte en el eje y se obtiene la siguiente gráfica:

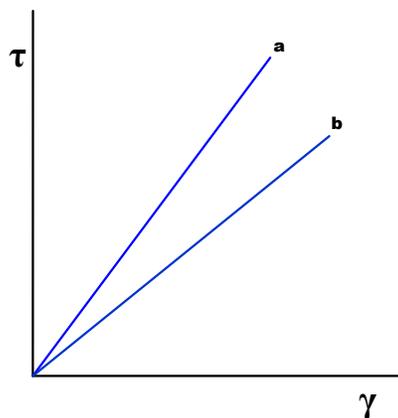


Figura 7. Curva de flujo de dos fluidos Newtonianos

Como se puede observar en la gráfica, la pendiente en cada pareja de puntos (x,y) puede ser calculada mediante $\Delta y / \Delta x$ debido a que las gráficas correspondientes son líneas rectas, de la gráfica también se puede decir que la pendiente calculada para cada pareja de puntos, corresponde a la viscosidad en dicho punto debido a que $\tau = \eta * \gamma$ y por consiguiente $\eta = \tau / \gamma$. De esta manera se puede concluir que la curva de viscosidad puede ser calculada de la curva de flujo para un fluido newtoniano si se calcula la viscosidad en cada punto (x,y) de la curva de flujo.

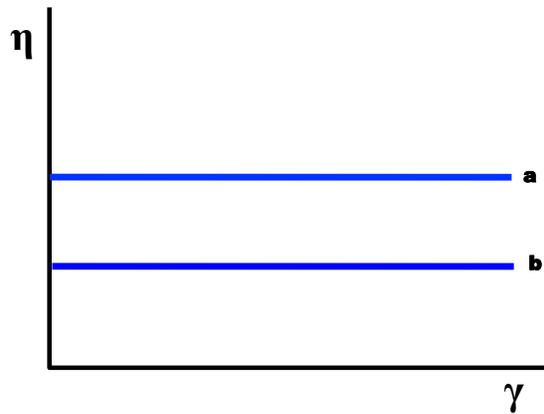


Figura 8. Curva de viscosidad para un fluido Newtoniano

De la grafica anterior se puede describir el comportamiento de la viscosidad en un fluido newtoniano, dicho comportamiento es constante a cualquier variación en la rata de corte, debido a que la grafica es una línea recta de pendiente 0.

1.5.2 Fluidos pseudoplásticos o shear thinning.

Este tipo de fluidos se caracterizan por tener un comportamiento de la viscosidad muy dependiente de la rata de corte. La curva de flujo para este tipo de fluidos es una línea curva cuya pendiente es variante conforme cambia la rata de corte y cada vez se acerca más a un valor de 0. Este comportamiento se puede demostrar en la siguiente grafica:

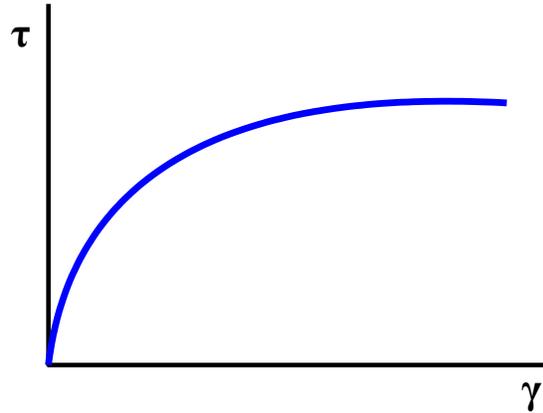


Figura 9. Curva de flujo de un fluido pseudoplástico.

Si se desea analizar la curva de viscosidad para este tipo de fluidos, se debe observar un decrecimiento en el valor de la viscosidad conforme avanza la rata de corte, dicho comportamiento se muestra en la siguiente gráfica.

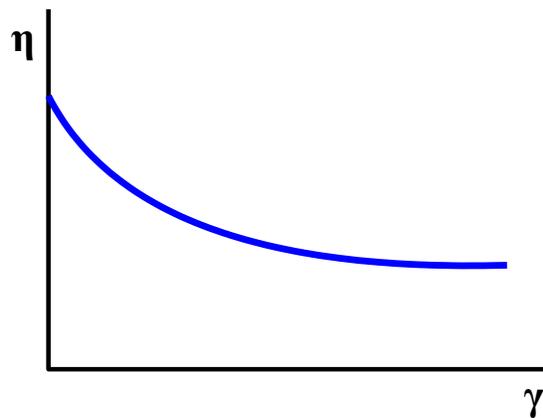


Figura 10. Curva de viscosidad de un fluido pseudoplástico.

A diferencia de los fluidos newtonianos, la viscosidad en este tipo de fluidos no es constante, es por eso que según las normas ASTM D4092 y la DIN 53214, se debe reportar la viscosidad en función de la rata de corte, además de esto, este valor de la viscosidad es una viscosidad aparente es decir que el valor reportado solo representa un punto de la curva.

1.5.3 Fluidos dilatantes o shear thickening.

Los fluidos dilatantes son suspensiones en las que se produce un aumento de la viscosidad con la velocidad de deformación, es decir, un aumento del esfuerzo de corte con dicha velocidad. Un análisis reológico de este tipo de fluido puede ser descrito a partir de su comportamiento base, el cual es mostrado en la siguiente gráfica.

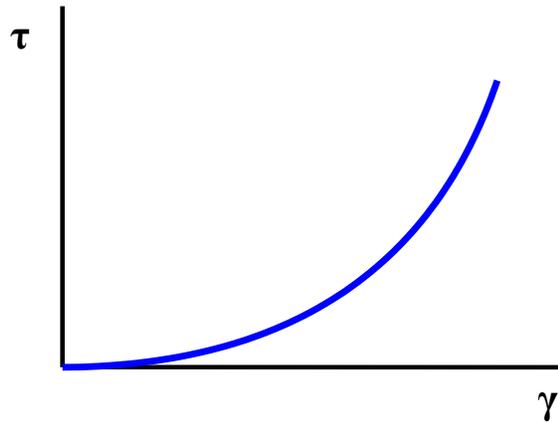


Figura 11. Curva de flujo de un fluido dilatante

En esta curva se observa una pendiente con tendencia a aumentar a medida que se incrementa la rata de corte, dicho comportamiento ocurre con la curva de viscosidad, la cual es mostrada en la siguiente gráfica.

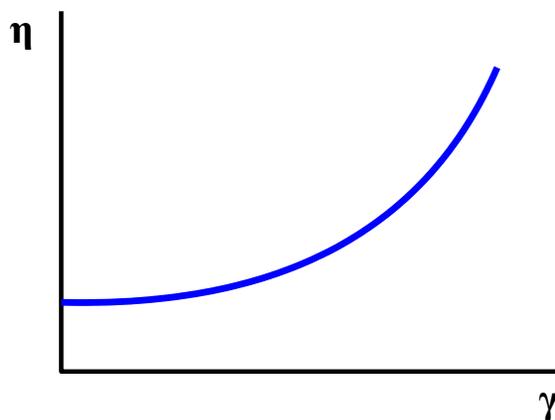


Figura 12. Curva de viscosidad de un fluido dilatante.

Con este tipo de fluidos, se produce un fenómeno el cual es conocido como dilatación. El fenómeno de dilatación se produce debido a la fase dispersa del fluido, pues en dicho fluido tiene lugar un empaquetamiento de las partículas, dejando a la fase continua casi sin espacio.

Si a continuación se aplica un esfuerzo, el empaquetamiento se altera y los huecos entre las partículas dispersas aumentan. Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo de corte (la viscosidad aumenta).

Ejemplos de este tipo de fluidos son las dispersiones con una alta concentración de sólidos o polímeros, como el caso de las suspensiones de cerámica y las dispersiones de almidón.

1.5.4 Fluidos con esfuerzo de cedencia o yield point.

Este tipo de fluidos son aquellos que requieren una determinada cantidad de fuerza aplicada antes de que puedan empezar a fluir. En otras palabras, si se representaran las fuerzas actuantes en el sistema se observaría que el valor de las fuerzas externas actuando sobre el material son mayores que las fuerzas de la estructura interna. Debajo del esfuerzo de cedencia estos materiales muestran un comportamiento elástico, o como un tipo de sólido rígido. Esto se debe a que cuando las fuerzas internas son mayores que las fuerzas externas el material deforma de una manera mínima, dicha deformación es imperceptible al ojo humano hasta que las fuerzas externas se vuelven mayores a las fuerzas internas.

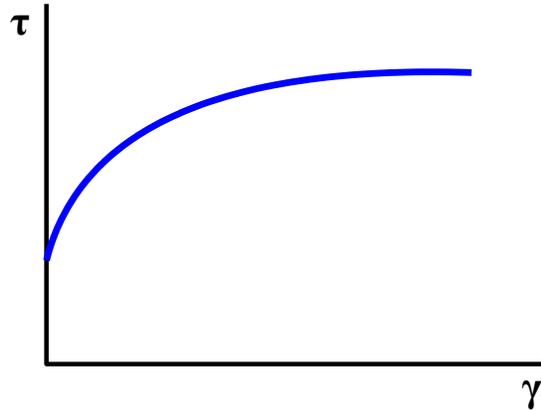


Figura 13. Curva de flujo de un fluido con esfuerzo de cedencia.

Algunos ejemplos de materiales con esfuerzo de cedencia son: colorettes, salsa de tomate, mayonesa, mantequilla, yogurt, pinturas, geles, crema dental, entre otros.

Comparación de las curvas de flujo y de viscosidad

Para las siguientes graficas, se usara la siguiente nomenclatura:

- (1) Fluido Newtoniano
- (2) Fluido pseudoplástico
- (3) Fluido dilatante
- (4) Fluido sin esfuerzo de cedencia
- (5) Fluido con esfuerzo de cedencia

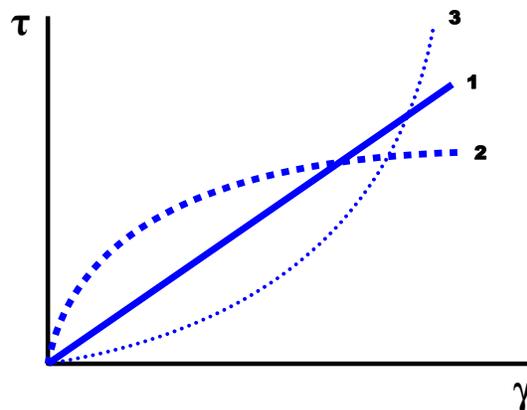


Figura 14. Comparación de las curvas de flujo

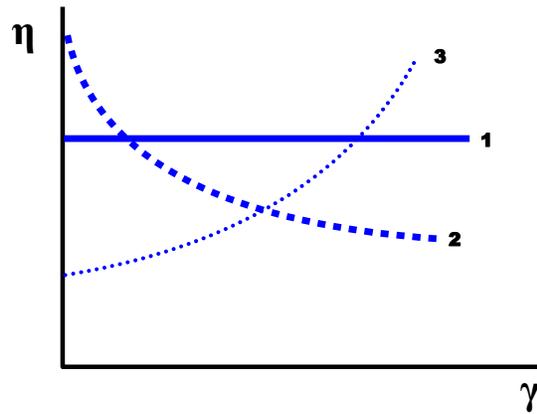


Figura 15. Comparación de las curvas de viscosidad

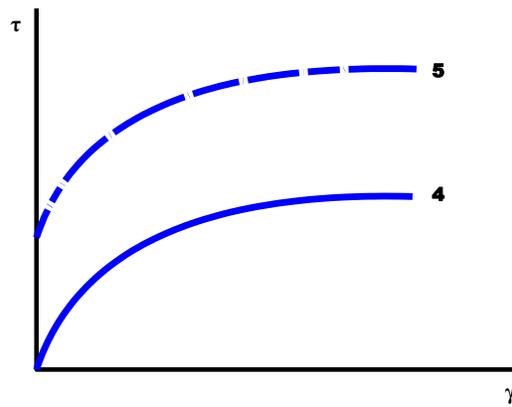


Figura 16. Comparación de las curvas de flujo con y sin esfuerzo de cedencia.

Capítulo 2. Reometría

La reometría trata las tecnologías y técnicas de medición empleadas para determinar información reológica, haciendo un énfasis general sobre los sistemas de medición, los instrumentos empleados y los métodos para realizar las pruebas y su respectivo análisis. Para determinar el comportamiento de la viscosidad en los diferentes tipos de fluidos, se hacen las pruebas rotacionales, así como también se emplean pruebas de relajación y pruebas oscilatorias. En esta sección analizaremos las distintas pruebas que se pueden correr con un viscosímetro rotacional analizando el comportamiento y control de ciertas variables, las cuales aseguran el buen funcionamiento de la prueba, además de la precisión y la efectividad en los resultados de la misma.

2.1 Pruebas con rata de corte controlada

En este tipo de pruebas, como su nombre lo indica la rata de corte o velocidad de rotación son fijados previamente y controlados, este tipo de pruebas es comúnmente conocido por sus siglas en ingles como “CSR” (controlled shear rate).

De este tipo de pruebas se pueden hacer diversos análisis, los cuales serán mostrados y analizados a continuación.

2.1.1 Curvas de flujo y de viscosidad

Para obtener buenos resultados en este tipo de ejercicio, se debe asegurar como preajuste que la rata de corte se comporte como una función lineal con respecto al tiempo.

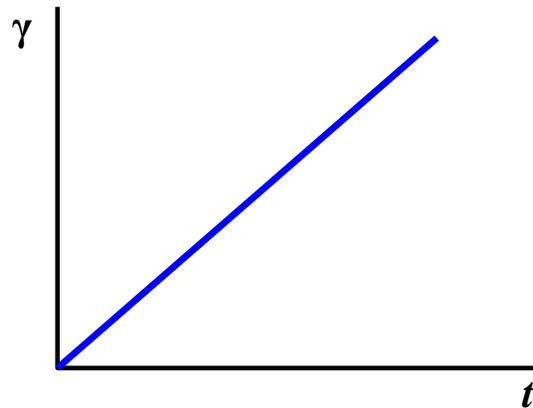


Figura 17. Rata de corte vs tiempo como preajuste

Luego de esto, se obtendrá una curva de flujo, pues los parámetros medidos son el esfuerzo de corte y la rata de corte, en esta parte de la prueba, se puede determinar el tipo de fluido con el cual se esta trabajando.

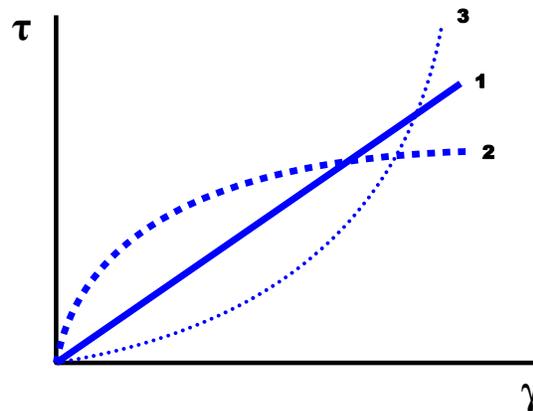


Figura 18. Curvas de flujo. (1)Fluido newtoniano. (2)Fluido pseudoplástico.
(3)Fluido dilatante.

Como resultado final, se obtiene la curva de viscosidad, después de validar los datos obtenidos en la grafica anterior; los resultados obtenidos pueden ser de esta manera.

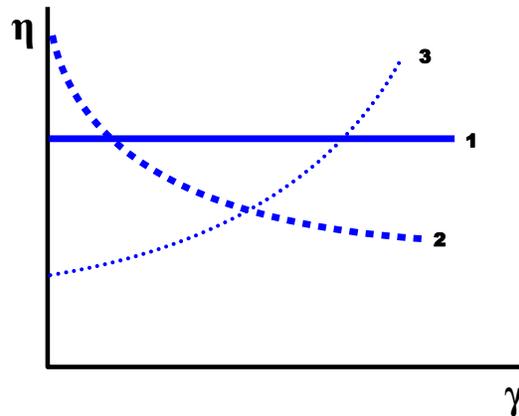


Figura 19. Curvas de viscosidad. (1)Fluido newtoniano. (2)Fluido pseudoplástico.
(3)Fluido dilatante..

Para este tipo de pruebas, se puede recomendar que cuando se trabaja con fluidos de muy alta viscosidad, se trabaje y realice las pruebas con tasas de corte muy bajas (menores a 1 seg^{-1}) además de asegurarse de que cuando se haga la medición el tiempo de duración del punto medido sea relativamente alto (del orden de 10 seg a 100 seg), para fluidos de viscosidad media o baja se pueden aplicar tasas de corte mayores a 1 seg^{-1} y un tiempo de medición de punto de 5 seg será suficiente en la mayoría de los casos para obtener resultados confiables de la prueba. Si se trabaja con tasas de corte aplicadas del orden de 0.1 seg^{-1} se recomienda aplicar un tiempo de medición igual o superior a los 10 segundos y cuando son valores cercanos a 0.01 seg^{-1} se debe trabajar con tiempos de mediciones iguales o mayores a 100 segundos.

2.1.2 Curvas de viscosidad vs tiempo

Para conseguir este tipo de comportamiento, se debe preajustar el sistema con una tasa de corte constante, es decir que durante toda la prueba la tasa de corte aplicada será la misma. Si se grafica el ajuste anterior en función del tiempo se obtendrá el siguiente resultado.

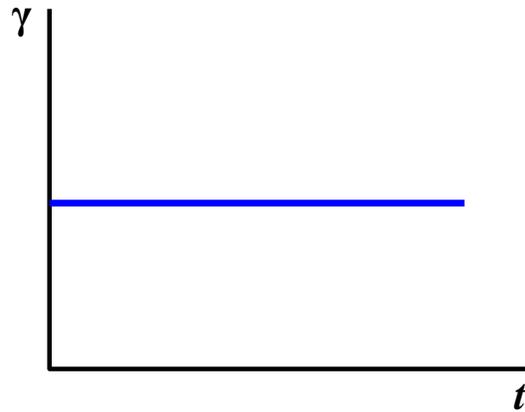


Figura 20. Rata de corte vs tiempo como preajuste de la prueba.

Como consecuencia de aplicar la misma rata de corte durante la prueba, se obtiene una grafica de esfuerzo de corte como función del tiempo, en la cual se pueden caracterizar fluidos con efectos adelgazantes o de endurecimiento dependiendo del valor de la rata de corte aplicada. Es por esta razón que cuando se ejecutan este tipo de pruebas se debe de tener en cuenta que para ratas de corte con valores muy bajos se debe asegurar un buen tiempo de medición para obtener el verdadero valor de la viscosidad y del esfuerzo de corte, y cuando son valores muy elevados se debe tener en cuenta que una agitación muy elevada puede provocar cambios en la viscosidad por efectos térmicos, también se debe tomar en cuenta para este tipo de ratas de corte aplicadas las condiciones y los efectos del flujo turbulento.

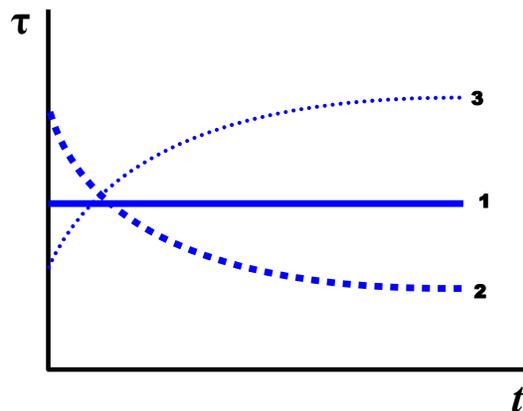


Figura 21. Rata de corte vs tiempo. (1) fluido sin cambio en el esfuerzo de corte a través del tiempo. (2) fluido con decrecimiento del esfuerzo de corte a través del tiempo. (3) fluido con aumento del esfuerzo de corte a través del tiempo.

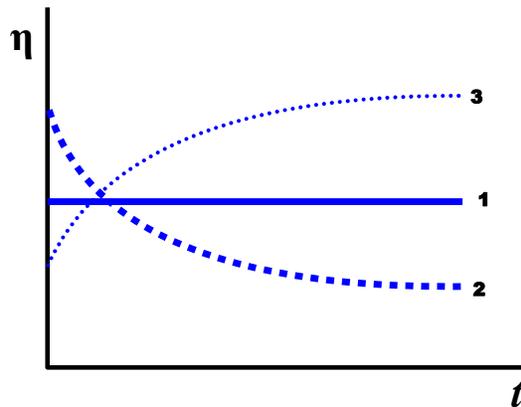


Figura 22. Curva de viscosidad vs tiempo. (1) fluido sin cambio de viscosidad a través del tiempo. (2) fluido con decrecimiento de la viscosidad a través del tiempo. (3) fluido con aumento de la viscosidad a través del tiempo.

Como se puede observar, la curva de viscosidad y la de esfuerzo de corte son similares, esto se debe a que la viscosidad y el esfuerzo de corte mantienen una relación directamente proporcional cuando la rata de corte es constante.

$$\tau = \eta * \gamma$$

$$\gamma = cte$$

$$\tau \propto \eta$$

2.1.3 Descomposición y regeneración estructural (tixotropía y reopéxia)

Este tipo de pruebas se caracteriza por poseer 3 etapas de duración, la etapa de descanso, la etapa de aplicación de la carga, y la etapa de descanso después de la carga.

- 1) **Etapla de descanso:** en esta etapa se aplica una rata de corte muy baja durante un periodo t_0 hasta un tiempo t_1 con el fin de mantener registrado

un valor constante de viscosidad η debido a que este valor será reportado como el valor de referencia para el tercer intervalo.

- 2) **Etapa de aplicación de la carga:** durante esta etapa, se aplica una tasa de corte de valor alto, desde un tiempo t_1 hasta un t_2 con el fin de descomponer la estructura de la muestra.

- 3) **Etapa de descanso después de la carga:** se aplica la misma tasa de corte aplicada en la etapa 1 durante un tiempo t_2 y un tiempo t_3 para analizar el comportamiento de la viscosidad y analizar la regeneración de la muestra.

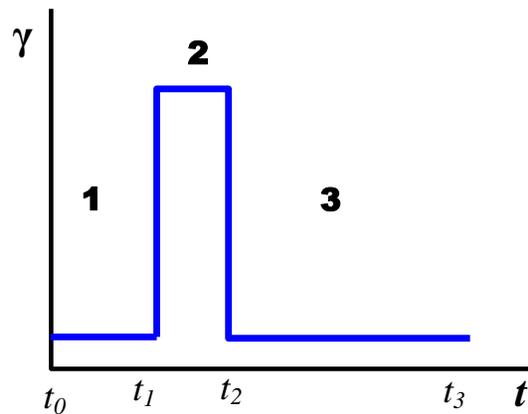


Figura 23. Tasa de corte vs tiempo en una prueba de 3 etapas.

Como resultado de estas pruebas se obtiene la curva de viscosidad.

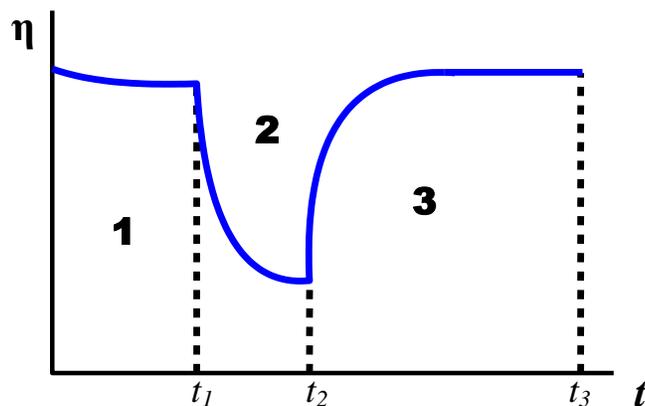


Figura 24. Viscosidad de un material tixotrópico en una prueba de rata de corte controlada de 3 etapas.

Métodos para analizar la curva de regeneración

Se reconocen 4 métodos diferentes para analizar las curvas de tixotropía.

- **Método 1: Valor tixotrópico como diferencia de las viscosidades.**

Este método consiste en expresar la tixotropía en función del cambio en las viscosidades $\Delta\eta$, el cual es calculado de la diferencia entre el valor máximo de viscosidad (el valor máximo en la etapa 3) y la viscosidad mínima durante la etapa 2.

$$\Delta\eta = \eta_{\max} - \eta_{\min}$$

- **Método 2: Tiempo de tixotropía total.**

El tiempo de tixotropía total es la diferencia de tiempo entre el final de la fase de descomposición estructural y el punto de tiempo en el cual es alcanzado el valor máximo de viscosidad η_{\max} después de la regeneración estructural. Este valor de tiempo es analizado como el tiempo requerido para que la estructura alcance el 100% de la regeneración en la tercera etapa.

- **Método 3: Tiempo de tixotropía requerido para alcanzar cierto porcentaje de regeneración.**

En ciertos tipos de pruebas, el análisis del tiempo de tixotropía total toma bastante tiempo, en estos casos el periodo de tiempo es determinado en el cual el valor de η se ha incrementado entre un 75% y 90% del valor constante de η obtenido en el primer intervalo de la prueba. La viscosidad determinada en el final del primer intervalo es usada como viscosidad de referencia y se le asigna el 100% de η .

- **Método 4: Porcentaje de regeneración en un periodo de tiempo previamente definido.**

El porcentaje de regeneración que toma lugar en el tercer intervalo de la prueba, es determinado para ciertos puntos específicos de tiempo los cuales son predefinidos desde antes de comenzar la prueba. Luego de esto, el valor de η que es producido durante la regeneración estructural es comparado con el valor de $\eta(100\%)$ determinado en el primer intervalo de la prueba. El factor decisivo para este tipo de pruebas es el comportamiento durante el tiempo del intervalo 3, el cual es definido por el usuario antes de la prueba de acuerdo con los requisitos del fluido.

Para analizar el estado de la etapa de descanso, el valor de la viscosidad durante dicho intervalo debe ser lo mas constante posible. Si esta condición no es garantizada, se pueden tomar las siguientes medidas:

- a) Si la curva $\eta(t)$ va decreciendo y mantiene un valor constante solo después de cierto tiempo, se debe a que el valor de la rata de corte aplicado es muy elevado para esa muestra como para mantener el fluido en estado de reposo y por ello la descomposición estructural ya ha tomado su lugar, la acción inmediata para este caso es reducir la rata de corte aplicada.
- b) Si la curva $\eta(t)$ va ascendiendo y después de cierto tiempo t empieza a mostrar valores constantes de viscosidad, se esta midiendo una viscosidad aparente, la cual esta en función de la rata de corte, y del tiempo de medición de la muestra. Esto se debe a que el tiempo de medición de la muestra es muy corto para que se pueda determinar un valor verídico de viscosidad por medio de la rata de corte. La acción inmediata para corregir este error, es aumentar la duración del tiempo de medición.

2.1.4 Curvas de flujo con área de histéresis

Este tipo de prueba, consiste en aplicar diferentes ratas de corte, con diferentes tiempos, con el fin de generar una grafica con un área, conocida como área de histéresis.

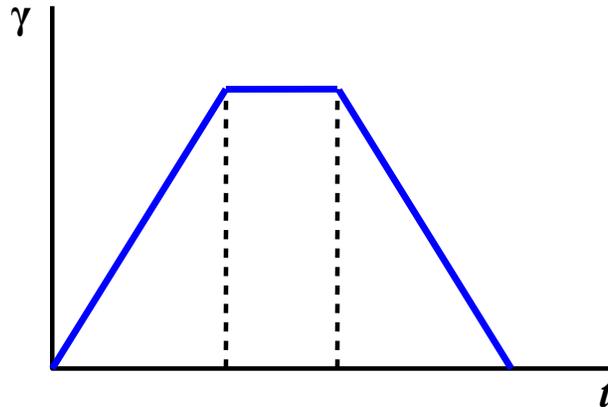


Figura 25. Rata de corte vs tiempo en una prueba de histéresis con rata de corte controlada en 3 etapas.

Como resultado de la aplicación de ratas de corte a intervalos de tiempo y en distinto orden, se genera una curva de flujo que muestra una curva con área de histéresis.

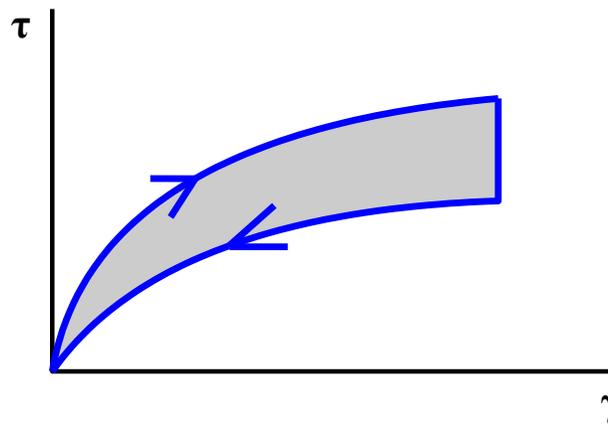


Figura 26. Curva de flujo con área de histéresis

Cabe mencionar que este tipo de pruebas, están quedando desactualizadas debido a que con este método el comportamiento solo puede ser determinado durante la fase de descomposición estructural. Es decir que el método no revela

información alguna sobre la regeneración estructural debido a que esta exige largos tiempos de descanso para poder ser analizar este comportamiento y debido a que cuando se habla de tixotropía y reopéxia se enfatiza más en el análisis de la regeneración estructural.

2.1.5 Curvas de viscosidad vs temperatura

En este tipo de pruebas se aplica una tasa de corte y una temperatura constante durante la prueba. El análisis en este tipo de pruebas radica en cambiar la temperatura del sistema aplicando el mismo valor de la tasa de corte para analizar el comportamiento de η y τ , el cual es muy similar debido a que son directamente proporcionales cuando se aplica una tasa de corte constante.

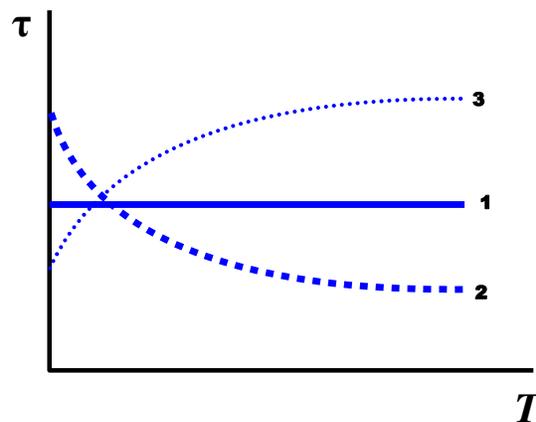


Figura 27. Esfuerzo de corte vs temperatura. (1) fluido Newtoniano. (2) fluido con decrecimiento del esfuerzo de corte a través de la temperatura. (3) fluido con aumento del esfuerzo de corte a través de la temperatura.

2.2 Pruebas con esfuerzo de corte controlado

En este tipo de pruebas, el esfuerzo de corte es ajustado y controlado, esto significa que el torque aplicado será controlado y como resultado obtendremos la velocidad de rotación del sistema. Generalmente este tipo de pruebas son conocidas como “CS” por sus siglas en inglés “Controlled Stress Test”.

2.2.1 Curvas de flujo y de viscosidad

Para el buen desarrollo de los resultados, se debe preajustar el esfuerzo de corte en función del tiempo.

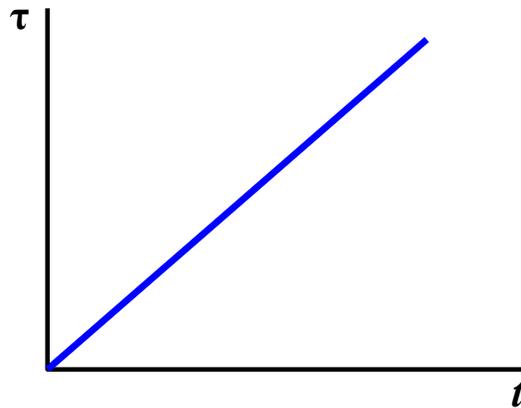


Figura 28. Esfuerzo de corte vs tiempo como preajuste de la prueba.

Este tipo de pruebas son la manera más común de la determinación del esfuerzo de cedencia, pues en este tipo de pruebas es fácil de observar como la curva corta con el eje del esfuerzo de corte τ . Como resultado se puede graficar la curva de viscosidad. La manera de analizar la información obtenida durante la prueba, es de la misma forma como se analiza en las pruebas con tasa de corte controlada, debido a que los resultados obtenidos son similares sin importar de que manera se ejecuten ya sea con tasa de corte controlada o con esfuerzo de corte controlado.

2.2.2 Curvas de viscosidad vs tiempo

Para este tipo de pruebas, se debe preajustar el sistema con un esfuerzo de corte constante.

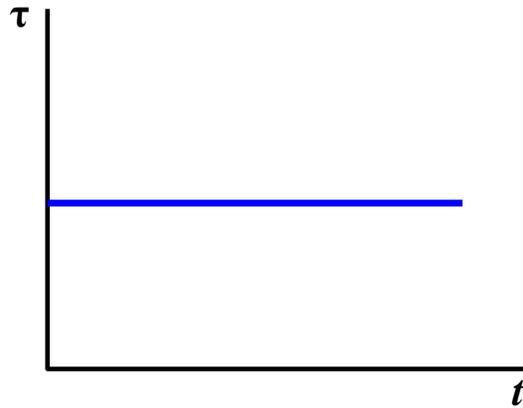


Figura 29. Esfuerzo de corte vs tiempo como preajuste de la prueba.

Como resultado se obtiene una curva de tasa de corte vs tiempo de la cual se generará la curva de viscosidad para analizar si la muestra presenta cambios a través del tiempo.

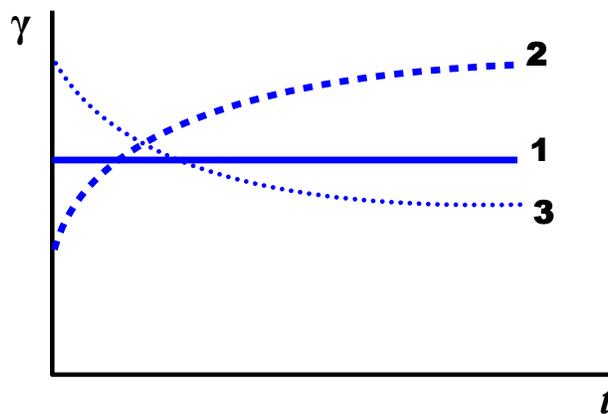


Figura 30. Curva de tasa de corte vs t . (1) fluido sin cambio en la tasa de corte a través del tiempo. (2) fluido con decrecimiento de la tasa de corte a través del tiempo. (3) fluido con aumento de la tasa de corte a través del tiempo.

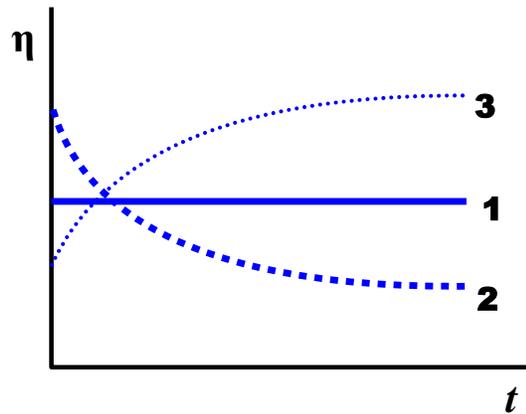


Figura 31. Curva de viscosidad vs t . (1) fluido sin cambio de viscosidad a través del tiempo. (2) fluido con decrecimiento de la viscosidad a través del tiempo. (3) fluido con aumento de la viscosidad a través del tiempo.

La curva de viscosidad y la de tasa de corte son inversamente proporcionales debido a que $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ pero como $\tau = \text{constante}$ luego $\eta \propto \frac{1}{\dot{\gamma}}$,

Cuando se aplican esfuerzos de corte muy bajos, la duración del tiempo de medida debe ser relativamente grande para garantizar que se está midiendo la viscosidad real, y no una viscosidad dependiente de la tasa de corte y del tiempo de medición.

2.2.3 Descomposición y regeneración estructural (tixotropía y reopéxia)

Este tipo de pruebas son muy similares a las de tasa de corte controlada, es decir que la prueba consta de 3 etapas, la etapa de descanso, la etapa de aplicación del esfuerzo de corte y la etapa de descanso después de la carga.

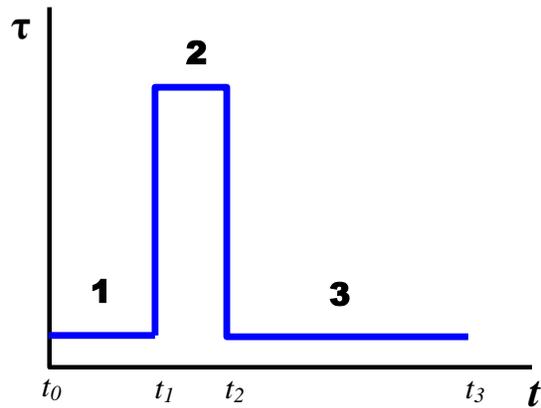


Figura 32. Esfuerzo de corte vs tiempo en una prueba de esfuerzo de corte controlado con 3 etapas.

Como resultado de esto, se puede representar la curva de viscosidad en función del tiempo.

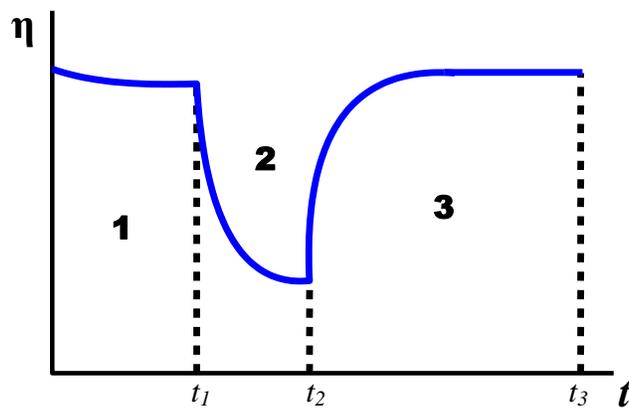


Figura 33. Viscosidad de un material tixotrópico en una prueba de esfuerzo de corte controlado de 3 etapas.

Para analizar los datos, se hace de la misma manera que cuando se controla la tasa de corte, es decir usando los cuatro métodos antes explicados, el método de valor tixotrópico como diferencia de las viscosidades, el método de tiempo de tixotropía total, el método de tiempo de tixotropía requerido para alcanzar cierto porcentaje de regeneración y el método de porcentaje de regeneración en un periodo de tiempo definido previamente.

Las pruebas con tasa de corte controlada son mas usadas que las de esfuerzo de corte controlado en este tipo de casos, debido a que si el instrumento puede controlar grandes cambios de ratas de corte en tiempos cortos, se asegura la deformación para luego entrar a analizar la regeneración, esto no indica que las pruebas con esfuerzo de corte controlados no generen deformación, si lo hacen debido a que la deformación misma es la que causa el cambio estructural. Como se sabe también, la viscosidad solo cambiara si se le aplica una fuerza que produzca una deformación estructural. Es por ello que las pruebas con tasa de corte controlada tienen mayor eficacia, reproducibilidad y repetibilidad que controlando el esfuerzo de corte el cual en este caso actuaría como la tasa de deformación.

2.2.4 Curvas de flujo con histéresis

La forma de analizar este tipo de pruebas es de la misma manera que en las pruebas con tasa de corte controlado, teniendo en cuenta que durante la realización de la prueba se controlará es el esfuerzo de corte, es decir que como preajuste se aplicará un perfil de diferentes valores de esfuerzos de corte.

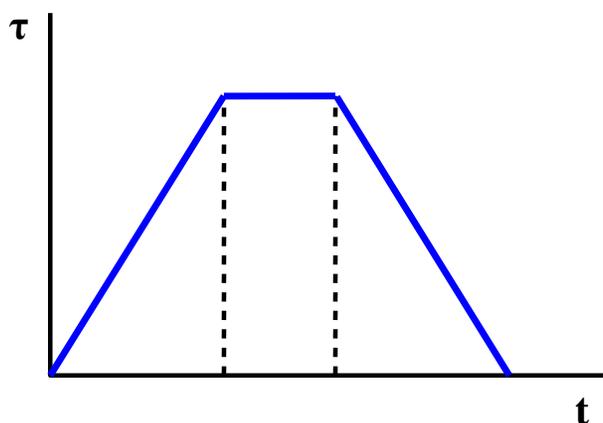


Figura 34. Esfuerzo de corte vs tiempo en una prueba de histéresis con esfuerzo de corte controlado en 3 etapas.

La curva obtenida se analiza mediante al calculo del área delimitada, y anteriormente se determinaba si un fluido era reopéctico o tixotrópico mediante el valor del área bajo la curva. Si el valor del área es positivo se dice que el fluido es tixotrópico y si es negativo el fluido es reopéctico. Para determinar si el área es positiva o negativa, se restaba la curva en la cual el esfuerzo decrece con la curva en la cual el esfuerzo va aumentando.

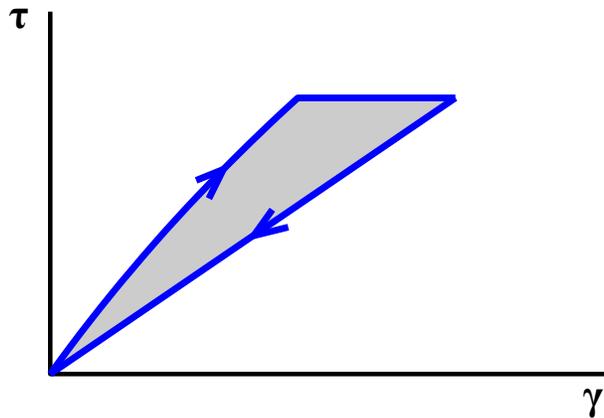


Figura 35. Curva de flujo en una prueba de histéresis con esfuerzo de corte controlado.

2.2.5 Curvas de viscosidad vs temperatura.

En este tipo de pruebas se aplica un esfuerzo de corte y una temperatura constante durante la prueba. El análisis en este tipo de pruebas radica en cambiar la temperatura del sistema aplicando el mismo valor del esfuerzo de corte para analizar el comportamiento de η y γ , para este caso son inversamente proporcionales debido a que $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ y como $\tau = \text{constante}$ luego $\eta \propto \frac{1}{\dot{\gamma}}$.

Capítulo 3. Modelos numéricos básicos que posee el viscosímetro Bohlin visco 88

3.1 Funciones de aproximaciones

Después de las pruebas de rata de corte y esfuerzo de corte controlados, la mayoría de la información obtenida esta en forma de tablas. Para cada punto medido hay generalmente valores de temperatura, rata de corte, esfuerzo de corte y de aquí un valor calculado de viscosidad. Debido a la necesidad de comparar distintos tipos de comportamientos al momento de analizar la información obtenida, se generan modelos de funciones matemáticas para la aproximación de las curvas y de esta manera describir el tipo de flujo y el comportamiento de la viscosidad usando un pequeño numero de parámetros. Con estos métodos, se ahorra la comparación grafica con otras curvas patrón, obteniendo así una ganancia en tiempo. Por ultimo, cabe mencionar que estos tipos de modelos numéricos, no pueden ser aplicados en todos los casos, la mayoría de los modelos tienen condiciones de aplicación, y una vez estas condiciones sean cumplidas, se puede aplicar el modelo numérico. Los siguientes modelos numéricos los incluye el viscosímetro Bohlin Visco 88 en su base de datos, para ser usados en las distintas pruebas que se corran.

3.1.1 Modelo para fluidos newtonianos

Este es el modelo más sencillo donde la viscosidad del fluido permanece constante.

$$\tau = \gamma * \eta$$

3.1.2 Modelo para fluidos pseudoplásticos y dilatantes.

Modelo de Ostwald / de Waele (o Ley de la Potencia)

$$\tau = c * \gamma^n \quad (E-4)$$

Este modelo presentado por W. Ostwald y A. de Waele incluye los factores c (Pas) y el exponente n . El índice de ley de la potencia n presenta los siguientes comportamientos:

$n < 1$ para fluidos pseudoplásticos

$n > 1$ para fluidos dilatantes

$n = 1$ para fluidos newtonianos

La desventaja de este modelo, es su comportamiento a ratas de corte demasiado bajas o demasiado altas en las curvas de viscosidad de los polímeros, debido a que en estas partes, los modelos fallan y su comportamiento se hace inestable.

3.1.3 Modelos para comportamiento de fluidos que incluyen corte cero y corte infinito.

Para comprender a cabalidad estos modelos hay que mencionar antes dos conceptos:

Viscosidad de corte cero: $\eta_0 = \lim_{\gamma \rightarrow 0} \eta(\gamma)$

Viscosidad de corte infinito: $\eta_\infty = \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \eta(\gamma)$

Los siguientes modelos solo aplican en fluidos polímeros.

Modelo de Cross

$$\frac{\eta(\gamma)}{\eta_0} = \frac{1}{1 + (c * \gamma)^p} \quad (E-5)$$

Este modelo tiene única aplicación en polímeros, e incluye la constante de Cross c (s) y el exponente de Cross p .

Sisko y Ellis

$$\text{Sisko: } \tau = c * \gamma^p + \eta_{\infty} * \gamma \quad (\text{E-6})$$

$$\text{Ellis: } \tau = \eta_0 * \gamma + c * \gamma^p \quad (\text{E-7})$$

Estos dos modelos fueron especialmente diseñados para describir el comportamiento a bajas ratas de corte (Ellis) y altas ratas de corte (Sisko).

3.1.4 Modelos de curvas de flujo incluyendo esfuerzo de cedencia.

Modelo de Bingham

$$\tau = \tau_B + \eta_B * \gamma \quad (\text{E-8})$$

En esta ecuación se puede observar el esfuerzo de corte τ_B y el coeficiente de flujo η_B , este último es calculado con el fin de aproximar el comportamiento del fluido al comportamiento de una línea recta.

Modelo de Casson

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + \sqrt{\eta_c * \gamma} \quad (\text{E-9})$$

Este modelo que incluye el esfuerzo de cedencia de Casson τ_c y la viscosidad de Casson η_c fue diseñado para fluidos o tintas de impresoras de computadores. Luego se le hizo unas modificaciones y se acondiciono para medir viscosidad en chocolates.

Herschel / Bulkley

$$\tau = \tau_{HB} + c * \gamma^p \quad (E-10)$$

Modelo que incluye el esfuerzo de cedencia de Herschel / Bulkley τ_{HB} , el coeficiente de flujo c y el exponente p , donde el exponente p varía según:

$p < 1$ para fluidos pseudoplásticos

$p > 1$ para fluidos dilatantes

$p = 1$ para comportamiento de Bingham

Polinomial

Este modelo es enteramente matemático y representa la mayor aproximación para el análisis de curvas y su respectivo ajuste gráfico. Sin embargo tiene una desventaja la cual es que usando este método se tiene que calcular un gran número de coeficientes para el buen desempeño del método, es decir que se requeriría de una cantidad relativamente alta de tiempo mientras se calculan los coeficientes; sin embargo esta desventaja no existe con el avance de la tecnología y los cálculos hechos por computadora, los cuales son muy rápidos.

Para mencionar un ejemplo de este modelo, se puede usar un polinomio de tercer orden, el cual tendría la siguiente forma:

$$\tau = c_1 + c_2 * \gamma + c_3 * \gamma^2 + c_4 * \gamma^3 \quad (E-11)$$

Capítulo 4. Resumen de la norma API RP 39 segunda edición de procedimientos estándar para la evaluación de fluidos de fracturamiento hidráulico

4.1 Sinopsis

La norma API RP 39 consta de ciertos procedimientos necesarios para hacer efectiva la caracterización de un fluido de fracturamiento, esto incluye desde la preparación del fluido hasta cálculos de pérdidas de fricción. Para poder llevar esto a cabo es necesario una serie de equipos capaces de realizar las pruebas exigidas por la norma API RP 39 y seguir de manera adecuada los procedimientos y las maneras de analizar la información, todo esto siguiendo en el orden especificado las indicaciones de la norma. Para poder comprender los objetivos de la norma se hace indispensable conocerla, es por eso que en esta sección se hará un breve resumen sobre en que consiste cada sección de la norma para luego hacer nuestras propias conclusiones.

4.2 Norma API RP 39

En esta parte se comenta cada sección incluida en la norma API RP 39 con el fin de conocer los objetivos de la misma y también sus alcances.

4.2.1 Sección 1: Preparación de la muestra de fluido de fracturamiento

En esta sección de la norma se hace referencia al equipo necesario para poder preparar un fluido de fracturamiento, así como también se encuentra la descripción del equipo y su debido procedimiento incluyendo un procedimiento alternativo de preparación de la muestra en caso tal de que el proveedor de la maquina mezcladora no tenga los procedimientos necesarios para mezclar fluidos de

fracturamiento, este procedimiento alternativo incluye procedimientos para preparar geles base agua o base aceite, geles cross-linked base agua o base aceite, emulsiones y sistemas de aditivos de aceite crudo o agua.

4.2.2 Sección 2: Medición de las propiedades hidráulicas

Esta sección busca la manera de hallar los parámetros del fluido de fracturamiento hidráulico para predecir las caídas de presión en tuberías, anular y fracturas. Cabe mencionar que para los procedimientos explicados en esta sección no se tiene en cuenta el comportamiento tiempo dependiente que tienen algunos fluidos de fracturamiento debido a que el análisis de este comportamiento en fluidos de fracturamiento requiere un equipo demasiado complejo y también depende de la manera en que este tipo de fluidos son usados y medidos, es decir que para esta sección se eliminaran los efectos dependientes del tiempo.

Después de conocer el objetivo de esta sección, se puede mencionar su contenido, el cual incluye los equipos necesarios, los procedimientos y el debido manejo de la información para poder obtener los parámetros reológicos de los fluidos a analizar.

4.2.3 Sección 3: Prueba de suspensión estática de propante

En esta sección se habla sobre la importancia de esta prueba, la cual radica en el cálculo de la rata de asentamiento de las partículas de propante para hacer una comparación fluido-fluido. El fin de estos resultados es evaluar los tiempos de asentamiento para el propante en tuberías cuando el fluido esta en condiciones estáticas.

Es decir que esta sección incluye la descripción del equipo necesario para desarrollar la prueba, el procedimiento y el debido manejo y respectivo análisis de los datos obtenidos durante las prácticas.

4.2.4 Sección 4: Pour Point y Flash Point

Esta sección incluye todo lo relacionado con la medición y análisis del pour point y el flash point, la norma es clara al mencionar que para la medición del pour point debemos remitirnos a la norma ASTM D 97-76: Pruebas de pour point para aceites de petróleo. En cuanto a la medición del flash point la norma indica que si el líquido tiene menos de 45 S.U.S. a 100 °F se debe trabajar con la norma ASTM D 56-70. Para fluidos que tienen 45 S.U.S. o más se debe trabajar con la norma ASTM D 93-73. Para la medición de la viscosidad en segundos Saybolt Universal S.U.S. se debe remitir a la norma ASTM D 88-56; la información obtenida durante estas pruebas se registra en un formato especial, el cual es ilustrado en la Figura 17 de la norma API RP 39.

4.2.5 Sección 5: Pruebas de pérdida de fluido y daños en la permeabilidad de la matriz.

El objetivo de esta sección, es describir las prácticas y los métodos usados para evaluar las pérdidas de líquido de los fluidos de fracturamiento que no contienen propante, además del daño en la permeabilidad de la matriz causado por los fluidos de fracturamiento y la viscosidad del filtrado de los fluidos de fracturamiento.

Es decir que en esta sección se menciona y se describen los equipos y los accesorios requeridos para ejecutar las pruebas mencionadas anteriormente, entre los cuales se destacan las celdas de filtrado, la fuente de presión y la muestra de corazón. También se mencionan los procedimientos para ejecutar ambas pruebas y como se deben hacer los diferentes cálculos para hallar las variables necesarias para el desempeño de estas pruebas.

4.2.6 Sección 6: Compatibilidad de los fluidos de fracturamiento con los fluidos de la formación.

El propósito de esta prueba sencilla de emulsiones es determinar la compatibilidad de los fluidos de fracturamiento reactivos y no reactivos con los fluidos de la formación. El procedimiento apropiado para los fluidos de fracturamiento que contengan ácido se encuentra en la norma API RP 42. El procedimiento para los fluidos de fracturamiento sin ácidos se encuentra en la parte 6.3 y 6.4 de la presente norma.

Para el buen desarrollo de esta prueba, la norma incluye una breve descripción de los equipos y los materiales necesarios para desarrollar la misma y un debido procedimiento de la prueba para luego decidir si los fluidos de fracturamiento y los fluidos de la formación son compatibles.

4.2.7 Apéndice A: Perdidas de fricción a través de tuberías, anular y fracturas

Esta última parte de la norma contiene los métodos necesarios para realizar los cálculos de pérdida de fricción a través de tuberías, anular y fracturas. Básicamente la norma incluye dos métodos, el primero para fluidos newtonianos y el segundo para los fluidos no newtonianos, en esta sección se incluyen diversos cálculos para los cuales se necesitan los parámetros calculados y medidos con las pruebas de las anteriores secciones para de esta manera completar la debida caracterización de los fluidos de fracturamiento hidráulico.

Capítulo 5. Comparación entre la norma API RP 39 y su analogía con el viscosímetro Bohlin Visco 88.

5.1 Aplicabilidad de la norma API RP 39 al viscosímetro Bohlin Visco 88

Después de haber hecho un breve resumen de la norma, se realizará una comparación entre los alcances de la norma y los alcances del viscosímetro Bohlin Visco 88 que se encuentra en el Laboratorio de Pruebas Especiales LAPE de la Universidad Surcolombiana. Para estar acorde con las pruebas realizables por el viscosímetro Bohlin Visco 88, se trabajará con la sección 2 de la norma API RP 39 la cual comenta los equipos necesarios, los procedimientos y el manejo de la información de las propiedades hidráulicas de los fluidos, pero en especial se hará una comparación entre los alcances del Bohlin Visco 88 y las propiedades reológicas que se pueden hallar mediante la norma API RP 39.

5.2 Equipos

La norma es clara cuando menciona que se debe usar un viscosímetro de tipo rotacional tal como el Fann V-G Modelo 35A o uno equivalente que sea capaz de medir las mismas propiedades que lee el viscosímetro mencionado anteriormente. Estas variables son: rata de corte, esfuerzo de corte y temperatura. En este aspecto el viscosímetro Bohlin Visco 88 esta de acuerdo con la norma debido a que este viscosímetro registra rata de corte, esfuerzo de corte, temperatura y adicionalmente registra torque, viscosidad dinámica, tiempo, ángulo de fase, entre otras, es decir que el viscosímetro Bohlin Visco 88 puede ser usado para generar la información exigida por la norma API RP 39.

La norma también contiene una subsección indicando que entre los equipos necesarios se necesita aparte del viscosímetro rotacional un viscosímetro capilar o un viscosímetro tubular para generar información adicional sobre la

caracterización del fluido, sin embargo esto no se trabajara en este proyecto de grado debido a que el Laboratorio de Pruebas Especiales no cuenta con estos equipos, por lo tanto esta subsección será omitida.

5.3 Procedimientos

En esta sección la norma menciona que para calibrar y operar el equipo se debe recurrir al manual de operaciones del equipo suministrado por el fabricante, luego de esto la norma menciona que para un viscosímetro Fann V-G modelo 35A se deben llenar los cilindros coaxiales con la muestra de fluido para luego ajustar la temperatura a la temperatura deseada. Luego se debe correr el viscosímetro a 600, 300, 200, 100, 6 y 3 rpm en el respectivo orden. La lectura inicial es 600 rpm y debe ser tomada 60 segundos después de una agitación continua, los intervalos para cambiar los rpm deben ser entre 20 segundos y se debe hacer la prueba a 80, 100, 125 y 180 °F (+ ó – 2 °F). La temperatura de la prueba debe ser limitada por 20 °F por debajo del punto de ebullición del líquido en cuestión. La manera de entregar la información obtenida debe ser tal como se encuentra el Anexo 1. Para viscosímetros diferentes al Fann V-G modelo 35A, existe otro formato que es mostrado en el Anexo 2. Sobre esta sección se puede trabajar perfectamente con el viscosímetro Bohlin Visco 88 debido a que el registra y reporta los datos a cualquier rata de corte deseada y también posee una chaqueta térmica con la cual la rata de corte puede ser medida en un amplio rango de temperaturas si se cuenta con el equipo adecuado.

5.4 Análisis de Datos

La norma indica que para empezar con el respectivo análisis de los datos en un viscosímetro Fann V-G modelo 35A, se debe preparar una curva de flujo, es decir una gráfica en coordenadas rectangulares del esfuerzo de corte (lbf/ft^2) vs la rata de corte (seg^{-1}), esto se debe hacer para cada temperatura a la cual se realizó la prueba. Sin duda alguna esto se puede realizar con el Bohlin Visco 88 debido a

que el software del viscosímetro va graficando en tiempo real a medida que va haciendo las lecturas de los datos.

Luego de esto la norma API RP 39 indica como analizar las gráficas realizadas en el paso anterior. Para esto la norma comenta que en el gráfico con coordenadas rectangulares se debe observar si la mayoría de los puntos recaen sobre una línea recta, si esta condición es cumplida entonces se puede decir que el fluido en cuestión es newtoniano, si los puntos de la curva de flujo no recaen sobre una línea recta, entonces el fluido es no newtoniano y si la curva de flujo tiene la tendencia a la línea recta pero dicha tendencia no arranca desde el valor de esfuerzo de corte a 0 sino de uno diferente, entonces el fluido es catalogado como un fluido plástico Bingham. Para cada caso existe un procedimiento que será mencionado a continuación.

5.4.1 Caso 1: Fluido Newtoniano

En este caso la viscosidad del fluido es el único parámetro requerido para realizar los cálculos de pérdidas de fricción. El valor de la viscosidad es equivalente a la pendiente de la curva de flujo en el gráfico cartesiano, sin embargo se puede trazar una línea recta de tendencia y una vez esto sea hecho la viscosidad puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$\mu \text{ centipoise} = 47.9x \left(\text{shearstress} \left(\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \right) @ 1000 \text{ sec}^{-1} \text{ shearrate} \right) \quad (\text{E-12})$$

5.4.2 Caso 2: Fluido No Newtoniano

La norma comenta que se debe preparar la curva de flujo en coordenadas logarítmicas y ajustar una línea recta de tendencia para el grupo de datos, en caso tal de que la línea no ajuste muy bien se debe decidir si en formato rectangular tiene un ajuste mas preciso que en formato logarítmico. Luego de esto se deben

hallar dos parámetros n y k para poder realizar los cálculos de pérdida de fricción. El índice de comportamiento de flujo n puede ser determinado una vez ha sido ajustada la línea de tendencia en la escala logarítmica, calculando la pendiente de la gráfica. Sin embargo se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \log_{10} \text{shearstress @ } 1000\text{sec}^{-1} - \log_{10} \text{shearstress @ } 100\text{sec}^{-1} \quad (\text{E-13})$$

El índice de consistencia k se halla leyendo el intercepto de la curva con el eje y para una rata de corte específica, esto es independiente para cada viscosímetro y cada usuario.

5.4.3 Caso 3: Fluidos Tipo Bingham

La norma comenta que el análisis de este tipo de fluidos no es incluido en esta sección debido a su manejo y a su poca existencia entre los fluidos de fracturamiento.

5.4.4 Cálculos con los resultados obtenidos

Para esta sección, han sido diseñados dos métodos para calcular pérdidas por fricción para el fluido en movimiento a través de tuberías, el anular y las fracturas. El método 1 es aplicado para fluidos clasificados como fluidos newtonianos. Si el fluido analizado, con el método 1 indica que se encuentra bajo régimen turbulento, entonces debe ser analizado con el método 2. El método 2 aplica para aquellos fluidos catalogados y caracterizados como fluidos no newtonianos. Es de suma importancia comentar, que en ambos métodos el flujo a través de la fractura es asumido como laminar. Las ecuaciones de estos métodos, pueden ser encontradas en el Anexo 1, sin embargo mas adelante se trabajaran todas estas ecuaciones en las secciones que tienen que ver con el análisis de los resultados

*CARACTERIZACION REOLOGICA DE UN FLUIDO DE FRACTURAMIENTO Y MANUAL DE OPERACIONES DEL
VISCOSIMETRO VISCO 88 DEL LABORATORIO DE PRUEBAS ESPECIALES EN LA UNIVERSIDAD
SURCOLOMBIANA*

obtenidos durante las pruebas de viscosidad hechas para validar la norma para el viscosímetro Bohlin Visco 88.

Capítulo 6. Manual de procedimientos del viscosímetro Bohlin Visco 88

6.1 Descripción general del equipo

Antes de describir los procedimientos que se pueden realizar con el equipo es necesario mencionar las partes del equipo, las precauciones que se deben tener al manipularlo, hablar de los distintos montajes que se pueden realizar con el equipo y luego si, definir los diferentes procedimientos que puede realizar este poderoso instrumento.

El viscosímetro Bohlin Visco 88 es un viscosímetro fácil de usar que provee medidas muy efectivas de la viscosidad para una o múltiples ratas de corte. El Bohlin Visco 88, se puede utilizar de manera manual o por medio de su software garantizando un control total sobre el por medio de alrededor de 250 velocidades. Sus principales características técnicas son:

Tabla 2. Características técnicas del viscosímetro Bohlin Visco 88.

Medida de la viscosidad de fluidos y pastas

Velocidades rotacionales	0 – 1000 rpm
Rango de la rata de corte	0 – $2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
Rango del torque	0 – 10 mNm
Rango del esfuerzo de corte	0 – 10^4 Pa
Rango de viscosidad	5 mPa.s – 10^7 mPa.s
Rango de temperatura	-35°C – 150°C
Voltaje de operación	9V (Batería recargable)

Sistema de medida estándar para equipar

Cilindros coaxiales DIN 53019 – Diámetros de 14 mm, 25 mm, 30 mm

Cilindros coaxiales no DIN – Wide Gap, Infinite sea

6.2 Partes del viscosímetro

El viscosímetro Bohlin Visco 88 del laboratorio de pruebas especiales LAPE de la Universidad Surcolombiana cuenta con las siguientes partes:

- **Viscosímetro portátil con termómetro incluido.**



Figura 36. Foto del viscosímetro Bohlin Visco 88.

- **Soporte del instrumento.**



Figura 37. Foto del soporte del viscosímetro Bohlin Visco 88.

- **Unidad adaptador / cargador AC / DC.**



Figura 38. Foto del adaptador / cargador del viscosímetro Bohlin Visco 88.

- **Salida RS-232 para control del torque desde un computador.**



Figura 39. Foto del cable RS-232 para controlar el viscosímetro por medio de un computador.

- **3 cilindros coaxiales estándar de sistema de media DIN en acero inoxidable con los tamaños de:**
 - Set de cilindro C14 – Copa 15.4 mm y rotor de 14 mm.
 - Set de cilindro C25 – Copa 27.5 mm y rotor de 25 mm.
 - Set de cilindro C30 – Copa 33 mm y rotor de 30mm.



Figura 40. Foto de las copas tipo DIN estándar que posee el viscosímetro Bohlin Visco 88.



Figura 41. Foto de los rotores tipo DIN estándar que posee el viscosímetro Bohlin Visco 88.

- **Software para Windows Viscosoft**
- **Chaqueta térmica con circulador manual para control de la temperatura en el Bohlin Visco 88.**



Figura 42. Foto de la chaqueta térmica que incluye circulador manual, del viscosímetro Bohlin Visco 88.

- **Sets de cilindros para la chaqueta térmica con tamaños de 15.4 mm, 27.5 mm y 33 mm.**



Figura 43. Foto de las copas especiales que se deben usar con la chaqueta térmica del viscosímetro Bohlin Visco 88.

Los siguientes equipos y materiales son de soporte para el viscosímetro y no hacen parte de este, es decir que no incluyen el paquete del viscosímetro y que se encuentran en el laboratorio de pruebas especiales LAPE, además el viscosímetro puede funcionar sin estos:

- **Computador tipo Desktop de uso investigativo.**



Figura 44. Foto de un computador tipo Desktop, soporte para realizar las pruebas de viscosidad por medio del software del viscosímetro.

- **Baño de maría**



Figura 45. Foto de un baño de maría o baño térmico.

- **Criostato**



Figura 46. Foto de un criostato.

- **Mangueras térmicas**



Figura 47. Foto de mangueras térmicas para realizar montajes de pruebas de viscosidad a diferentes temperaturas.

- **Bomba de fluidos**



Figura 48. Foto de una bomba de desplazamiento de fluidos, necesaria para hacer circular el fluido a través de la chaqueta térmica.

6.3 Montajes que se pueden hacer para correr diferentes pruebas en el viscosímetro Bohlin Visco 88

6.3.1 Generalidades

El viscosímetro Bohlin Visco 88 es un viscosímetro muy fácil de manejar y posee un gran alcance reológicamente hablando. Es decir que el viscosímetro es capaz de reproducir pruebas de curvas de flujo, curvas de viscosidad, pruebas de tixotropía, reopéxia y pruebas de histéresis a cualquier temperatura. Para poder alcanzar estos objetivos, se han hecho unos montajes en el laboratorio de pruebas especiales LAPE para lograr correr pruebas a temperatura ambiente, a altas temperaturas y a bajas temperaturas. Cabe mencionar que es importante realizar los montajes bajo la supervisión del encargado del laboratorio para así evitar fallos y cuidar la salud de los ejecutantes de las pruebas y el buen estado de los aparatos.

6.3.2 Montaje para pruebas a temperatura ambiente

Este tipo de montaje consiste en armar el viscosímetro de manera normal y ponerlo a funcionar con las geometrías estándar que este posee. Para poder

hacer esto, es necesario tener en cuenta que el viscosímetro está fijo en el laboratorio de pruebas especiales de la Universidad Surcolombiana, facilitando así el trabajo del montaje y remitiéndolo simplemente para el uso de los 8 tipos de geometrías que este posee. Para instalar cualquier tipo de geometría se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Seleccione el rotor y la copa adecuados para la medición a realizar.
- 2) Tome el rotor de la parte superior y en el viscosímetro presione hacia arriba la pestaña que se encuentra paralela al termómetro del viscosímetro. Luego inserte la parte superior del rotor hasta que suene un clic, luego suelte la pestaña del viscosímetro.
- 3) Escoja la copa del sistema de medida apropiado para el rotor insertado anteriormente e inserte la copa en el viscosímetro con las ranuras de la copa hacia arriba, una vez la copa no ceda más hacia arriba gírela hacia la derecha para asegurarse de que quede ajustada.

Para el llenado de la muestra se debe tener en cuenta el volumen necesario para cada geometría. El llenado de la muestra puede ser antes del paso 3 por medio de un beaker o se puede hacer después del paso 3 con una pipeta por medio de los orificios que poseen las copas en cada sistema de medición. Los volúmenes necesarios aproximados para trabajar en cada geometría son:

Tabla 3. Volúmenes aproximados para las geometrías del viscosímetro Bohlin Visco 88.

Sistema de medida	Volumen aproximado
C14	10 mm
C25	15 mm
C30	17 mm
C14 Infinite sea	-
C25 Infinite sea	-
C30 Infinite sea	-

C14 Wide gap	50 mm
C25 Wide gap	32 mm

Un tip para el llenado de la copa en cada sistema de medida puede ser llenar la copa hasta que la punta del termómetro del viscosímetro quede levemente sumergida en el líquido de la copa.

Después de hecho el montaje solo queda empezar con los pasos de la prueba que se encuentran las secciones posteriores.

6.3.3 Montaje para pruebas con temperaturas superiores a la temperatura ambiente

Para este tipo de montaje, se debe usar la chaqueta térmica que incluye el viscosímetro Bohlin Visco 88 y usar un equipo externo que regule la temperatura en la chaqueta, para esto deberá incluirse en el montaje una bomba que haga circular el fluido. Para explicar de manera más detallada este montaje se deben realizar los siguientes pasos:

- 1) Asegúrese contar con los materiales apropiados para el montaje, los cuales son: viscosímetro Bohlin Visco 88, chaqueta térmica, cilindros concéntricos para la chaqueta térmica, mangueras térmicas que conducirán el fluido, una bomba de fluidos y un baño de maría.
- 2) Inserte un extremo de la manguera en el baño de maría y el otro extremo conéctelo en la succión de la bomba.
- 3) Conecte la chaqueta térmica al viscosímetro empujando hacia arriba la chaqueta en el orificio inferior del viscosímetro, cuando ya no se pueda empujar mas la chaqueta se debe girar hacia la derecha para asegurar de que el montaje no se caiga.
- 4) Tome otra manguera y conecte un orificio en la descarga de la bomba y el otro extremo conéctelo en el orificio superior de la chaqueta térmica.

- 5) Tome otra manguera y conecte un extremo en el orificio inferior de la chaqueta térmica y el otro extremo de la manguera deposítelo en el baño de maría, para asegurar el reflujo del agua.
- 6) Prenda el baño de maría y con la asesoría del encargado del laboratorio de pruebas especiales determinen la temperatura deseada en el baño de maría.
- 7) Vierta agua en el tanque del baño de maría para dejar todo listo para encender el baño de maría y proseguir con las pruebas de viscosidad.

De esta manera, queda listo el montaje para que se hagan 2 tipos de procedimientos, ya sean de tipo manual o con el software del viscosímetro Bohlin Visco 88, los cuales serán explicados en las secciones siguientes.

6.3.4 Montaje para pruebas con temperaturas inferiores a la temperatura ambiente.

En este tipo de montaje se debe usar la chaqueta térmica que incluye el viscosímetro Bohlin Visco 88 y un equipo externo al viscosímetro que regule la temperatura, además se requiere de una pequeña bomba de fluidos que regule la temperatura del sistema y con la cual se pueda hacer reflujo del líquido enfriador. Como realizar el montaje, se explica en los siguientes pasos:

- 1) Asegúrese contar con los materiales apropiados para el montaje y la asesoría del encargado del laboratorio, los cuales son: viscosímetro Bohlin Visco 88, chaqueta térmica, cilindros concéntricos para la chaqueta térmica, mangueras térmicas que conducirán el fluido, una bomba de fluidos y el criostato del laboratorio de pruebas especiales LAPE.
- 2) Inserte un extremo de la manguera en uno de los orificios del criostato y el otro extremo en la succión de la bomba.
- 3) Conecte la chaqueta térmica al viscosímetro empujando hacia arriba la chaqueta en el orificio inferior del viscosímetro, cuando ya no se pueda

empujar mas la chaqueta se debe girar hacia la derecha para asegurar de que el montaje no se caiga.

- 4) Tome otra manguera y conecte un orificio en la descarga de la bomba y el otro extremo conéctelo en el orificio superior de la chaqueta térmica.
- 5) Tome otra manguera y conecte un extremo en el orificio inferior de la chaqueta térmica y el otro extremo de la manguera deposítelo en un orificio del criostato, para asegurar el reflujo del líquido enfriador (glicol).
- 6) Prenda el criostato y con la asesoría del encargado del laboratorio de pruebas especiales determinen la temperatura deseada en el criostato. Cabe mencionar que se debe tener mucho cuidado con el manejo del fluido del criostato.

6.4 Procedimientos para realizar ensayos con el viscosímetro Bohlin Visco 88

6.4.1 Generalidades

El viscosímetro Bohlin Visco 88 que posee la Universidad Surcolombiana cuenta con los sistemas de medición de cilindros coaxiales. Estos sistemas de medición son muy prácticos y fáciles de manejar, sin embargo requieren una gran cantidad de muestra de fluido si se compara con la cantidad de líquido requerida por otros sistemas de medición. Además debido a la cantidad de muestra se pueden producir problemas de inercia cuando se desarrollan pruebas en altas frecuencias. Como ventajas con otros sistemas de medición se puede destacar que los sistemas de cilindros concéntricos son muy aptos para trabajar con materiales de baja viscosidad y suspensiones móviles. Además al poseer una gran área superficial, aumenta la sensibilidad del equipo produciendo muy buena información a bajas ratas de corte. Se pueden mencionar también como ventajas de los cilindros concéntricos su buena repetibilidad y su excelente manejo del control de la temperatura. La siguiente grafica muestra el amplio rango de viscosidades que manejan los cilindros concéntricos en sus diferentes sistemas de medición.

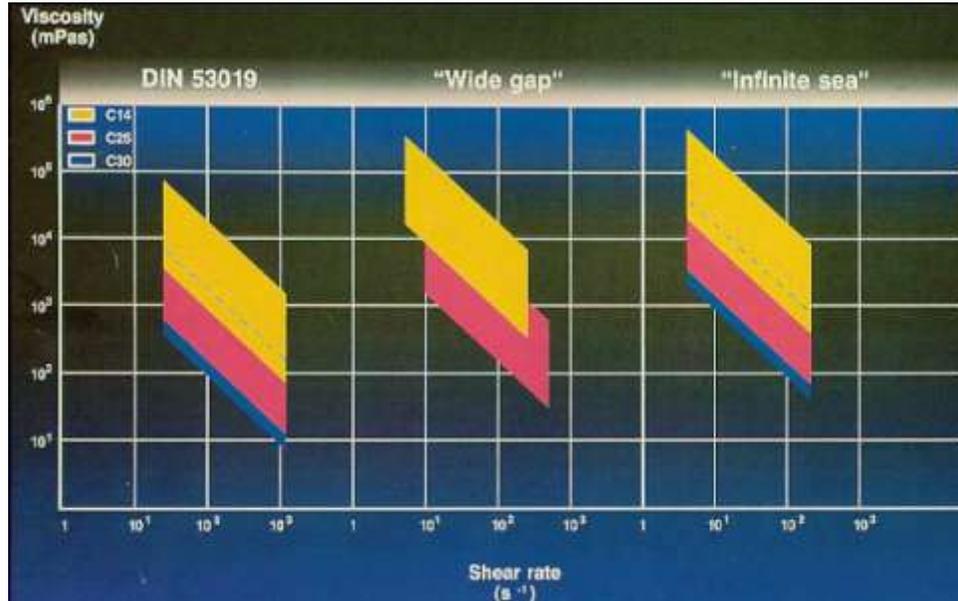


Figura 49. Rangos de viscosidad de los sistemas de medición de cilindros concéntricos.

Después de hacer una breve descripción sobre las ventajas de los sistemas de medición que posee el viscosímetro Bohlin Visco 88, procederemos a describir los procedimientos para efectuar distintos tipos de pruebas con el viscosímetro.

6.4.2 Distintas pruebas que se pueden correr con el viscosímetro Bohlin Visco 88

6.4.2.1 Pruebas Manuales

Este tipo de pruebas consiste en realizar pruebas sencillas de viscosidad para generar curvas de flujo y de viscosidad sin necesidad de usar el software del Bohlin Visco 88. Las pruebas manuales del viscosímetro se pueden hacer para cualquier temperatura haciendo los montajes descritos en las secciones anteriores. Estos ensayos tienen como ventaja su ahorro de tiempo en la corrida de la prueba, su fácil manejo y su repetibilidad. Y como desventaja de este tipo de pruebas, se puede destacar su limitada libertad para realizar trabajos de mayor

investigación en los cuales se hacen análisis profundos de las variables reológicas, limitando a las pruebas manuales a la generación de curvas de flujo y curvas de viscosidad.

El procedimiento para realizar una prueba con el Bohlin Visco 88 de manera manual es el siguiente:

- 1) Use el adaptador de corriente alterna AC para conectarlo con el viscosímetro Bohlin Visco 88.
- 2) Presione el botón ON/OFF que está en el viscosímetro para encender el aparato, al realizar este paso asegúrese de que la palabra "OFF" aparezca en la minipantalla del viscosímetro.
- 3) Antes de realizar la prueba como tal es necesario comprobar que no sea imprescindible ajustar el torque residual del motor. Para comprobar esto, se debe realizar un pequeño procedimiento antes de que cualquier montaje sea hecho. Los pasos de este sub-procedimiento para comprobar que no es necesario calibrar el torque residual del viscosímetro son:
 - a) Presione el botón START del tablero del viscosímetro para encender el motor, la manija del tablero que dice SYSTEM puede estar en cualquier posición.
 - b) Presione el botón FUNCTION del tablero del viscosímetro hasta que usted vea que en la minipantalla del viscosímetro aparezca la variable torque M (mNm) con su respectivo valor.
 - c) Deje correr el motor por 30 segundos aproximadamente. Luego mueva la manija del viscosímetro que dice SPEED y lea el valor del torque para las velocidades 1 hasta la velocidad 4. Si el valor del torque para cualquiera de estas 4 velocidades más bajas es mayor a ± 0.01 mNm es necesario ejecutar el ajuste zero.
 - d) Presione el botón START de nuevo para apagar el motor.

- 4) Si el valor del torque es alto para cualquiera de las primeras 4 velocidades del viscosímetro es necesario ejecutar un ajuste zero y para este pequeño procedimiento, tampoco debe ser realizado ningún montaje de sistemas de medida sobre el viscosímetro.
- a) Presione el botón START del tablero del viscosímetro sin importar la posición de las manijas SPEED y SYSTEM y deje correr el motor por 30 segundos aproximadamente.
 - b) Presione el botón START de nuevo para detener el motor.
 - c) Presione el botón FUNCTION del tablero del viscosímetro hasta que la palabra “Cal” aparezca en la minipantalla del viscosímetro.
 - d) Mantenga presionado el botón CAL del tablero del viscosímetro hasta que usted sienta que el motor se encendió de nuevo. De esta manera se ejecutara el ajuste zero de manera automática para todas las velocidades, empezando desde la menor.
- 5) Después de realizada la revisión del torque residual del viscosímetro se procede a elegir la velocidad a la cual se realizara la prueba, para esto se debe ajustar la velocidad con la manija del viscosímetro que dice SPEED, esta manija permite al viscosímetro trabajar en 8 velocidades diferentes. Sin embargo esos valores son nominales y los valores reales son mostrados en la minipantalla del viscosímetro.

Tabla 4. Velocidades que posee el viscosímetro Bohlin Visco 88.

Posición de la manija SPEED	ROTACION (rpm)	VELOCIDAD (Hz)
1	20	0.33
2	35	0.58
3	61	1.02
4	107	1.78
5	187	3.12

6	327	5.45
7	572	9.53
8	1000	16.67

6) Después de escogida la velocidad se procede a escoger el sistema de medición. El viscosímetro Bohlin Visco 88 de la Universidad Surcolombiana posee 8 sistemas de medida que pueden ser escogidos de la manija SYSTEM del tablero del viscosímetro. Cada sistema de medida es para un cilindro distinto.

Tabla 5. Sistema de medida, volumen estimado para cada sistema y su respectiva posición en el tablero del viscosímetro Bohlin Visco 88.

Sistema de medida	Posición en la manija SYSTEM	Volumen estimado de muestra para cada sistema
C14	1	10 ml
C25	2	14 ml
C30	3	17 ml
“Infinite Sea” C14	4	-
“Infinite Sea” C25	5	-
“Infinite Sea” C30	6	-
“Wide gap” C14	7	50 ml
“Wide gap” C25	8	32 ml

Después de escogido el sistema de medida apropiado para el fluido a analizar, se debe hacer un pequeño procedimiento para correr el motor, leer el torque y asegurarse de que el sistema escogido era el apropiado.

- a) Realice el montaje siguiendo los pasos de la sección de montajes descrita anteriormente, y llene la copa con el volumen estimado de fluido para el sistema de medida apropiado.
- b) Presione el botón START para encender el motor a la velocidad escogida.

- c) Presione el botón FUNCTION hasta que la variable torque M aparezca en la minipantalla del viscosímetro.
 - d) Lea el valor del torque y revise que el valor este por encima de 0,5 mNm.
 - e) Presione el botón START para detener el motor.
 - f) Si el valor del torque es por debajo de 0,5 mNm, use un sistema de medida más sensible para el fluido, es decir un sistema de medida con mayor diámetro de copa o aumente la velocidad del equipo. Y si el valor del torque está por encima de 9,5 mNm use un sistema de medido menos sensible para el fluido, es decir un sistema de medida con menor diámetro de copa o selecciona una velocidad inferior.
- 7) Después de haber hecho los pasos anteriores, y de haber realizado algún montaje, asegúrese que el sensor de temperatura del viscosímetro este sumergido alrededor de 5 mm de la superficie de la muestra. Seleccione la velocidad y el sistema de medida apropiados, y seguidamente presione el botón START para empezar con la prueba. Durante la medida, pueden ser observados los valores de distintas variables presionando el botón FUNCTION del tablero del viscosímetro. Entre estas variables están: rata de corte, esfuerzo de corte, viscosidad, temperatura, torque y frecuencia. Retomando el objetivo de este procedimiento, el cual es generar curvas de flujo y de viscosidad de manera manual, se debe registrar el valor de la rata de corte, el esfuerzo de corte y la viscosidad para cada velocidad escogida.
- 8) Como paso final, se debe registrar y graficar las debidas curvas de flujo y viscosidad para hacer el respectivo análisis reológico sobre qué tipo de fluido se trabaja.

6.4.2.2 Pruebas sistematizadas

Este tipo de pruebas, consiste en realizar un procedimiento específico de una manera automatizada, es decir programar los distintos pasos de la prueba a través

de un software. Este tipo de pruebas son más específicas, verídicas y complejas, debido a que con el software del viscosímetro Bohlin Visco 88 se pueden realizar distintos procedimientos, dependiendo de las propiedades que se quieran conocer de un fluido. Cabe resaltar, que este tipo de pruebas se pueden correr para cualquier temperatura deseada siempre y cuando se realice alguno de los montajes descritos anteriormente. Los procedimientos realizables con este tipo de pruebas se describen a continuación.

6.4.2.2.1 Curvas de flujo y de viscosidad

Antes de realizar esta prueba, asegúrese de que el montaje para la temperatura requerida este hecho, también que el sistema de medida este asegurado y que el viscosímetro este conectado a la fuente de energía con su respectivo adaptador. Luego si se deben realizar los siguientes pasos:

- 1) Revise que el cable RS-232 del viscosímetro este conectado, si no lo esta inserte el extremo hembra en el puerto serial del computador de trabajo, y el puerto macho debe ser insertado en la parte trasera del viscosímetro.
- 2) Luego de esto, encienda el viscosímetro presionando la tecla ON/OFF. Seguidamente la palabra OFF deberá aparecer en la minipantalla del viscosímetro.
- 3) Encienda el computador de trabajo y busque en el escritorio de trabajo el icono del software del viscosímetro, este icono tiene como nombre “Bohlin R6.50.5.7”, si no encuentra el icono con ese nombre en el escritorio puede ejecutar el software siguiendo las siguientes instrucciones:
 - a) Clic en “Inicio”.
 - b) Luego Clic en “Todos los programas”.
 - c) Clic en “Bohlin”.
 - d) Clic en “Bohlin R6.50.5.7”.



Figura 50. Imagen capturada del escritorio del computador del laboratorio de pruebas especiales.

- 4) Al iniciar el software aparece un letrero titulado “USER LOGIN SCREEN”, para poder ingresar al software debe ingresar un nombre de usuario y una contraseña. Para efectos netamente académicos, se ha creado una sesión con nombre de usuario “user” y su contraseña o password es la palabra “cofa”. En caso tal de que dicha cuenta no este disponible, entonces digite la palabra “supervisor” en el nombre de usuario y no digite ninguna contraseña. Use esta manera de entrar solamente si el usuario “user” no esta disponible.



Figura 51. Imagen capturada del menú de ingreso al software Bohlin R6.50.5.7.

- 5) Haga clic en el botón “VISCOMETRY” para acceder al panel de edición de parámetros de la prueba.

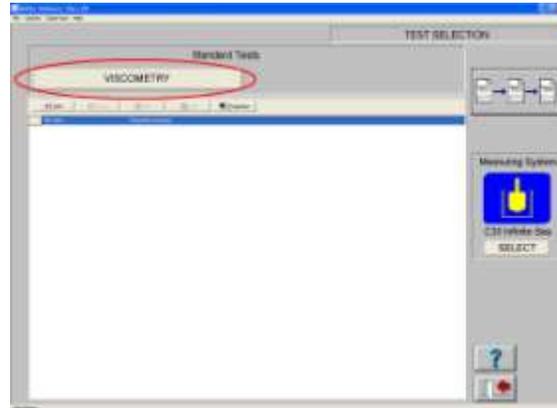


Figura 52. Imagen capturada de la interfaz gráfica del menú principal del software Bohlin R6.50.5.7.

- 6) Lo primero que se debe hacer es ajustar el sistema de medición, es decir seleccionar la geometría con la cual se va a trabajar. Para esto busque en el panel derecho de la ventana, un botón con la palabra “SELECT”, seguidamente aparecerá una sub-ventana titulada “SELECT MEASURING SYSTEM”, esta sub-ventana incluye un listado con las geometrías o sistemas de medida que se cuenta en la universidad. Seleccione el sistema apropiado y haga clic en el botón OK.

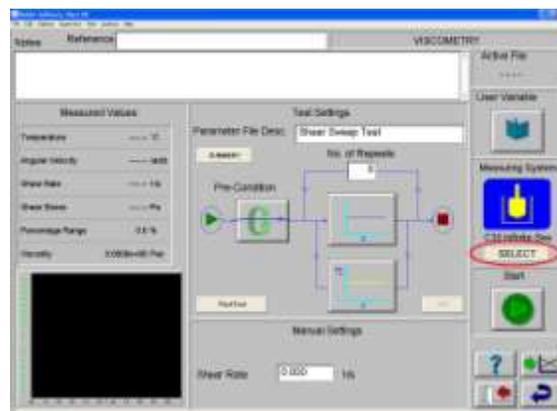


Figura 53. Imagen capturada de la interfaz del menú “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7 resaltando el botón “SELECT”

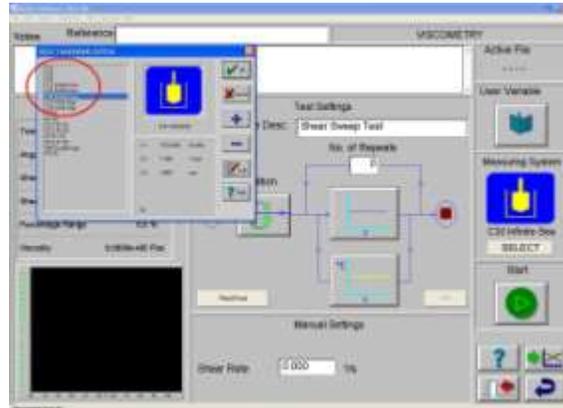


Figura 54. Imagen capturada de la interfaz de selección de sistema de medición del software Bohlin R6.50.5.7.

- 7) Luego de escoger el sistema de medición o geometría, se debe ajustar la velocidad de trabajo y otros parámetros propios de la forma en que se hará la medición. Para esto haga clic en el icono “Parámetros de viscometría” cuya forma es una gráfica de rata de corte vs esfuerzo de corte.

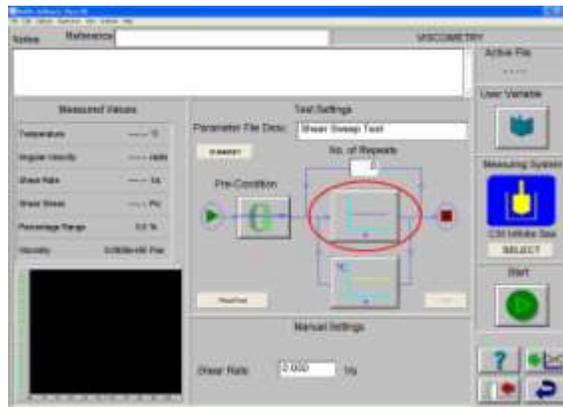


Figura 55. Imagen capturada de la interfaz del menú “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7 resaltando la gráfica-botón “parámetros de viscometría”.

- 8) Escoja si la prueba realizada será para un valor de rata de corte o para un set específico de ratas de corte. Esto se realiza haciendo clic en la primer pestaña superior izquierda.



Figura 56. Imagen capturada de la interfaz del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 resaltando la pestaña de selección de tipo de prueba.

- 9) Si escogió un solo valor de rata de corte, ingrese el valor de la rata de corte en la parte inferior, si escogió un set de ratas de corte, deberá ingresar el valor mínimo y el valor máximo de las ratas de corte deseadas. Si ingresa un valor inferior o superior al rango de ratas de corte para el sistema de medido escogido el software automáticamente escogerá el valor inferior o superior de rata de corte permitido.

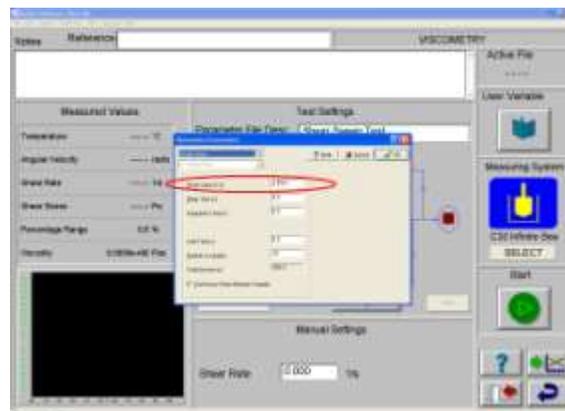


Figura 57. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para una sola rata de corte señalando la casilla de ingreso del valor de la rata de corte.

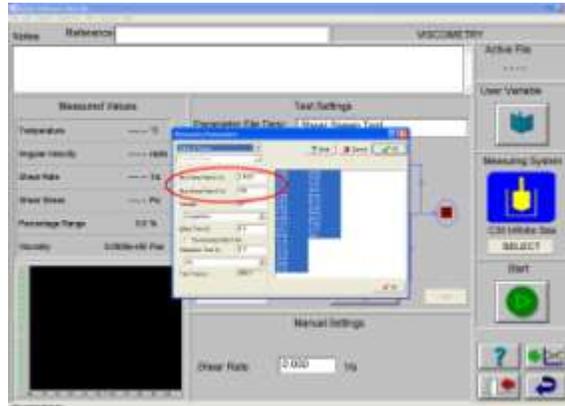


Figura 58. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para múltiples ratas de corte señalando las casillas de ingreso del valor mínimo y máximo de ratas de corte.

10) Seguidamente escoja el numero de datos o lecturas que usted desea que el viscosímetro realice, esto se escribe en la casilla que dice “samples”.

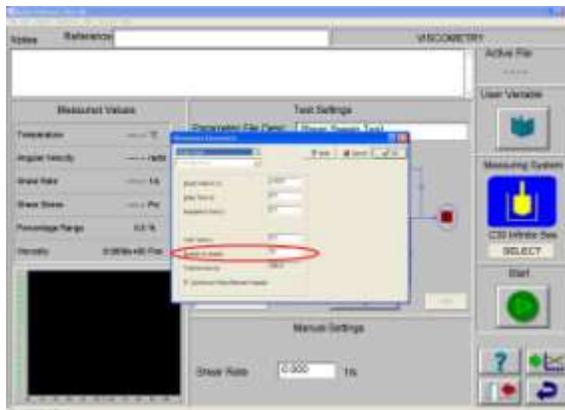


Figura 59. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para una sola rata de corte señalando la casilla de ingreso del valor del número de lecturas a realizar.

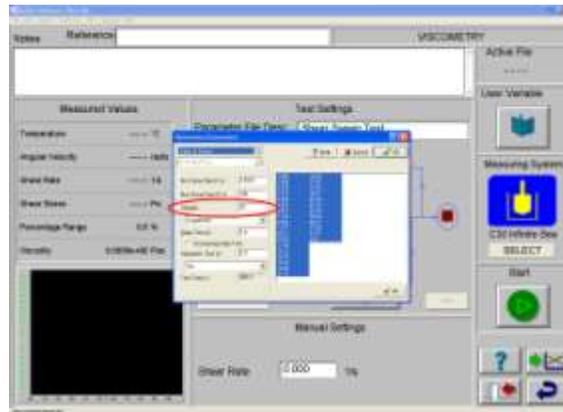


Figura 60. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para múltiples ratas de corte señalando la casilla de ingreso del valor del número de lecturas a realizar.

- 11) Si se está trabajando con un rango de ratas de corte, se puede decidir el incremento en la tasa de corte desde el valor mínimo, hasta el valor máximo entre un modelo lineal y un modelo logarítmico. Esto se decide en la pestaña inferior a la casilla “sample”.

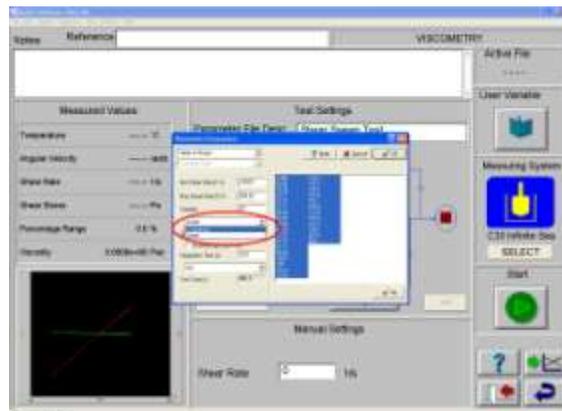


Figura 61. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para múltiples ratas de corte señalando el tipo de distribución entre el rango de ratas de corte seleccionadas.

- 12) Seguidamente se escoge el “delay time”, el valor en esta casilla será el tiempo en segundos en que se agitará la muestra con un valor de tasa de corte respectivo, sin ejecutar medición alguna. Esto es con el fin de permitir

que el fluido alcance un equilibrio de flujo entre cada valor de rata de corte aplicado.

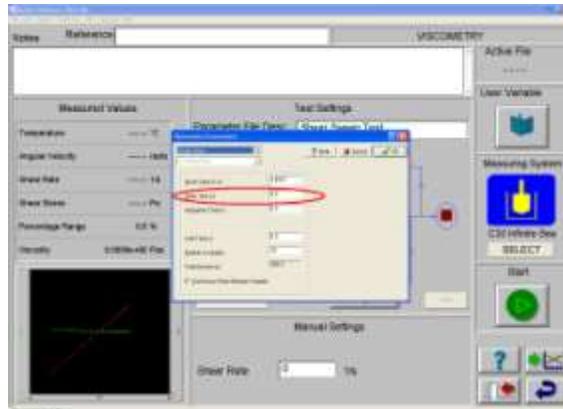


Figura 62. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para una sola rata de corte señalando la casilla “delay time”.

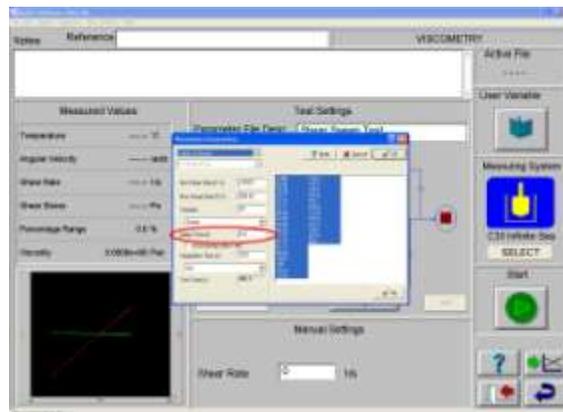


Figura 63. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para múltiples ratas de corte señalando la casilla “delay time”.

- 13) Luego de esto, se ingresa el valor del “integration time”, este es el tiempo en el cual se realiza la medición de un punto de muestra. Es decir que el valor representativo para un punto de la muestra será igual al promedio de los valores instantáneos tomados durante el “integration time”.

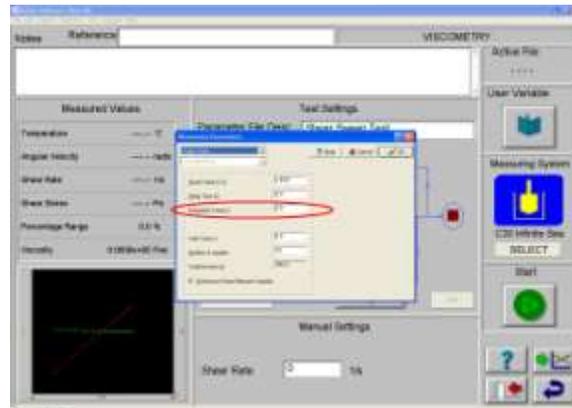


Figura 64. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para una sola rata de corte señalando la casilla “integration time”.

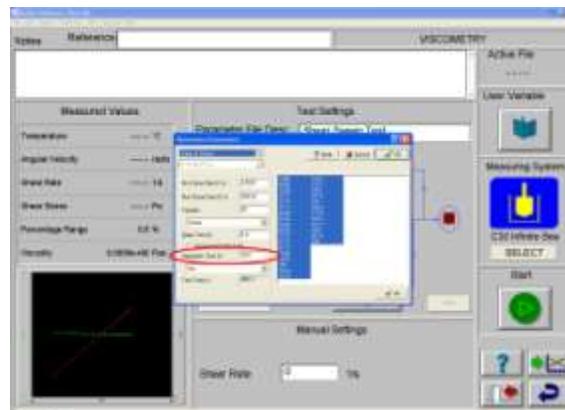


Figura 65. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para múltiples ratas de corte señalando la casilla “integration time”.

- 14) Si se escogió trabajar con un solo valor de rata de corte se debe escoger el “wait time”. Este tiempo es el tiempo en el cual el viscosímetro no aplicará ningún esfuerzo al sistema después del “integration time” y antes del “delay time”.

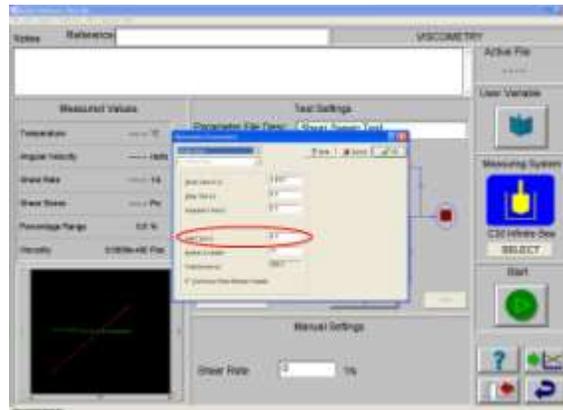


Figura 66. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para una sola rata de corte señalando la casilla “wait time”.

15) Si escogió trabajar con un rango de ratas de corte, deberá ingresar al sistema la manera en que usted desea que se apliquen los esfuerzos, es decir si se quiere que la prueba arranque desde el máximo valor hasta el mínimo valor o si se desea por el contrario que arranque desde el mínimo valor de esfuerzo y llegar hasta el máximo valor de esfuerzo. Esto se decide en la pestaña inferior izquierda. Si se escoge “Up” indica que la prueba se realizara desde el mínimo esfuerzo hasta el máximo esfuerzo, si se escoge “Down” La prueba iniciara en el máximo valor de esfuerzo y se ira aplicando hasta llegar al valor mínimo.



Figura 67. Imagen capturada del menú “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 para múltiples ratas de corte resaltando la pestaña que indica el orden en que se aplicarán los esfuerzos.

16) Después de esto, se debe cerrar la ventana y arrancar la prueba haciendo clic en el botón “START” en el panel derecho. Seguidamente aparecerá otra ventana que incluirá la información de la prueba, entre esta información se encuentra, el tiempo restante de la prueba, los valores de los parámetros leídos y una ventana en la cual se puede graficar cualquier variable medida en tiempo real. En este momento el motor del viscosímetro empieza a funcionar a los valores de tasa de corte programados.

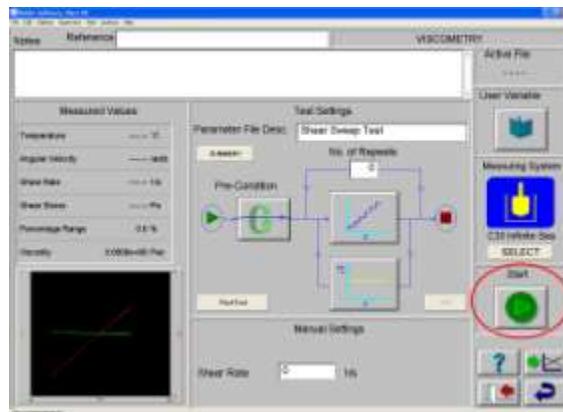


Figura 68. Imagen capturada de la interfaz del menú “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7 resaltando el botón “START”.

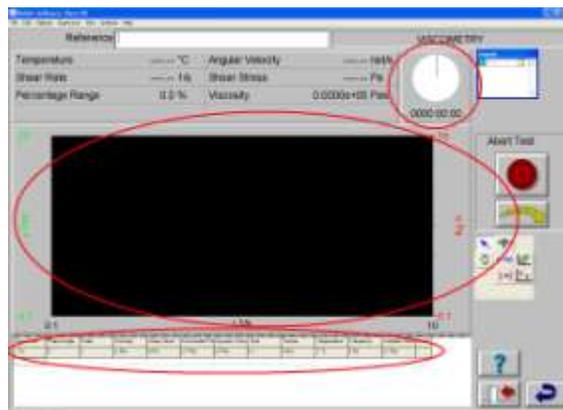


Figura 69. Imagen capturada de la interfaz presentada al presionar el botón “START” en el menú “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7, indicando las zonas de la pantalla donde se presentará la información obtenida durante la prueba.

- 17) Al acabar la prueba aparece una ventana avisando que la prueba ha finalizado y se recomienda guardar la información obtenida. Para realizar esto se debe hacer clic en el menú "file" y luego en "save".

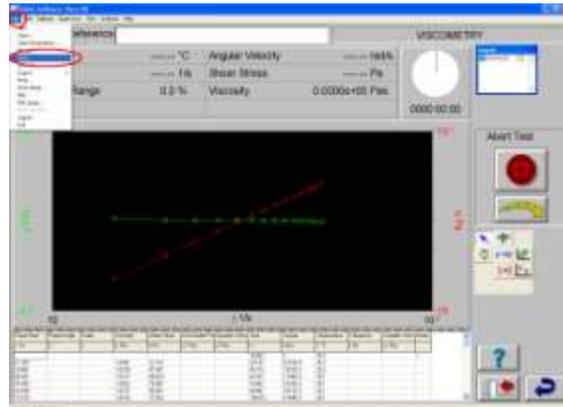


Figura 70. Imagen capturada de la interfaz de presentación de datos obtenidos del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el menú "file".

- 18) Una vez se ha guardado la información se pueden realizar varios trabajos con esta, los principales usos que se da a esta información varían desde copiar las variables registradas a un archivo de Microsoft Office, simular modelos reológicos desde el software, imprimir las graficas, imprimir las variables registradas, entre otras.

6.4.2.2 Prueba de regeneración estructural

Esta prueba debe realizarse en 2 etapas, la primera etapa consiste en medir las propiedades reológicas de un fluido a un mismo valor de tasa de corte aplicado para ver que las propiedades de este sean constantes durante ese valor de tasa de corte. La segunda etapa consiste en agitar el fluido a grandes tasas de corte para destruir las estructuras del fluido, para luego aplicar el mismo valor de tasa de corte de la primera etapa y observar como se regenera el fluido a través del tiempo. Luego se hacen los respectivos análisis con los valores obtenidos. Antes de empezar a describir el procedimiento cabe mencionar que el montaje para la

temperatura deseada debe estar ya hecho, junto con el montaje del sistema de medida o geometría, también que el viscosímetro este conectado a la fuente de poder o adaptador. Hechas las aclaraciones anteriores se puede empezar a describir el procedimiento en 2 etapas.

- **Etapa 1**

- 1) Revise que el cable RS-232 del viscosímetro este conectado, si no lo está inserte el extremo hembra en el puerto serial del computador de trabajo, y el puerto macho debe ser insertado en la parte trasera del viscosímetro.
- 2) Luego de esto, encienda el viscosímetro presionando la tecla ON/OFF. Seguidamente la palabra OFF deberá aparecer en la minipantalla del viscosímetro.
- 3) Encienda el computador de trabajo y ejecute el software del viscosímetro, el nombre del software es “Bohlin R6.50.5.7”, el programa del viscosímetro también se puede ejecutar de la siguiente manera:
 - e) Haga clic en “Inicio”.
 - f) Luego clic en “Todos los programas”.
 - g) Haga clic en “Bohlin”.
 - h) Haga clic en “Bohlin R6.50.5.7”.



Figura 71. Imagen capturada del escritorio del computador del laboratorio de pruebas especiales, indicando el icono del software Bohlin R6.50.5.7.

- 4) Ingrese un nombre de usuario y contraseña para trabajar con el software. Para efectos netamente académicos, se ha creado una sesión con nombre de usuario “user” y su contraseña es la palabra “cofa”. En caso tal de que dicha cuenta no este disponible, entonces digite la palabra “supervisor” en el nombre de usuario y no digite ninguna contraseña. Use esta manera de entrar solamente si el usuario “user” no esta disponible.



Figura 72. Imagen capturada de la interfaz de ingreso al software Bohlin R6.50.5.7. Indicando las casillas “USER NAME” y “PASSWORD”.

- 5) Haga clic en el botón “VISCOMETRY” para acceder al panel de edición de parámetros de la prueba.

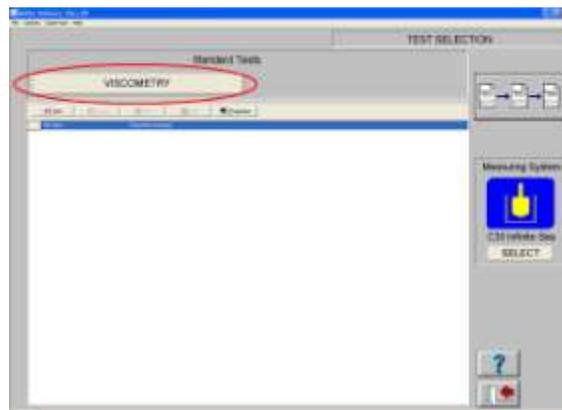


Figura 73. Imagen capturada de la interfaz principal del software Bohlin R6.50.5.7. Señalando el botón “VISCOMETRY”

- 6) Seleccione la geometría con la cual se trabajara durante la prueba. Para esto busque en el panel derecho de la ventana, un botón con la palabra “SELECT”, seguidamente aparecerá una sub-ventana titulada “SELECT MEASURING SYSTEM” esta sub-ventana incluye un listado con las geometrías o sistemas de medida que se cuenta en la universidad. Seleccione el sistema apropiado y de clic en el botón “OK”.

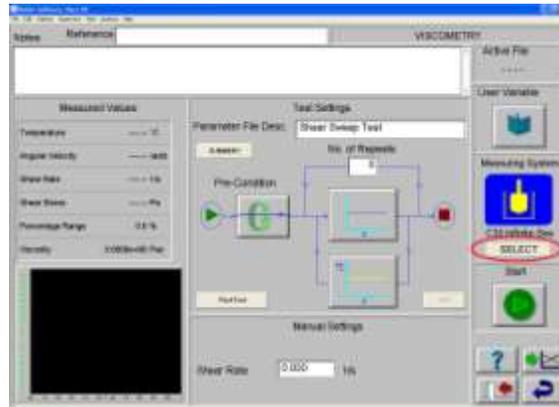


Figura 74. Imagen capturada de la interfaz del menú “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7 señalando el botón “SELECT”.

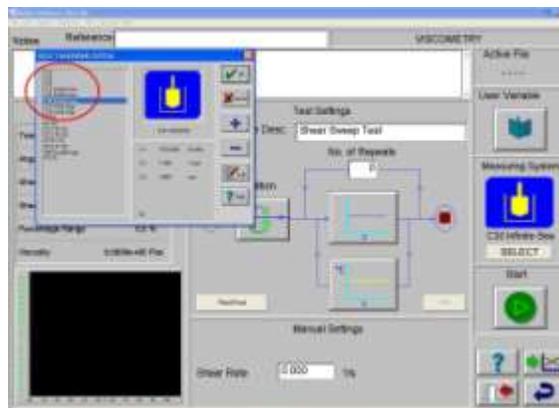


Figura 75. Imagen capturada de la interfaz desplegada al presionar el botón “SELECT” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando las geometrías disponibles para el viscosímetro.

- 7) Luego de escoger el sistema de medición o geometría, se debe ajustar la velocidad de trabajo y otros parámetros propios de la forma en que se hará

la medición. Para esto haga clic en el botón “Parámetros de viscometria” cuya forma es una gráfica de rata de corte vs esfuerzo de corte.

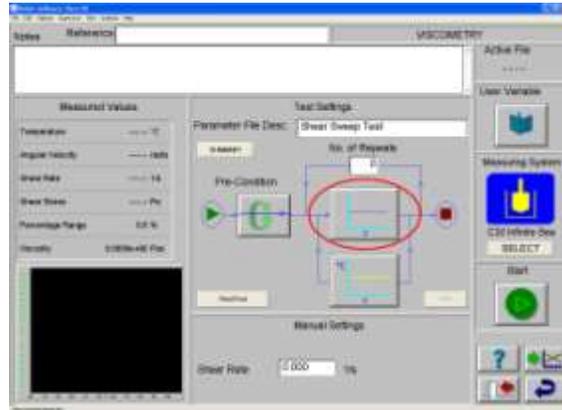


Figura 76. Imagen capturada de la interfaz del menú “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la gráfica-botón “parámetros de viscometria”.

- 8) En la pestaña de selección de rata de corte, escoja que la prueba será realizada a un valor de rata de corte constante haciendo clic en la opción “Single Shear”.

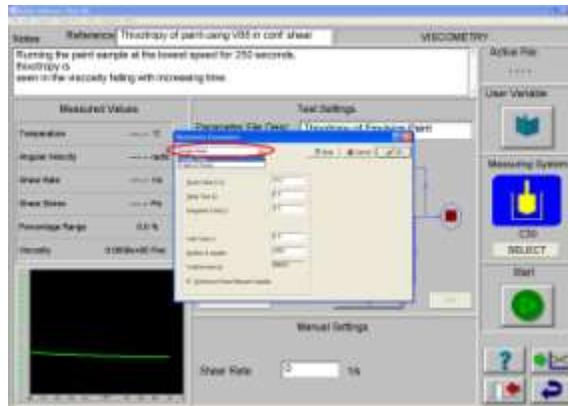


Figura 77. Imagen capturada de la interfaz “parámetros de viscometria” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la pestaña de selección de tipo de rata de corte aplicada.

- 9) Ingrese el valor de la rata de corte aplicada, como es una prueba de tixotropía, el valor a aplicar tiene que ser muy bajo para asegurarse de que

no se destruirán las estructuras del fluido, también se tiene que asegurar de que al aplicar la rata de corte, el valor del torque del viscosímetro este dentro del rango de 0,5 – 9,5 mNm, para que los valores de los parámetros sean confiables.

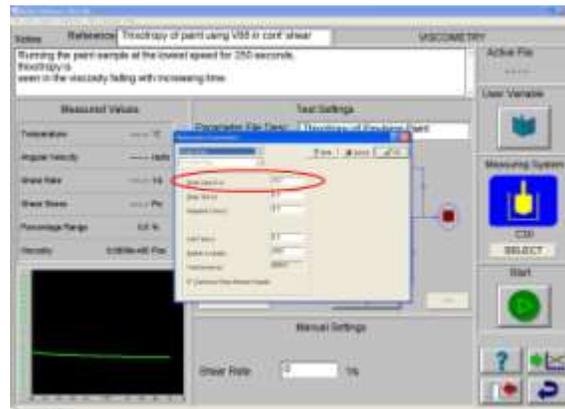


Figura 78. Imagen capturada de la interfaz “parámetros de viscometria” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la casilla del valor de la rata de corte a aplicar.

10) Seguidamente escoja el numero de datos o lecturas que usted desea que el viscosímetro realice, esto se escribe en la casilla que dice “samples”. Para esta prueba trate de escoger un número alto de lecturas para poder analizar si el fluido es tiempo-dependiente.



Figura 79. Imagen capturada de la interfaz “parámetros de viscometria” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la casilla de número de lecturas a realizar.

11) Seguidamente se escoge el “delay time”, el valor en esta casilla será el tiempo en segundos en que se agitará la muestra con un valor de tasa de corte respectivo, sin ejecutar medición alguna. Esto es con el fin de permitir que el fluido alcance un equilibrio de flujo entre cada valor de tasa de corte aplicado.

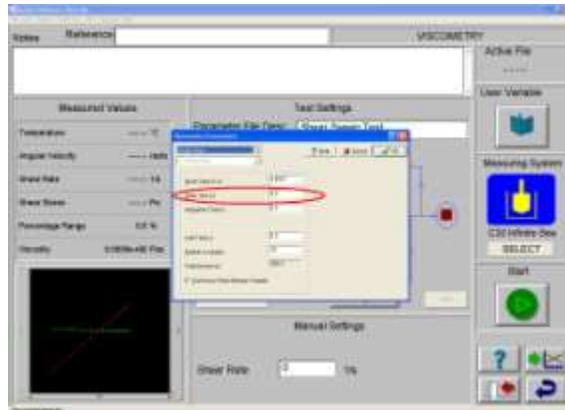


Figura 80. Imagen capturada de la interfaz “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la casilla “delay time”..

12) Luego de esto, se ingresa el valor del “integration time”, este es el tiempo en el cual se realiza la medición de un punto de muestra. Es decir que el valor representativo para un punto de la muestra será igual al promedio de los valores instantáneos tomados durante el “integration time”.

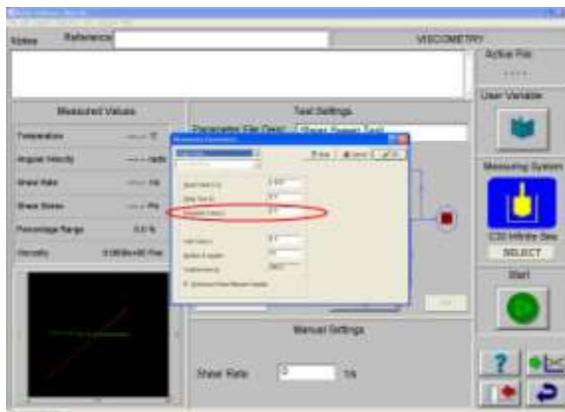


Figura 81. Imagen capturada de la interfaz “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la casilla “integration time”.

- 13) Si se escogió trabajar con un solo valor de tasa de corte se debe escoger el “wait time”. Este tiempo es el tiempo en el cual el viscosímetro no aplicará ningún esfuerzo al sistema después del “integration time” y antes del “delay time”.

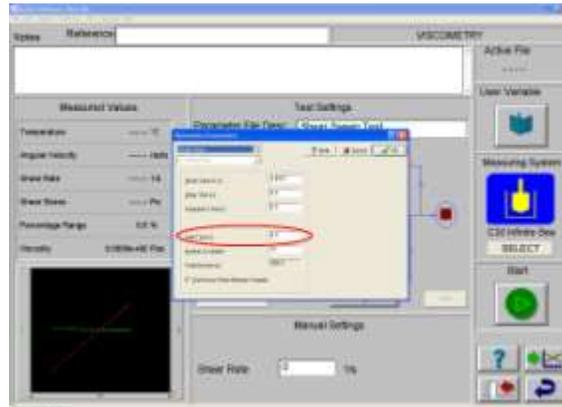


Figura 82. Imagen capturada de la interfaz “parámetros de viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la casilla “integration time”.

- 14) Después de esto, se debe cerrar la ventana y empezar la prueba haciendo clic en el botón “START” en el panel derecho. Seguidamente aparecerá otra ventana que incluirá la información de la prueba, entre esta información se encuentra, el tiempo restante de la prueba, los valores de los parámetros leídos y una ventana en la cual se puede graficar cualquier variable medida en tiempo real. En este momento el motor del viscosímetro empieza a funcionar al valor de tasa de corte programado.

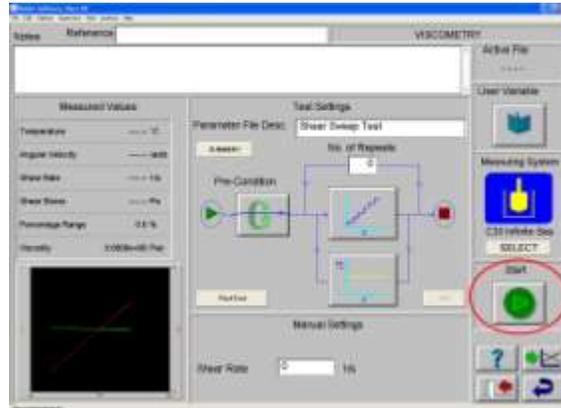


Figura 83. Imagen capturada de la interfaz “VISCOMETRY” del software Bohlin R6.50.5.7 señalando el botón “START”.

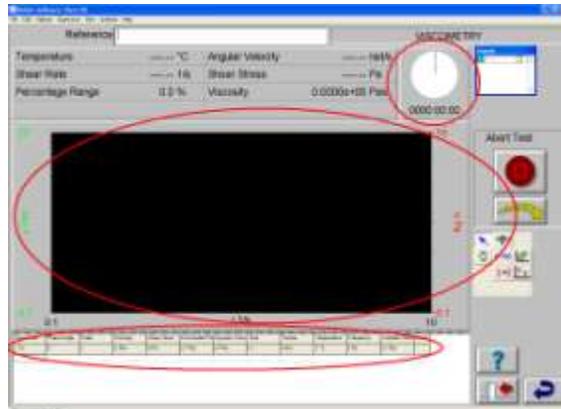


Figura 84. Imagen capturada de la interfaz de visualización de parámetros leídos durante una prueba del software Bohlin R6.50.5.7 señalando las zonas donde se mostrarán en tiempo real los parámetros leídos.

15) Al acabar la prueba aparece una ventana avisando que la prueba ha finalizado y se recomienda guardar la información obtenida. Para realizar esto se debe hacer clic en el menú “file” y luego en “save”.

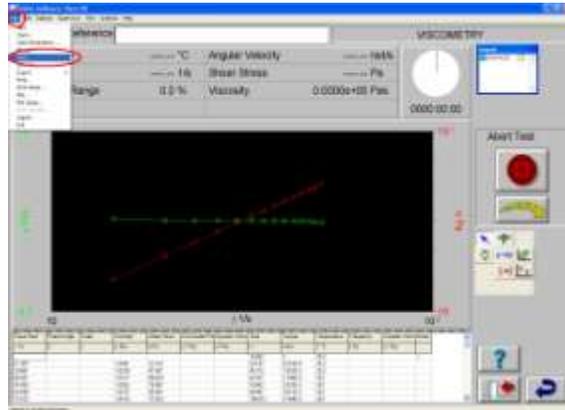


Figura 85. Imagen capturada de la interfaz de visualización de parámetros leídos durante una prueba del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el menú “file”.

16) Una vez se ha guardado la información, se debe copiar en Microsoft Excel, para tener esta información como la información patrón o base para compararla con la información obtenida durante la etapa 2. Terminada esta etapa, puede cerrar el programa o simplemente volver a la pantalla de selección de parámetros, haciendo clic en el botón “Return”.

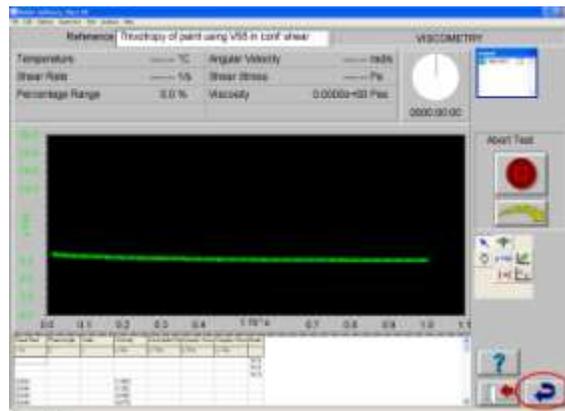


Figura 86. Imagen capturada de la interfaz de visualización de parámetros leídos durante una prueba del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el botón “return”.

- **Etap 2**

- 1) Después de haber finalizado la etapa 1, se deja el software del viscosímetro en la ventana “VISCOMETRY” y se selecciona la geometría respectiva para trabajar.
- 2) Luego de esto se hace clic en el botón “Pre-condition” para hacer unos ajustes previos a la corrida.

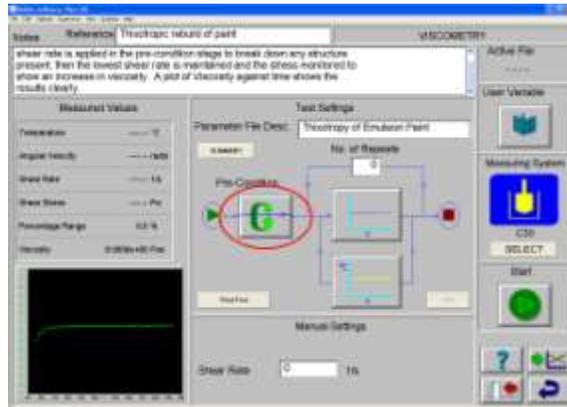


Figura 87. Imagen capturada de la interfaz “viscometría” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el botón “pre-condition”.

- 3) Ahora se hace clic en la opción “Apply pre-shear” para poder habilitar el pre-condicionamiento que se realizará a la muestra.

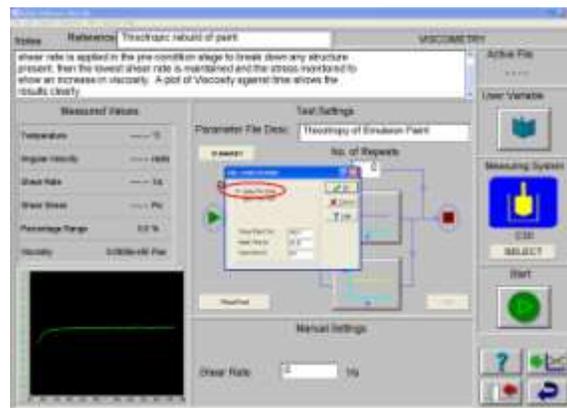


Figura 88. Imagen capturada de la interfaz “pre-condition” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la casilla “Apply pre-shear”.

- 4) Luego de esto se ingresa el valor de la rata de corte que se aplicará en la etapa de acondicionamiento, este valor debe ser lo mas grande posible siempre y cuando al ser aplicado no sobrepase el valor de torque permitido de 9,5 mNm, para de esta manera asegurarse de que al agitar la muestra a un alto valor de rata de corte, se rompan las estructuras en el fluido. El valor de rata de corte a aplicar se ingresa en la casilla “Shear Rate (1/seg)”.

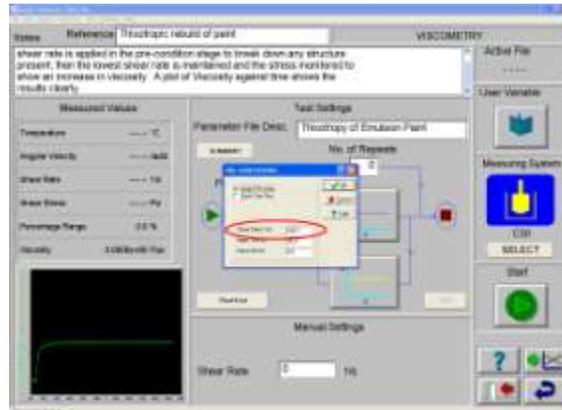


Figura 89. Imagen capturada de la interfaz “pre-condition” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “shear rate”.

- 5) Ahora se debe ingresar un valor de tiempo durante el cual será aplicada la rata de corte seleccionada en el numeral anterior. La idea de este numeral es colocar un tiempo que sea suficiente para romper la mayor cantidad de estructuras posibles en el fluido para luego de esto poder definir la regeneración estructural en el fluido en cuestión.

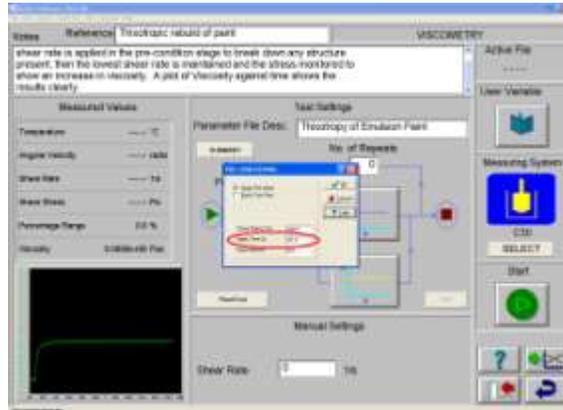


Figura 90. Imagen capturada de la interfaz “pre-condition” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “Apply time”.

- 6) Si se desea, se puede ingresar un tiempo de equilibrio entre la aplicación del esfuerzo y el inicio del arranque de la prueba, sin embargo se recomienda no hacer esto en este tipo de prueba porque en el momento en que finaliza la agitación en el fluido comienza de manera inmediata la regeneración, y si hay un tiempo largo de equilibrio no se detallaría el efecto de regeneración cuando el viscosímetro empiece a hacer las mediciones. Después de este paso se hace clic en “OK” para luego ir a la sección de parámetros de viscometría.

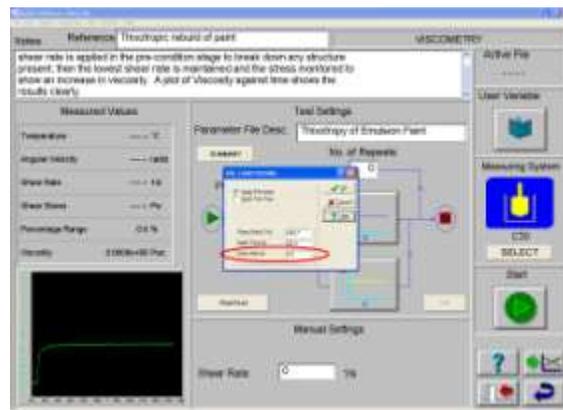


Figura 91. Imagen capturada de la interfaz “pre-condition” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “Equum time”.

- 7) Ahora se hace clic en el botón “Viscometry parameters” cuya forma es una grafica de rata de corte vs esfuerzo de corte, con el fin de ajustar la prueba de tal manera que se defina la regeneración estructural.

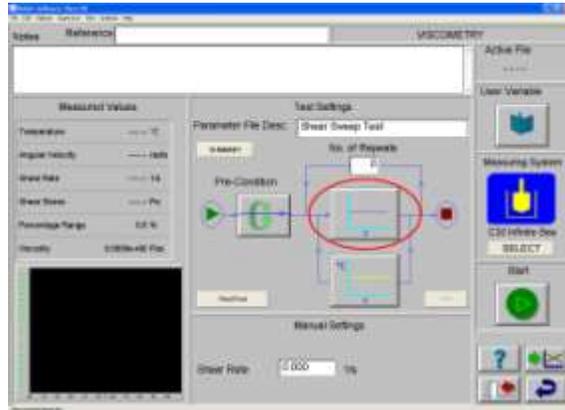


Figura 92. Imagen capturada de la interfaz “viscometry” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el botón “viscometry parameters”.

- 8) En la pestaña de selección de rata de corte, escoja que la prueba será realizada a un valor de rata de corte constante haciendo clic en la opción “Single Shear”.

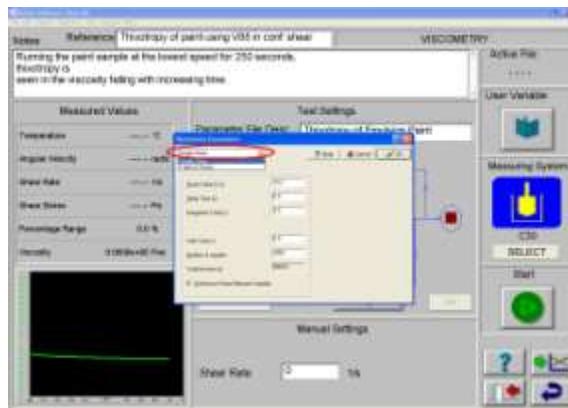


Figura 93. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando la pestaña “single shear”.

- 9) Al ingresar el valor de la rata de corte aplicada, asegúrese de que sea el mismo valor que se aplico en la etapa 1 para poder comparar luego el porcentaje de regeneración.

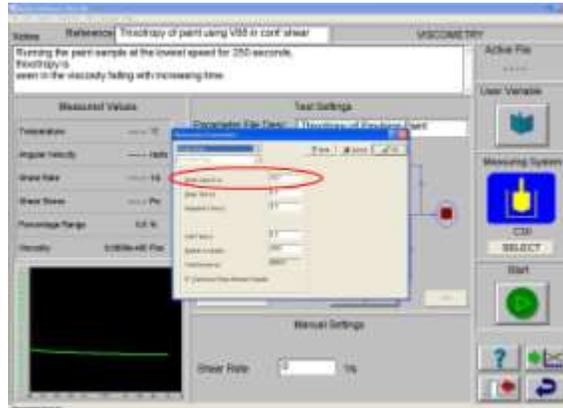


Figura 94. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “shear value”.

10) Seguidamente escoja el número de datos o lecturas que usted desea que el viscosímetro realice, esto se escribe en la casilla que dice “samples”. En esta fase seleccione un número muy alto de lecturas para que se defina bien la curva de regeneración.



Figura 95. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “number of samples”.

11) Seguidamente se escoge el “delay time”, el valor en esta casilla será el tiempo en segundos en que se agitará la muestra con un valor de tasa de corte asignado, sin ejecutar medición alguna. Esto es con el fin de permitir que el fluido alcance un equilibrio de flujo entre cada valor de tasa de corte aplicado.

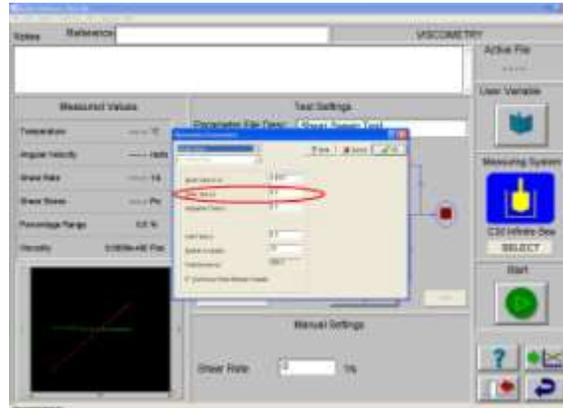


Figura 96. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “delay time”.

12) Luego de esto, se ingresa el valor del “integration time”, este es el tiempo en el cual se realiza la medición de un punto de muestra. Es decir que el valor representativo para un punto de la muestra será igual al promedio de los valores instantáneos tomados durante el “integration time”.

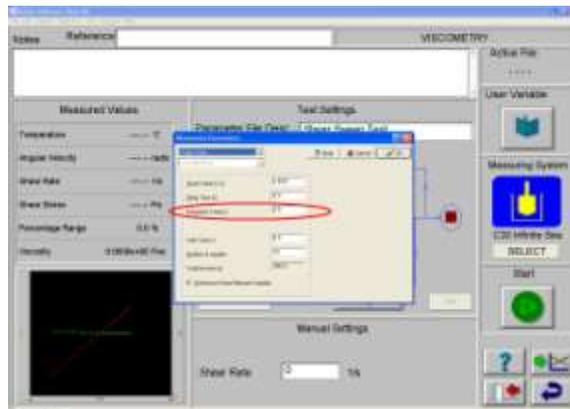


Figura 97. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “integration time”.

13) Como escogió trabajar con un solo valor de tasa de corte se debe ingresar el “wait time”. Este tiempo es el tiempo en el cual el viscosímetro no aplicara ningún esfuerzo al sistema después del “integration time” y antes del “delay time”.

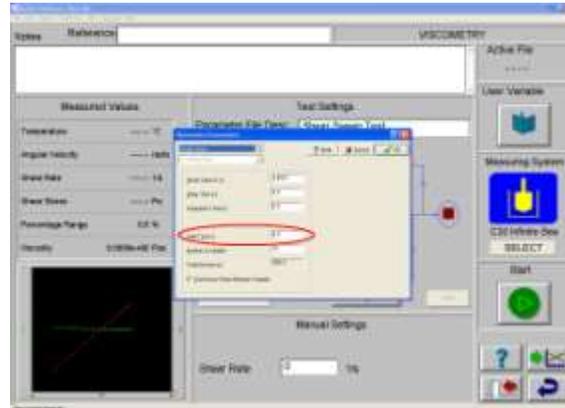


Figura 98. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el cuadro de texto “wait time”.

14) Después de esto, se debe cerrar la ventana y arrancar la prueba haciendo clic el botón “START” en el panel derecho. Seguidamente aparecerá otra ventana que incluirá la información de la prueba, entre esta información se encuentra, el tiempo restante de la prueba, los valores de los parámetros leídos y una ventana en la cual se puede graficar cualquier variable medida en tiempo real. En este momento el motor del viscosímetro empieza a funcionar a los valores de tasa de corte programados.

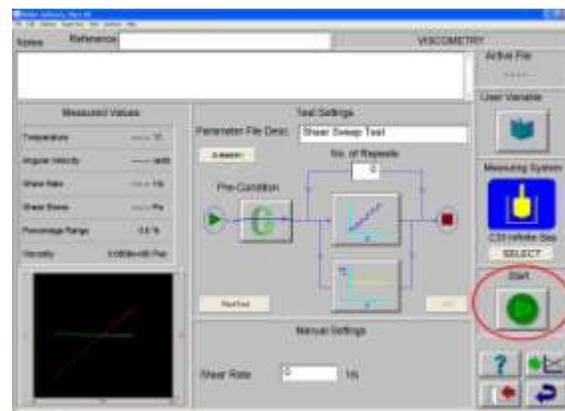


Figura 99. Imagen capturada de la interfaz “viscometry” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando el botón “start”.

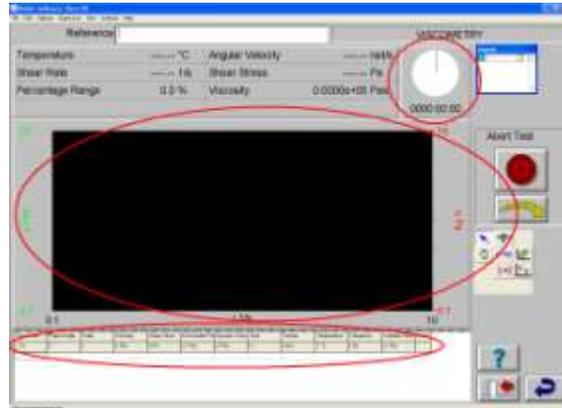


Figura 100. Imagen capturada de la interfaz desplegada al presionar el botón “start” del software Bohlin R6.50.5.7 indicando las zonas donde se visualizarán las variables medidas en tiempo real durante una prueba de viscosidad.

- 15) Cuando se finalice la prueba, se debe guardar los resultados para luego poderlos comparar con los resultados de la etapa 1 y de esta manera hacer los respectivos análisis sobre la regeneración estructural del fluido.

6.4.2.2.3 Pruebas de histéresis.

Esta prueba consiste en medir las propiedades reológicas durante la descomposición estructural para ver los cambios que se generan en el fluido. Es decir que esta prueba abarca un determinado rango de esfuerzos que serán aplicados para medir los cambios estructurales en el fluido. Cabe mencionar, que antes de empezar con este procedimiento, ya debe estar hecho el montaje para la temperatura deseada junto con el montaje de la geometría deseada. El procedimiento para realizar esta prueba es el siguiente:

- 1) Revise que el cable RS-232 del viscosímetro este conectado, si no lo esta inserte el extremo hembra en el puerto serial del computador de trabajo, y el puerto macho debe ser insertado en la parte trasera del viscosímetro.

- 2) Luego de esto, encienda el viscosímetro presionando la tecla ON/OFF. Seguidamente la palabra OFF deberá aparecer en la pantalla del viscosímetro.
- 3) Encienda el computador de trabajo y ejecute el software del viscosímetro, el nombre del software es “Bohlin R6.50.5.7”, el programa del viscosímetro también se puede ejecutar de la siguiente manera:
 - a) Clic en “Inicio”.
 - b) Luego clic en “Todos los programas”.
 - c) Clic en “Bohlin”.
 - d) Clic en “Bohlin R6.50.5.7”.



Figura 101. Imagen capturada de la interfaz del “escritorio” del computador asignado para uso investigativo en el “LAPE” señalando el icono del software “Bohlin R6.50.5.7.”

- 4) Ingrese un nombre de usuario y contraseña para trabajar con el software. Para efectos netamente académicos, se ha creado una sesión con nombre de usuario “user” y su contraseña o password es la palabra “cofa”. En caso tal de que dicha cuenta no este disponible, entonces digite la palabra “supervisor” en el nombre de usuario y no digite ninguna contraseña. Use esta manera de entrar solamente si el usuario “user” no esta disponible.



Figura 102. Imagen capturada de la interfaz de inicio del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando los cuadros de texto “username y password”.

- 5) Haga clic en el botón “VISCOMETRY” para acceder al panel de edición de parámetros de la prueba.

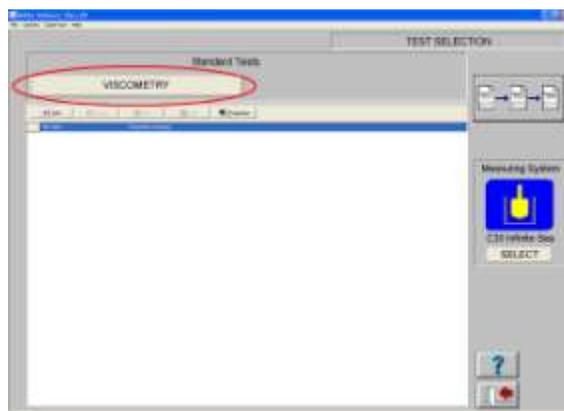


Figura 103. Imagen capturada de la interfaz de inicio de selección de test del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el botón “viscometry”.

- 6) Seleccione la geometría con la cual se trabajará durante la prueba. Para esto busque en el panel derecho de la ventana, un botón con la palabra “SELECT”, seguidamente aparecerá una sub-ventana titulada “SELECT MEASURING SYSTEM” esta sub-ventana incluye un listado con las geometrías o sistemas de medida que se cuenta en la universidad. Seleccione el sistema apropiado y de clic en el botón “OK”.

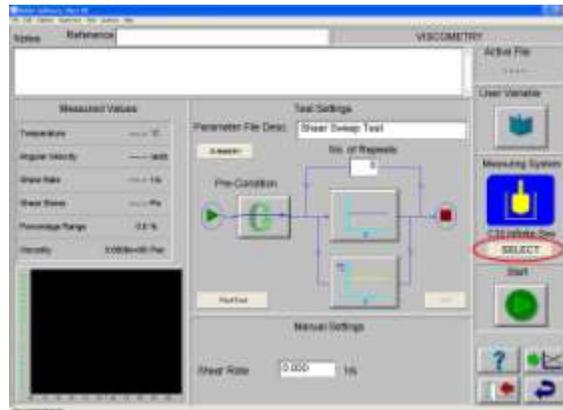


Figura 104. Imagen capturada de la interfaz “viscometry” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el botón “select”.

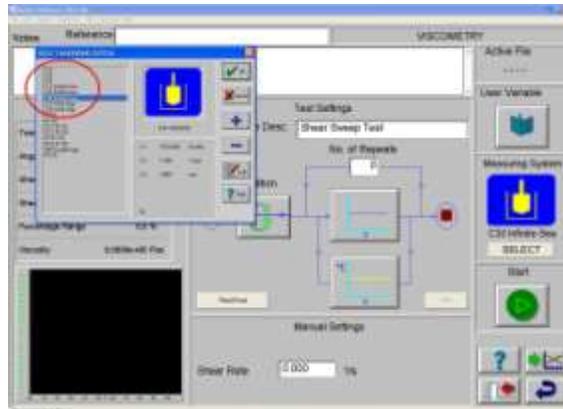


Figura 105. Imagen capturada de la ventana “select measuring system” del software “Bohlin R6.50.5.7.” indicando las opciones de geometrías disponibles.

- 7) Luego de escoger el sistema de medición o geometría, se debe ajustar la velocidad de trabajo y otros parámetros propios de la forma en que se hará la medición. Para esto haga clic en el botón “Parámetros de viscometría” cuya forma es una gráfica de tasa de corte vs esfuerzo de corte.

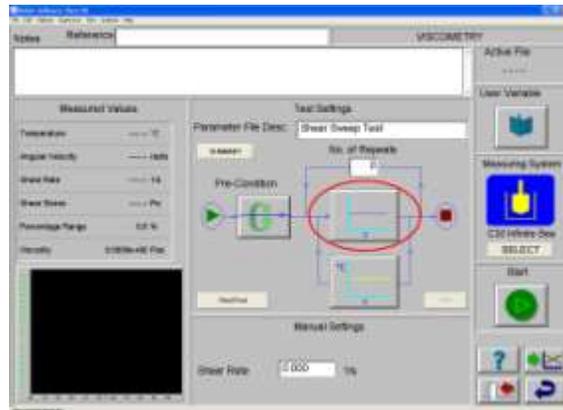


Figura 106. Imagen capturada de la interfaz “viscometry” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el botón “viscometry parameters”.

- 8) Una vez abra el panel de opciones de viscometría seleccione que se trabajará con un rango de esfuerzos de corte haciendo clic en la pestaña “Table of Shears”.

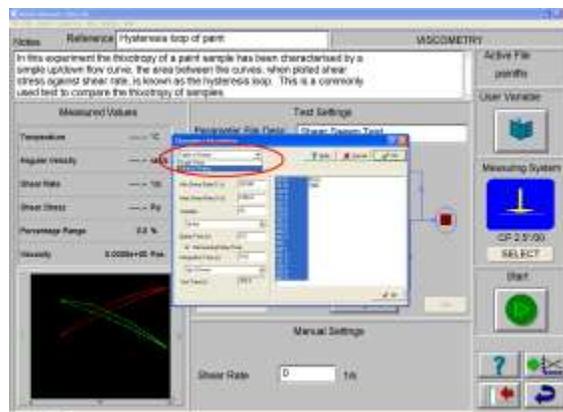


Figura 107. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando la pestaña “table of shears”.

- 9) A continuación ingrese el valor mínimo y valor máximo de esfuerzos de corte en las casillas inferiores, recuerde que si después de hacer la prueba algún valor de esfuerzo de corte tiene un torque que se sale del rango 0.5 – 9.5 mNm, deberá repetir la prueba reduciendo el rango mínimo o máximo hasta que en los resultados de la prueba todos los valores estén dentro de la tolerancia de validez del viscosímetro.

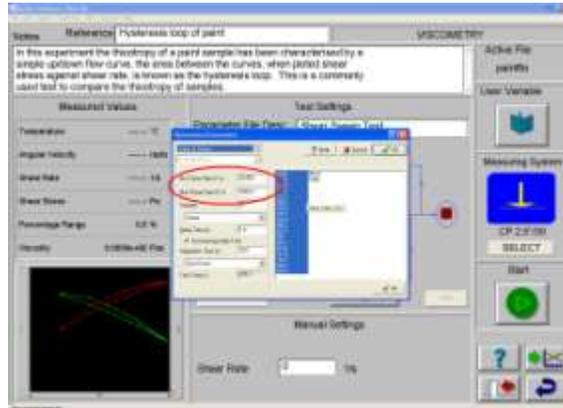


Figura 108. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando los cuadros de texto “min shear rate” y “max shear rate”.

10) A continuación se selecciona el número de lecturas que se desea que realice el viscosímetro. Esto se llena en la casilla que dice “Samples”.



Figura 109. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el cuadro de texto “samples”.

11) Ahora seleccione si desea que la distribución de valores de muestra entre el rango inferior y rango superior de tasa de corte sea lineal o sea de tipo logarítmica. Esto se escoge en la pestaña ubicada debajo de la casilla de ingreso del número de lecturas que realizará el viscosímetro.

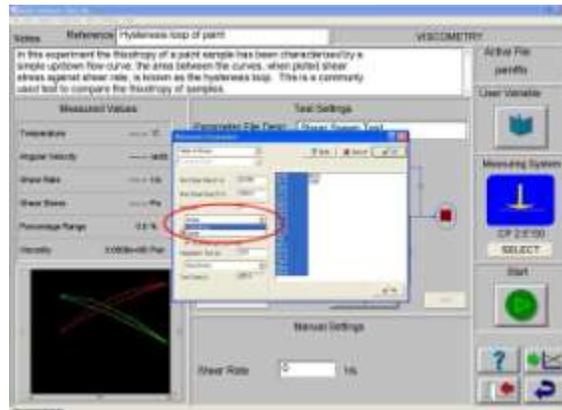


Figura 110. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando la pestaña “linear/logarithmic”.

12) Ahora escoja el tiempo que desea que se agite la muestra sin hacer medición alguna con el fin de garantizar un equilibrio de flujo antes de realizar las mediciones. Esto se llena en la casilla “Delay Time”.

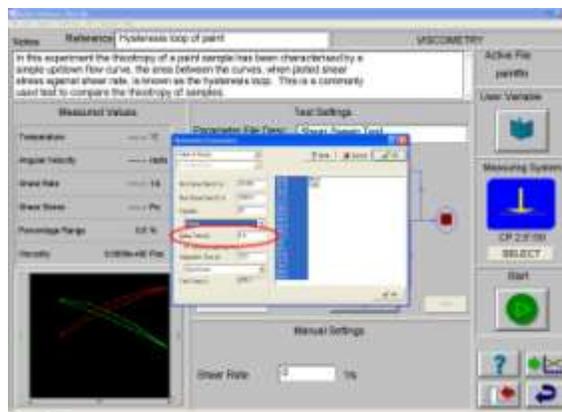


Figura 111. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el cuadro de texto “delay time”.

13) Ahora seleccione el tiempo de medición de cada lectura en el viscosímetro. Esto se hace en casilla “Integration Time”.

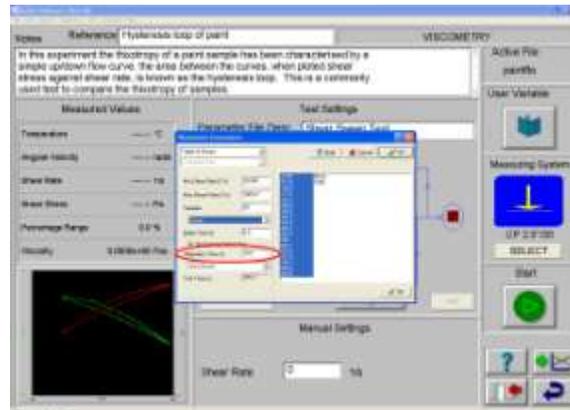


Figura 112. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el cuadro de texto “integration time”.

- 14) Escoja en que orden se hará la descomposición estructural, es decir en que orden se aplicaran las ratas de corte, si se desea de mayor a menor y luego de menor a mayor escoja “Down & Up” y si desea escoger que se apliquen las ratas de corte de menor a mayor y luego de mayor a menor seleccione “Up & Down”.

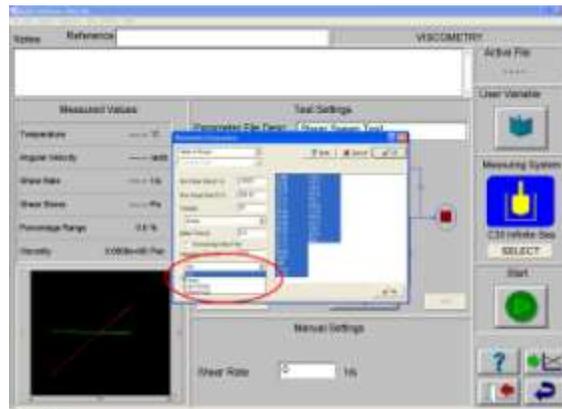


Figura 113. Imagen capturada de la interfaz “viscometry parameters” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando la pestaña que incluye los valores “Up/Down/Up & Down/Down & Up”.

- 15) Seleccione el botón “OK” y luego haga clic el botón “Start” del panel derecho para empezar la prueba. Enseguida se encenderá el motor y podrá monitorear y graficar las diferentes variables del fluido en tiempo real.

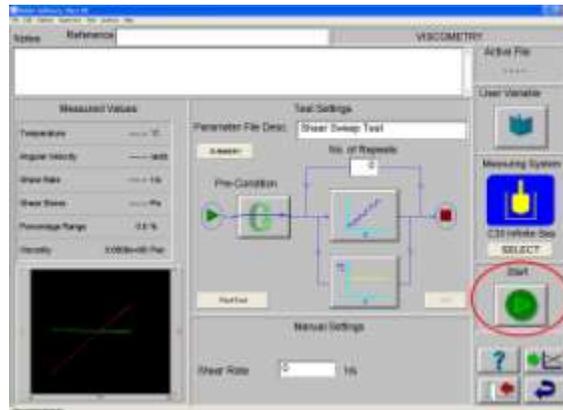


Figura 114. Imagen capturada de la interfaz “viscometry” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando el botón “Start”.

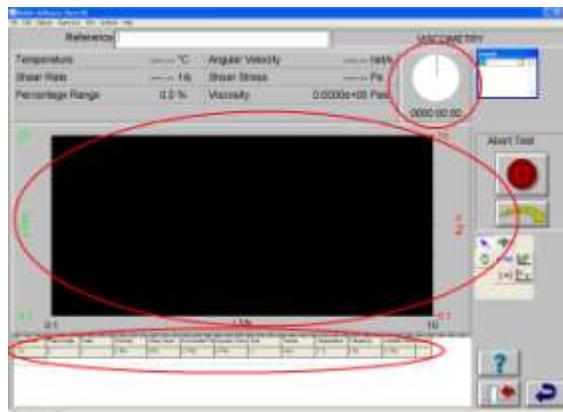


Figura 115. Imagen capturada de la interfaz desplegada al presionar el botón “start” del software “Bohlin R6.50.5.7.” señalando los lugares donde se muestra la información obtenida durante la prueba, en tiempo real.

16) Cuando termine la prueba, guarde la información obtenida y verifique que todos los valores de la prueba estaban dentro del rango de tolerancia del viscosímetro es decir que los torques de todas las lecturas estén entre 0.5 – 9.5 mNm. Si todos los valores están en el rango de tolerancia indica que la prueba es válida y puede empezar a hacer los respectivos análisis de histéresis, si por el contrario tiene valores que no están dentro del rango, repita la prueba reduciendo el rango, escogiendo como valores límite de la

prueba las ratas de corte que en la prueba anterior estaban dentro del rango de tolerancia.

Capitulo 7. Realización de pruebas de laboratorio con el viscosímetro

Bohlin Visco 88

7.1 Generalidades

Durante este capítulo se mostrarán los resultados de los diferentes tipos de pruebas realizadas en el viscosímetro Bohlin Visco 88, con el fin de validar su uso, y darle una funcionalidad específica para el laboratorio de pruebas especiales de la Universidad Surcolombiana.

Debido a que los fluidos de fracturamiento, requieren de preparación especial y de aditivos muy específicos, que solo se encuentran en la industria, se protegerá el nombre de los aditivos para mantener las políticas de confidencialidad trabajadas en las empresas de la industria del petróleo. Sin embargo, si se mencionarán las propiedades de los fluidos para que sepamos las propiedades que estamos determinando y su debida importancia durante las practicas de fracturamiento hidráulico.

Otro punto a tener en consideración durante el presente trabajo, es que las concentraciones de aditivos usadas en las pruebas de laboratorio, no son concentraciones de uso específico, ni se comentara las repercusiones que tendría usar dichas concentraciones en operaciones de campo, debido a que este proyecto es netamente experimental, es por eso que las concentraciones de aditivo usadas durante las pruebas de laboratorio fueron diseñadas para que cumplieran con otros objetivos tales como asegurar la funcionalidad del viscosímetro, un perfecto ajuste de los resultados en las geometrías usadas durante las pruebas y la generación de fluidos de viscosidad muy alta y muy baja para comprobar los limites de lectura del viscosímetro.

Cabe resaltar que durante cada prueba realizada con el viscosímetro se registró un volumen considerable de datos, razón por la cual se decidió mostrar solamente los datos más representativos de cada prueba, aunque en el análisis

de la información obtenida se tendrán en cuenta todos los datos originales de las pruebas.

7.2 Fluido LAPE-001

El fluido LAPE-001 es un fluido especial que cumple básicamente dos funciones, la primera es la de poseer una alta viscosidad bajo flujo laminar y la segunda es que provoque muy pocas pérdidas de filtrado hacia la formación durante la operación de fracturamiento hidráulico.

Para preparar este fluido en el laboratorio, se usaron dos aditivos, cada uno proporciona propiedades especiales al fluido, el primer aditivo se encarga únicamente de incrementar la viscosidad del fluido y lograr que este mantenga su viscosidad a bajas tasas de corte, y que disminuya drásticamente su viscosidad al estar bajo condiciones de elevadas tasas de corte, con el fin de asegurar la bombeabilidad del fluido. El segundo aditivo, ayuda a reforzar las propiedades viscosas que añade el primer aditivo en una forma mas leve, sin embargo la principal función del segundo aditivo es la de reducir las pérdidas de filtrado hacia la formación para así evitar daños en la matriz de la arena. La relación con que se preparó el fluido es de 2:1 respectivamente. El fluido se preparó inicialmente con un gramo de mezcla de aditivos, sin embargo la respuesta en viscosidad no era suficientemente alta como para ser caracterizada por el viscosímetro Bohlin Visco 88, es por ello que se fue incrementando la cantidad de aditivo de 0.5 en 0.5 grs hasta llegar finalmente a una concentración de 3 grs en 1 bbl equivalente (350 ml). Al realizar una medición de Ph al fluido se obtuvo una lectura de 5.6 a 29°C.

- Muestra de resultados

Tabla 6. Resultados de una prueba de reología realizada con la geometría C30 en el viscosímetro Bohlin visco 88 a 13.8°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft^2)	Viscosidad (cp)
15,85	1,134	17,97	14,66	0,37516	1134,0
88,21	0,257	22,68	13,67	0,47349	257,2
159,70	0,156	24,89	13,27	0,51962	155,8
234,90	0,114	26,71	13,17	0,55762	113,7
327,60	0,087	28,60	13,97	0,59708	87,3

Tabla 7. Resultados de una prueba de reología realizada con la geometría C25 en el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 14.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,85	1,167	18,50	15,26	0,38622	1167,0
88,13	0,259	22,80	14,15	0,47599	258,7
159,60	0,156	24,85	13,97	0,51879	155,7
234,90	0,112	26,34	14,06	0,54990	112,1
327,60	0,086	28,04	14,37	0,58539	85,6

Tabla 8. Resultados de una prueba de reología realizada con la geometría C25 en el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 10.2°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,82	1,043	16,50	10,20	0,34447	1043,0
88,06	0,252	22,17	10,13	0,46284	251,8
159,50	0,153	24,45	10,18	0,51044	153,3
234,70	0,111	26,15	10,17	0,54593	111,4
327,30	0,085	27,73	10,20	0,57891	84,7

Tabla 9. Resultados de una prueba de reología realizada con la geometría C30 en el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 9.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
26,47	1,203	31,84	10,26	0,66472	1203,0
88,00	0,446	39,28	9,90	0,82004	446,3
159,40	0,274	43,75	9,80	0,91336	274,4
234,60	0,203	47,66	9,80	0,99499	203,2
327,10	0,158	51,73	9,77	1,07996	158,2

Tabla 10. Resultados de una prueba de reología realizada con el viscosímetro Fann 35 a 30°C.

RPM	Esfuerzo de corte (lbf/100ft ²)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Rata de corte (1/seg)	Viscosidad (cp)
3	28	0,28	5,109	2624,1
30	39	0,39	51,09	365,5
90	47	0,47	153,27	146,8
200	56	0,56	340,6	78,7
300	64	0,64	510,9	60,0

Tabla 11. Resultados de una prueba manual de reología usando la geometría C30 IS con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.7°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
2,10	16	7,7	25,80	0,33403	7700,0
6,10	18,5	3	25,70	0,38622	3000,0
19,50	21,4	1,1	25,70	0,44676	1100,0
35,20	23,2	0,662	25,70	0,48434	662,0
56,90	24,5	0,43	25,70	0,51148	430,0

Tabla 12. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 IS con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 23.1°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
2,75	5,857	16,08	23,09	0,33570	5857,0
25,31	0,885	22,41	23,10	0,46785	885,4
36,42	0,647	23,56	23,12	0,49186	646,9
44,93	0,537	24,12	23,15	0,50355	536,9
56,67	0,440	24,95	23,14	0,52088	440,3

Tabla 12. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 IS con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 23.0°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
2,74	6,079	16,67	23,00	0,34802	6079,0
25,32	0,893	22,61	22,90	0,47203	893,3
36,43	0,642	23,40	22,91	0,48852	642,3
44,95	0,532	23,92	22,95	0,49937	532,1
56,75	0,429	24,37	23,00	0,50877	429,3

Tabla 13. Resultados de una prueba manual de reología usando la geometría C25 IS con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 22.8°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
2,10	16	7,8	22,80	0,33403	7800,0
6,10	18,4	3,01	22,80	0,38413	3010,0
19,50	21,6	1,11	22,70	0,45094	1110,0
35,20	23,2	0,65	22,70	0,48434	650,0
56,80	24	0,42	22,80	0,50104	420,0

Tabla 14. Resultados de una prueba reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.1°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,81	1,078	17,04	25,16	0,35574	1078,0
88,09	0,260	22,89	25,11	0,47787	259,8
159,60	0,155	24,74	25,07	0,51649	155,0
234,80	0,113	26,55	25,00	0,55428	113,1
327,60	0,086	28,11	24,90	0,58685	85,8

Tabla 15. Resultados de una prueba manual de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 24.5°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
11,90	17,2	1,43	24,70	0,35908	1430,0
64,50	21,7	0,33	24,50	0,45303	330,0
112,40	23,3	0,21	24,50	0,48643	210,0
203,20	25,6	0,12	24,50	0,53445	120,0
327,90	28,1	0,085	24,40	0,58664	85,0

Tabla 16. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 24.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,81	1,099	17,37	24,91	0,36263	1099,0
88,08	0,261	22,98	24,90	0,47975	260,9
159,60	0,153	24,44	24,93	0,51023	153,1
234,90	0,110	25,77	24,81	0,53800	109,7
327,80	0,083	27,27	24,71	0,56931	83,2

Tabla 17. Resultados de una prueba de reología manual usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 24.7°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
11,90	17,6	1,479	24,80	0,36743	1479,0
64,50	21,9	0,34	24,70	0,45720	340,0
112,50	23,2	0,2	24,70	0,48434	200,0
203,40	25,3	0,124	24,70	0,52818	124,0
328,40	26,9	0,082	24,60	0,56159	82,0

Tabla 18. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 50.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
26,41	0,629	16,61	50,50	0,34676	629,1
88,26	0,228	20,09	50,68	0,41942	227,6
159,90	0,134	21,40	50,65	0,44676	133,9
235,30	0,095	22,33	50,37	0,46618	94,9
328,30	0,071	23,36	50,37	0,48768	71,2

Tabla 19. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 51.7°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,84	0,969	15,35	51,90	0,32046	969,0
88,28	0,233	20,52	51,57	0,42839	232,5
160,00	0,135	21,52	50,87	0,44927	134,5
235,40	0,093	21,89	51,95	0,45699	93,0
328,50	0,069	22,52	52,00	0,47015	68,5

Tabla 20. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 77.1°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
38,49	0,354	13,61	77,30	0,28413	353,7
88,45	0,182	16,12	77,10	0,33653	182,2
160,30	0,108	17,36	77,10	0,36242	108,3
236,00	0,076	18,02	77,40	0,37620	76,4
329,40	0,056	18,49	76,60	0,38601	56,1

Tabla 21. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 82.1°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
26,46	0,496	13,13	82,30	0,27411	496,1
88,46	0,195	17,22	82,70	0,35950	194,6
160,40	0,118	18,91	82,20	0,39478	117,9
235,50	0,085	20,02	81,90	0,41795	85,0
329,60	0,063	20,87	81,50	0,43570	63,3

Tabla 22. Resultados de una prueba de histéresis usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,81	0,976	15,42	25,39	0,32192	975,5
88,06	0,227	19,98	25,39	0,41712	226,9
159,60	0,136	21,71	25,41	0,45324	136,1
234,80	0,099	23,21	25,41	0,48455	98,8
327,60	0,076	24,74	25,40	0,51649	75,5
327,60	0,076	24,96	25,41	0,52109	76,2
234,70	0,100	23,47	25,40	0,48998	100,0
159,40	0,137	21,79	25,34	0,45491	136,7
87,96	0,226	19,86	25,40	0,41461	225,8
15,78	0,986	15,55	25,40	0,32463	985,8

Tabla 23. Resultados de una prueba de tixotropía en su etapa estable usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.2°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
12,96	13,03	1,005	40,44	0,27203	1005,0
12,95	13,08	1,010	91,06	0,27307	1010,0
12,96	13,09	1,010	131,6	0,27328	1010,0
12,93	13,12	1,014	222,7	0,27390	1014,0
12,92	13,05	1,010	303,7	0,27244	1010,0

Tabla 24. Resultados de una prueba de tixotropía en su etapa de regeneración usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.3°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
12,79	12,38	0,968	44,44	0,25846	968,1
12,92	12,96	1,003	88,94	0,27056	1003,0
12,91	12,94	1,003	133,4	0,27015	1003,0
12,92	13,17	1,019	222,4	0,27495	1019,0
12,90	13,15	1,020	333,7	0,27453	1020,0

7.3 Fluido LAPE-002

El fluido LAPE-002 fue preparado con un aditivo que básicamente es un controlador de pérdidas de filtrado, por ende su incremento en concentración no provoca aumentos drásticos en la viscosidad del fluido, pero a pesar de lo

anterior, este tipo de aditivos ayudan a mejorar las propiedades reológicas de los fluidos de fracturamiento en altas concentraciones.

Cabe mencionar que este tipo de aditivos en la industria nunca se usan de manera individual, pero para cuestión de validación del viscosímetro se realizarán pruebas de laboratorio al aditivo de manera individual para observar y comprender a fondo el comportamiento del mismo. Durante la preparación del fluido, se empezó con una base de 1 gr de aditivo y 1 bbl equivalente (350 ml), sin embargo a esta concentración no hubo un incremento notable en la viscosidad del fluido, razón por la cual se fue incrementando la concentración del aditivo de 0.5 grs en 0.5 grs hasta llegar a una concentración de 7 grs, concentración en la cual el fluido se torno un poco viscoso y ya era apto para probarlo en el viscosímetro Bohlin Visco 88. Al realizar una medición de Ph en el fluido se obtuvo una lectura de 6.86 a 29°C.

- Muestra de resultados

Tabla 25. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 15.2°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
73,80	0,112	8,27	15,00	0,17271	112,1
88,10	0,099	8,69	15,00	0,18146	98,7
159,60	0,064	10,27	15,10	0,21441	64,3
234,90	0,049	11,62	15,30	0,24259	49,4
327,90	0,039	12,94	15,52	0,27015	39,5

Tabla 26. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 4.7°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
50,71	0,1615	8,191	4,535	0,17100	161,5
88,09	0,1108	9,762	4,6	0,20380	110,8
159,6	0,07298	11,65	4,694	0,24322	73,0
234,9	0,05659	13,29	4,846	0,27745	56,6
327,8	0,0454	14,88	4,935	0,31065	45,4

Tabla 27. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 15.0°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
10,72	0,5699	6,111	14,84	0,12758	569,9
40,37	0,21	8,478	14,91	0,17699	210,0
70,66	0,1302	9,199	14,97	0,19205	130,2
112	0,09057	10,15	15,19	0,21190	90,6
133,6	0,0777	10,38	15,3	0,21670	77,7

Tabla 28. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 1.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
40,37	0,2451	9,894	1,7	0,20656	245,1
70,65	0,1576	11,14	1,612	0,23257	157,6
112	0,1119	12,53	1,393	0,26159	111,9
133,5	0,09752	13,02	1,083	0,27182	97,5

Tabla 29. Resultados de una prueba de reología usando el viscosímetro Fann 35 a 30°C.

RPM	Esfuerzo de corte (lbf/100ft ²)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Rata de corte (1/seg)	Viscosidad (cp)
3	9		0,09	5,109
30	19		0,19	51,09
90	28		0,28	153,27
200	39		0,39	340,6
300	46		0,46	510,9

Tabla 30. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
74,04	0,111	8,22	25,50	0,17169	111,1
88,33	0,098	8,65	25,49	0,18063	98,0
160,00	0,064	10,19	25,47	0,21273	63,7
235,40	0,048	11,32	25,44	0,23633	48,1
328,30	0,037	12,30	25,43	0,25678	37,5

Tabla 31. Resultados de una prueba de reología manual usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.3°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
64,6	7,8	0,121	25,3	0,162839248	121,0
112,7	9,1	0,081	25,3	0,189979123	81,0
203,7	10,7	0,053	25,3	0,223382046	53,0
328,6	11,8	0,036	25,3	0,246346555	36,0

Tabla 32. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
26,38	0,2355	6,213	25,4	0,12971	235,5
88,25	0,09721	8,579	25,42	0,17910	97,2
159,9	0,06101	9,755	25,38	0,20365	61,0
235,3	0,04456	10,48	25,35	0,21879	44,6
328,3	0,03395	11,15	25,34	0,23278	34,0

Tabla 33. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 26.0°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
10,75	0,4986	5,36	26,15	0,11190	498,6
40,43	0,1794	7,252	26,1	0,15140	179,4
70,77	0,1136	8,037	26,04	0,16779	113,6
111,7	0,0776	8,672	25,99	0,18104	77,6
133,8	0,06664	8,917	25,93	0,18616	66,6

Tabla 34. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 43.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
135,70	0,059	7,94	43,65	0,16585	58,5
159,90	0,052	8,26	43,63	0,17240	51,7
235,20	0,039	9,11	43,93	0,19023	38,7
328,10	0,030	9,87	44,41	0,20603	30,1

Tabla 35. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 42.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,68	0,344	5,40	43,21	0,11265	344,1
40,49	0,170	6,87	43,02	0,14334	169,6
70,85	0,104	7,37	42,79	0,15376	103,9
112,30	0,069	7,75	42,70	0,16175	69,0
133,90	0,059	7,94	42,70	0,16572	59,3

Tabla 36. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 50.0°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,69	0,3156	4,952	50,56	0,10338	315,6
40,5	0,1592	6,446	49,97	0,13457	159,2
70,92	0,09761	6,923	49,53	0,14453	97,6
112,4	0,0645	7,25	49,98	0,15136	64,5
134,1	0,05447	7,302	50,16	0,15244	54,5

Tabla 37. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 50.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
174,1	0,04593	7,994	49,55	0,16689	45,9
235,7	0,03633	8,564	50,91	0,17879	36,3
329	0,0282	9,279	51,09	0,19372	28,2

Tabla 38. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 61.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
249	0,03165	7,88	61,2	0,16451	31,7
329,2	0,02564	8,439	61,93	0,17618	25,6

Tabla 39. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 60.2°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
15,7	0,3038	4,77	60,64	0,09958	303,8
40,53	0,1457	5,905	60,16	0,12328	145,7
70,99	0,09168	6,508	59,94	0,13587	91,7
112,6	0,06004	6,759	60,25	0,14111	60,0
134,2	0,04989	6,698	60,08	0,13983	49,9

Tabla 40. Resultados de una prueba de histeresis usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.0°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
50,78	0,1361	6,909	25,2	0,14424	136,1
88,24	0,09338	8,24	25,2	0,17203	93,4
159,8	0,06085	9,727	25,13	0,20307	60,9
235,2	0,04626	10,88	25,1	0,22714	46,3
327,7	0,0362	11,86	25,01	0,24760	36,2
327,7	0,03584	11,75	25	0,24530	35,8
235,1	0,045	10,58	24,96	0,22088	45,0
159,8	0,05934	9,481	24,92	0,19793	59,3
88,22	0,09281	8,188	24,9	0,17094	92,8
26,42	0,2168	5,728	24,89	0,11958	216,8

Tabla 41. Resultados de una prueba de tixotropía en la fase estable usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 24.6°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
26,4	5,719	0,2166	40,94	0,11939	216,6
26,4	5,789	0,2192	81,94	0,12086	219,2
26,41	5,75	0,2178	102,4	0,12004	217,8
26,41	5,736	0,2172	122,9	0,11975	217,2
26,41	5,752	0,2178	153,7	0,12008	217,8

Tabla 42. Resultados de una prueba de tixotropía en la fase de regeneración usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 24.5°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
26,4	5,625	0,213	40,94	0,11743	213,0
26,39	5,624	0,2131	81,94	0,11741	213,1
26,4	5,665	0,2146	102,4	0,11827	214,6
26,4	5,614	0,2127	128,1	0,11720	212,7
26,4	5,652	0,2141	153,7	0,11800	214,1

7.4 Fluido LAPE-003

El fluido LAPE-003 es un fluido muy especial, debido a que fue preparado con un aditivo viscosificante líquido; este tipo de aditivos son de última tecnología y su uso no es muy frecuente en la industria debido a su difícil conservación y a los costos, sin embargo es muy eficiente y como ventaja principal en su preparación se tiene que no produce problemas de formación de grumos ni consume tanto tiempo de agitación debido a su condición de aditivo líquido.

Para la preparación del fluido se comenzó con una base de 350 ml de agua y 1 mm de aditivo, pero a esta concentración de aditivo no se notó un efecto considerable en la viscosidad del fluido, luego de esto se empezó a adicionar aditivo en concentraciones de 0.5 mm en 0.5 mm hasta llegar a una concentración final de 9 mm, concentración en la cual el fluido se tornó muy viscoso y ya podía ser caracterizado. Al realizar una medición de Ph al fluido se obtuvo un Ph de 7.2 a 29°C.

- Muestra de resultados

Tabla 43. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 13.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,98	0,6639	26,54	14,54	0,55407	663,9
94,17	0,3717	35,01	14,31	0,73090	371,7
168,7	0,2451	41,35	13,7	0,86326	245,1
245	0,1865	45,69	13,51	0,95386	186,5
326,7	0,1509	49,29	13,5	1,02902	150,9

Tabla 44. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 14.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
21,41	0,9433	20,2	14,89	0,42171	943,3
94,03	0,3692	34,72	14,61	0,72484	369,2
168,6	0,2441	41,15	14,45	0,85908	244,1
244,9	0,1858	45,5	14,31	0,94990	185,8
326,6	0,1502	49,05	14,24	1,02401	150,2

Tabla 45. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 6.3°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,84	0,8183	32,6	6,6	0,68058	818,3
93,93	0,4526	42,52	6,6	0,88768	452,6
168,4	0,2972	50,06	6,5	1,04509	297,2
244,7	0,227	55,53	6,2	1,15929	227,0
326,3	0,184	60,06	5,7	1,25386	184,0

Tabla 46. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 5.3°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,67	0,7913	31,39	5,7	0,65532	791,3
93,53	0,4362	40,8	5,452	0,85177	436,2
167,8	0,285	47,83	5,181	0,99854	285,0
243,8	0,216	52,66	5,002	1,09937	216,0
325,3	0,1741	56,65	5,04	1,18267	174,1

Tabla 47. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 21.8°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
21,51	0,778	16,74	21,79	0,34948	778,0
94,21	0,3078	28,99	21,79	0,60522	307,8
168,6	0,2051	34,59	21,77	0,72213	205,1
244,9	0,1566	38,34	21,77	0,80042	156,6
326,5	0,1268	41,4	21,77	0,86430	126,8

Tabla 48. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 21.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,99	0,5326	21,3	21,91	0,44468	532,6
94,13	0,3097	29,15	21,89	0,60856	309,7
168,6	0,207	34,9	21,89	0,72860	207,0
243,9	0,1592	38,83	21,88	0,81065	159,2
326,4	0,1294	42,23	21,86	0,88163	129,4

Tabla 49. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 22.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
16,28	0,9812	15,98	22,7	0,33361	981,2
45,94	0,535	24,58	22,61	0,51315	535,0
77,53	0,3784	29,34	22,6	0,61253	378,4
116,4	0,2829	32,94	22,6	0,68768	282,9
133,1	0,2569	34,19	22,6	0,71378	256,9

Tabla 50. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 40.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
21,43	0,4066	8,715	39,74	0,18194	406,6
94,09	0,1919	18,06	39,82	0,37704	191,9
168,6	0,1357	22,88	40,63	0,47766	135,7
244,9	0,1075	26,33	40,8	0,54969	107,5
326,7	0,08945	29,22	41	0,61002	89,5

Tabla 51. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 40.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
57,28	0,26	14,9	41,6	0,31106	260,0
94,23	0,1964	18,5	41,48	0,38622	196,4
168,9	0,1373	23,18	41,55	0,48392	137,3
245,3	0,1078	26,45	41,69	0,55219	107,8
327,1	0,08898	29,11	41,67	0,60772	89,0

Tabla 52. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 49.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
75,49	0,1828	13,8	49,04	0,28810	182,8
94,17	0,1613	15,19	48,93	0,31712	161,3
168,8	0,1146	19,34	49,21	0,40376	114,6
245,2	0,08964	21,98	49,54	0,45887	89,6
327,1	0,07384	24,16	50,28	0,50438	73,8

Tabla 52. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 52.2°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,92	0,2242	8,951	52,07	0,18687	224,2
94,1	0,1488	14	51,59	0,29228	148,8
168,7	0,108	18,22	51,75	0,38038	108,0
245,1	0,08669	21,25	52,2	0,44363	86,7
327	0,07332	23,98	53,15	0,50063	73,3

Tabla 53. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 68.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
75,56	0,1086	8,208	67,5	0,17136	108,6
94,25	0,09847	9,281	67,7	0,19376	98,5
168,8	0,07476	12,62	68,8	0,26347	74,8
245,3	0,06216	15,25	69,5	0,31837	62,2
327,1	0,05371	17,57	69,6	0,36681	53,7

Tabla 54. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 69.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
208,1	0,06582	13,7	69,5	0,28601	65,8
245,6	0,06009	14,75	69,4	0,30793	60,1
327,6	0,05142	16,84	69,4	0,35157	51,4

Tabla 55. Resultados de una prueba de histéresis usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 22.8°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,96	0,527	21,06	22,83	0,43967	527,0
94,1	0,3069	28,88	22,79	0,60292	306,9
168,6	0,2054	34,63	22,81	0,72296	205,4
244,8	0,1577	38,61	22,8	0,80605	157,7
326,4	0,1284	41,92	22,8	0,87516	128,4
326,4	0,1279	41,76	22,78	0,87182	127,9
244,7	0,1561	38,19	22,75	0,79729	156,1
168,4	0,2016	33,96	22,71	0,70898	201,6
94	0,2961	27,83	22,7	0,58100	296,1
39,88	0,4996	19,93	22,63	0,41608	499,6

Tabla 56. Resultados de una prueba de tixotropía en la fase estable usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 22.3°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,93	20,64	0,517	40,94	0,43090	517,0
39,92	20,55	0,5148	81,94	0,42902	514,8
39,91	20,53	0,5143	102,4	0,42860	514,3
39,91	20,47	0,513	122,9	0,42735	513,0
39,91	20,5	0,5137	153,7	0,42797	513,7

Tabla 57. Resultados de una prueba de tixotropía en la fase de regeneración usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 22.0°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,87	20,31	0,5095	40,94	0,42401	509,5
39,86	20,36	0,5108	81,94	0,42505	510,8
39,87	20,37	0,5111	102,4	0,42526	511,1
39,87	20,38	0,5113	122,9	0,42547	511,3
39,87	20,38	0,511	153,7	0,42547	511,0

7.5 Fluido LAPE-004

El fluido LAPE-004 se preparó utilizando todos los aditivos disponibles en el laboratorio de pruebas especiales LAPE de la Universidad Surcolombiana, es decir que este fluido tiene 2 aditivos viscosificantes y 2 controladores de perdida de filtrado. El fin de este fluido, era observar el comportamiento de los 4 agentes en un solo fluido y los efectos que se tienen en la viscosidad y las propiedades reológicas. Las concentraciones de aditivo usadas en este fluido fueron 2 grs del aditivo viscosificante usado en el fluido LAPE-001, 2 grs del aditivo usado en el fluido LAPE-002, 1 gr del aditivo controlador de perdida de filtrado usado en el fluido LAPE-001, 3 mm del viscosificante líquido usado en el fluido LAPE-001 y por ultimo 350 mm de agua. Al realizar una medición de Ph en el fluido 4 se obtuvo una lectura de 7.2 a 29°C.

- Muestra de resultados.

Tabla 58. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 4.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
16,26	1,231	20,03	4,267	0,41816	1231,0
45,89	0,5561	25,52	4,373	0,53278	556,1
77,48	0,3675	28,47	4,494	0,59436	367,5
116,3	0,2675	31,12	4,553	0,64969	267,5
133	0,2407	32,01	4,587	0,66827	240,7

Tabla 59. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 4.4°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,85	0,5142	20,49	4,715	0,42777	514,2
93,89	0,275	25,82	4,539	0,53904	275,0
168,3	0,1798	30,25	4,406	0,63152	179,8
244,4	0,1372	33,53	4,3	0,70000	137,2
326	0,1119	36,48	4,235	0,76159	111,9

Tabla 60. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 13.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,95	0,4836	19,32	13,59	0,40334	483,6
94,11	0,2534	23,84	13,59	0,49770	253,4
168,6	0,1635	27,55	13,61	0,57516	163,5
244,8	0,124	30,35	13,63	0,63361	124,0
326,5	0,1006	32,83	13,66	0,68539	100,6

Tabla 61. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 13.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
8,747	1,898	16,6	13,52	0,34656	1898,0
45,95	0,5115	23,5	13,53	0,49061	511,5
77,54	0,3365	26,09	13,57	0,54468	336,5
116,4	0,2425	28,24	13,58	0,58956	242,5
133,1	0,2179	29	13,59	0,60543	217,9

Tabla 62. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 23.7°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
21,48	0,9652	20,73	23,8	0,43278	965,2
94,22	0,3237	30,5	23,8	0,63674	323,7
167,8	0,2094	35,14	23,7	0,73361	209,4
244,3	0,1579	38,58	23,7	0,80543	157,9
326,9	0,1263	41,28	23,6	0,86180	126,3

Tabla 63. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 23.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
16,29	1,366	22,25	23,7	0,46451	1366,0
45,96	0,6224	28,61	23,7	0,59729	622,4
77,58	0,4139	32,12	23,6	0,67056	413,9
116,5	0,3017	35,15	23,5	0,73382	301,7
133,2	0,2713	36,14	23,5	0,75449	271,3

Tabla 64. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 25.2°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
21,5	0,9384	20,18	25,5	0,42129	938,4
94,28	0,3165	29,84	25,4	0,62296	316,5
168,8	0,2061	34,79	25,2	0,72630	206,1
245,1	0,1564	38,34	25,1	0,80042	156,4
326,8	0,1268	41,44	25	0,86514	126,8

Tabla 65. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 38.9°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,94	0,4653	18,58	38,99	0,38789	465,3
94,08	0,2453	23,07	38,67	0,48163	245,3
168,6	0,1575	26,56	38,63	0,55449	157,5
245	0,1194	29,25	38,97	0,61065	119,4
326,7	0,09666	31,58	39,58	0,65929	96,7

Tabla 66. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 39.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
8,734	1,722	15,04	39,78	0,31399	1722,0
45,94	0,4762	21,88	39,82	0,45678	476,2
77,61	0,3137	24,35	39,58	0,50835	313,7
116,6	0,2258	26,32	39,48	0,54948	225,8
133,3	0,2023	26,97	39,53	0,56305	202,3

Tabla 67. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 50.3°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
16,29	0,937	15,26	50,7	0,31858	937,0
46	0,4207	19,35	50,58	0,40397	420,7
77,7	0,2764	21,47	50,22	0,44823	276,4
116,7	0,1993	23,26	50,1	0,48559	199,3
133,4	0,1785	23,82	49,99	0,49729	178,5

Tabla 68. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 53.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
21,44	0,6593	14,14	54,1	0,29520	659,3
94,25	0,216	20,36	53,83	0,42505	216,0
169	0,1393	23,53	53,29	0,49123	139,3
245,4	0,1037	25,45	53,12	0,53132	103,7
327,4	0,08269	27,07	53,44	0,56514	82,7

Tabla 69. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 74.5°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
40,02	0,2823	11,3	75,1	0,23591	282,3
94,37	0,1516	14,31	74,43	0,29875	151,6
169,2	0,09595	16,24	74,14	0,33904	96,0
245,9	0,07154	17,59	74,46	0,36722	71,5
328	0,05725	18,78	74,47	0,39207	57,3

Tabla 70. Resultados de una prueba de reología usando la geometría C25 WG con el viscosímetro Bohlin Visco 75.7°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
38,5	0,3625	13,95	76,11	0,29123	362,5
46,11	0,3156	14,55	75,93	0,30376	315,6
77,94	0,2055	16,02	75,48	0,33445	205,5
117,1	0,1457	17,05	75,42	0,35595	145,7
133,9	0,1293	17,31	75,57	0,36138	129,3

Tabla 71. Resultados de una prueba de histéresis usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 22.6°C.

Rata de corte (1/s)	Viscosidad (Pa*s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Temperatura (°C)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
39,96	0,6225	24,88	22,8	0,51942	622,5
94,14	0,332	31,25	22,7	0,65240	332,0
168,7	0,2159	36,41	22,7	0,76013	215,9
245	0,1641	40,19	22,6	0,83904	164,1
326,7	0,1331	43,48	22,6	0,90772	133,1
326,6	0,1323	43,23	22,5	0,90251	132,3
244,9	0,1625	39,78	22,5	0,83048	162,5
168,6	0,2124	35,8	22,5	0,74739	212,4
94,05	0,3251	30,58	22,5	0,63841	325,1
39,94	0,6102	24,37	22,5	0,50877	610,2

Tabla 72. Resultados de una prueba de tixotropía durante la fase estable usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 21.7°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
10,74	18,15	1,69	40,94	0,37891	1690,0
10,73	18,16	1,692	81,94	0,37912	1692,0
10,72	18,12	1,689	122,9	0,37829	1689,0
10,72	18,09	1,688	204,9	0,37766	1688,0
10,71	18,08	1,687	256,2	0,37745	1687,0

Tabla 73. Resultados de una prueba de tixotropía durante la fase de regeneración usando la geometría C30 con el viscosímetro Bohlin Visco 88 a 21.4°C.

Rata de corte (1/s)	Esfuerzo de corte (Pa)	Viscosidad (Pa*s)	Tiempo (seg)	Esfuerzo de corte (lbf/ft ²)	Viscosidad (cp)
10,7	17,33	1,619	40,94	0,36180	1619,0
10,7	17,5	1,635	81,94	0,36534	1635,0
10,7	17,54	1,639	122,9	0,36618	1639,0
10,71	17,54	1,638	204,9	0,36618	1638,0
10,71	17,56	1,64	256,2	0,36660	1640,0

Capítulo 8. Validación técnica del viscosímetro Bohlin Visco 88 y caracterización de los fluidos de fracturamiento

8.1 Generalidades

Durante este capítulo, se demostrará que el viscosímetro Bohlin Visco 88 efectivamente sirve para caracterizar fluidos de fracturamiento, a la vez se hará la respectiva caracterización a los fluidos para dar un indicativo de los resultados.

8.2 Fluido LAPE 001

Como primera medida de control de calidad, se grafican todas las curvas de viscosidad generadas con las diferentes geometrías, para compararlas entre si y ver si sus valores coinciden o por el contrario difieren.

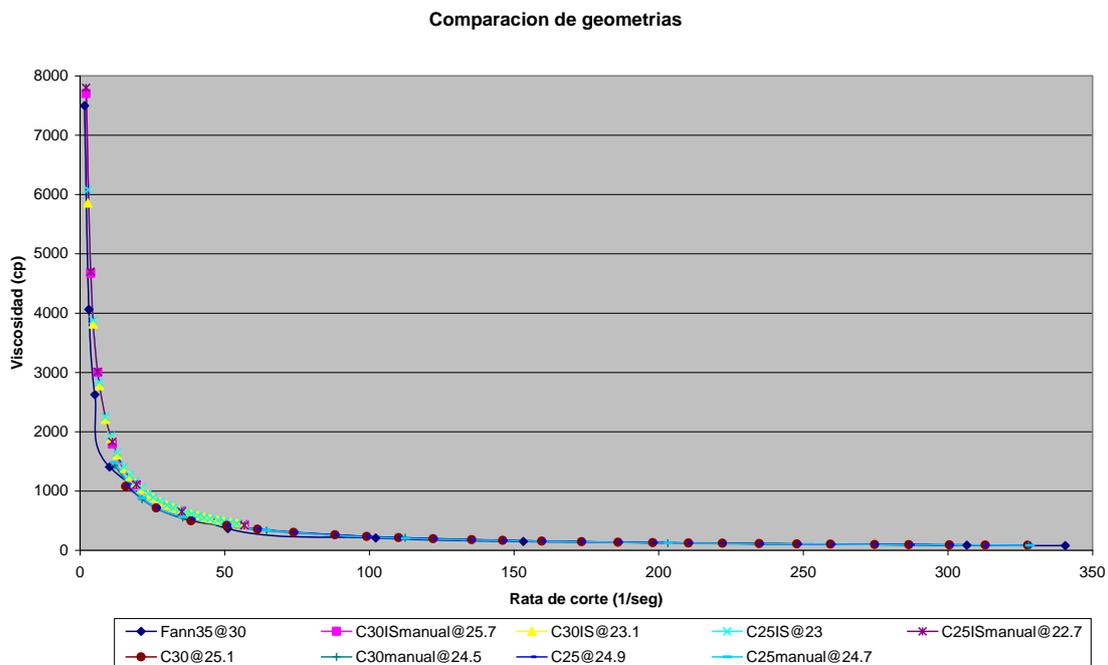


Figura 116. Comparación de curvas de viscosidad generadas a diferentes geometrías para el fluido LAPE 001.

De esta figura, se pueden notar algunos detalles; por ejemplo como primero se mencionan las variaciones generadas en las temperaturas de las curvas, esto es debido a que los sistemas de control de temperatura presentan inestabilidad y son muy sensibles a los cambios de temperatura, sin embargo se puede notar que todas las curvas tienen la misma tendencia y casi los mismos valores, es decir que no importa que geometría se use con el viscosímetro, los resultados siempre serán los mismos, y si se compara con los resultados generados con el viscosímetro Fann 35 se puede notar que las variaciones mostradas se deben a la diferencia en las temperaturas de las curvas, sin embargo todas las curvas muestran el mismo comportamiento, siendo así un indicativo de que sin importar el viscosímetro se pueden generar curvas de viscosidad a diferentes temperaturas.

Luego de las observaciones comentadas, procedemos a hacer comparaciones entre curvas de flujo y curvas de viscosidad a diferentes temperaturas y diferentes geometrías para corroborar que los resultados generados no dependen de la geometría sino de la temperatura a la que se realice la prueba.

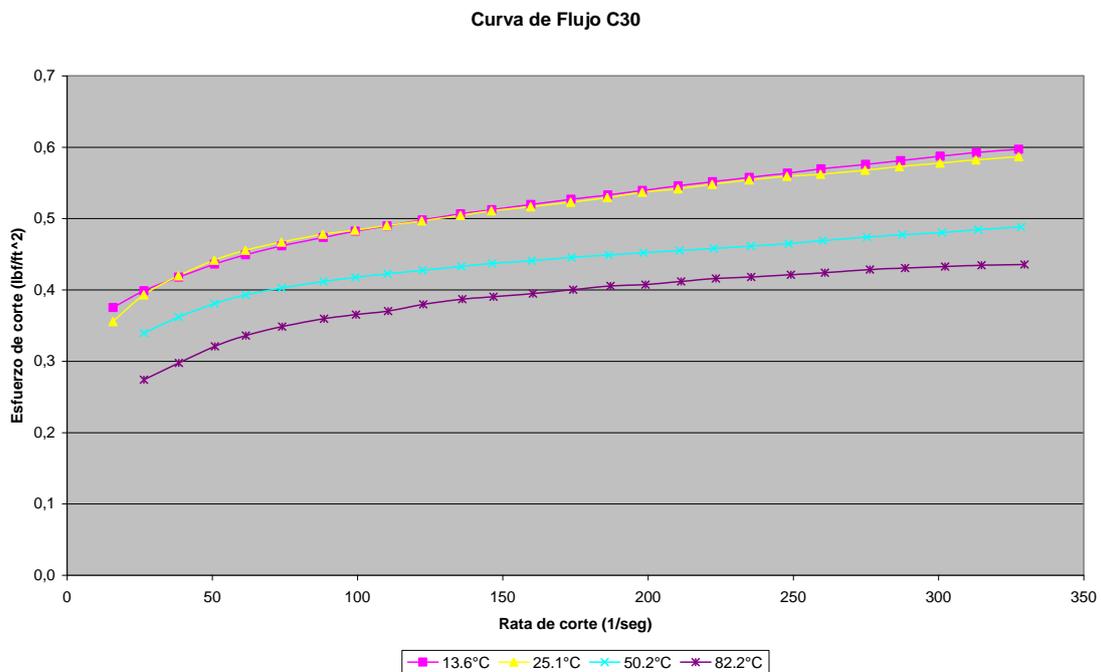


Figura 117. Curva de flujo generada para diferentes temperaturas con la geometría C30 para el fluido LAPE 001.

Curva de viscosidad C30

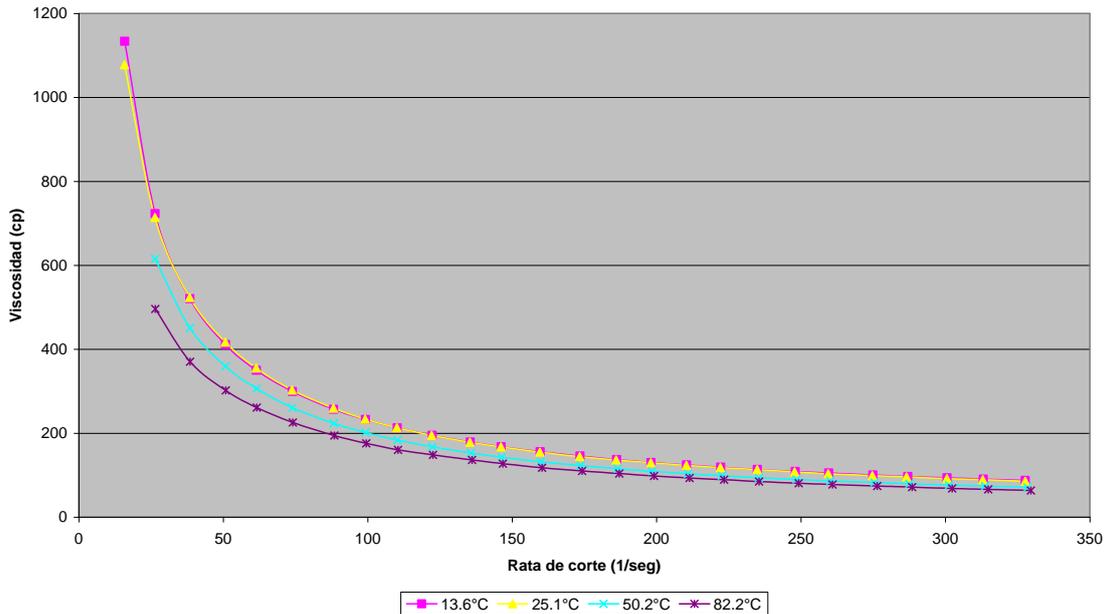


Figura 118. Curva de viscosidad generada para diferentes temperaturas con la geometría C30 para el fluido LAPE 001.

De las dos figuras anteriores se puede destacar el comportamiento de las curvas, este tipo de comportamiento es típico en los fluidos pseudoplásticos, pues la viscosidad va reduciéndose a medida que la tasa de corte se va incrementando, también se puede destacar que en las dos gráficas anteriores es evidente el cambio de la viscosidad a diferentes temperaturas mencionado anteriormente en el capítulo uno, sin embargo dicha variación de la viscosidad con la temperatura no es muy notable en las curvas de 13.6°C y 25.1°C posiblemente debido a que a estas temperaturas el cambio de la viscosidad no sea muy notable, este comportamiento especial se explicará con mayor detalle en las próximas gráficas.

Curva de flujo C25

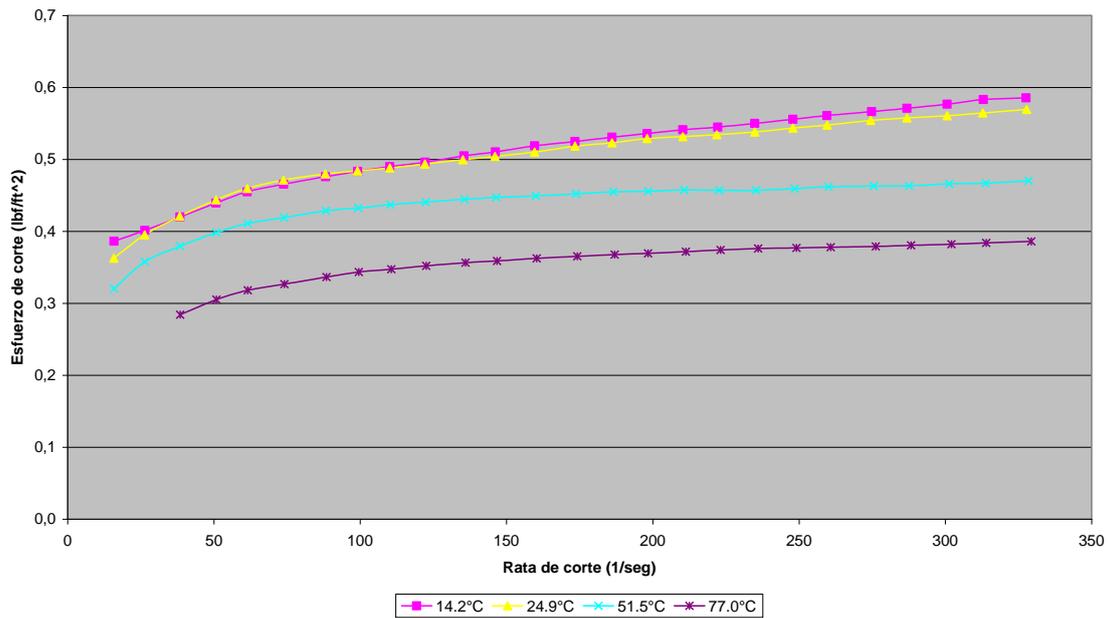


Figura 119. Curva de flujo generada para diferentes temperaturas usando la geometría C25 para el fluido LAPE 001.

Curva de viscosidad C25

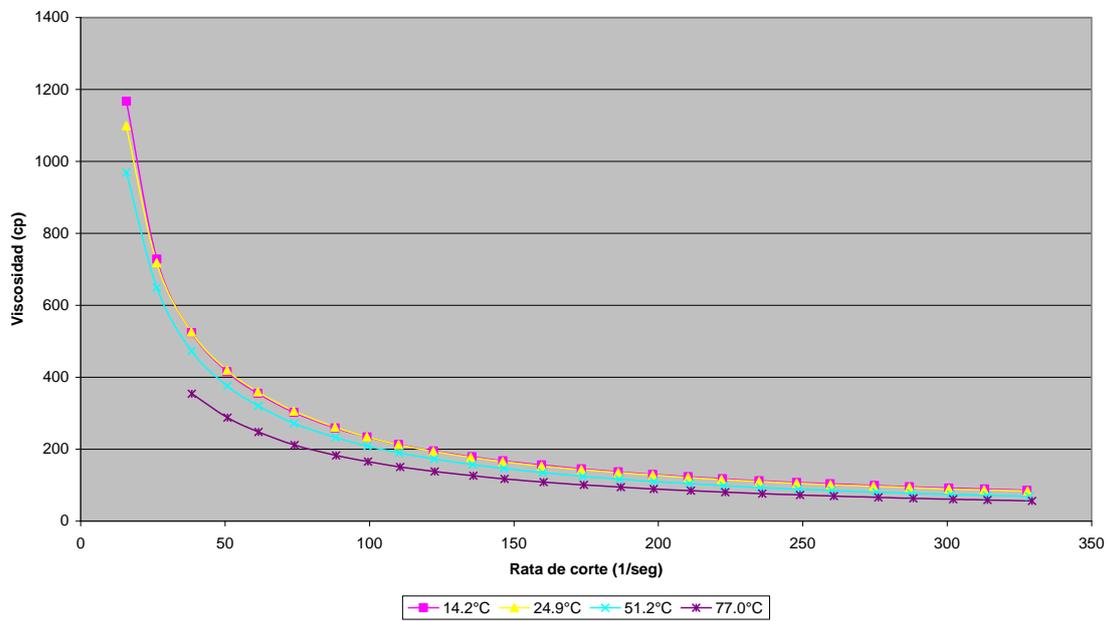


Figura 120. Curva de viscosidad generada para diferentes temperaturas usando la geometría C25 para el fluido LAPE 001.

De estas dos figuras, se puede mencionar la similitud con las curvas generadas con la geometría C30, además de la estabilidad de la viscosidad entre las temperaturas de 14.2°C y 24.9°C, a pesar que son temperaturas diferentes a las temperaturas tomadas en las figuras 117 y 188 es notable que existe un rango de temperaturas en el cual la viscosidad debe comportarse de manera casi constante para este fluido.

Existen dos pruebas no incluidas en la norma API de fluidos de fracturamiento, que deberían ser consideradas para caracterizar de una forma más completa los fluidos, estas pruebas son la de histéresis y la de tixotropía.

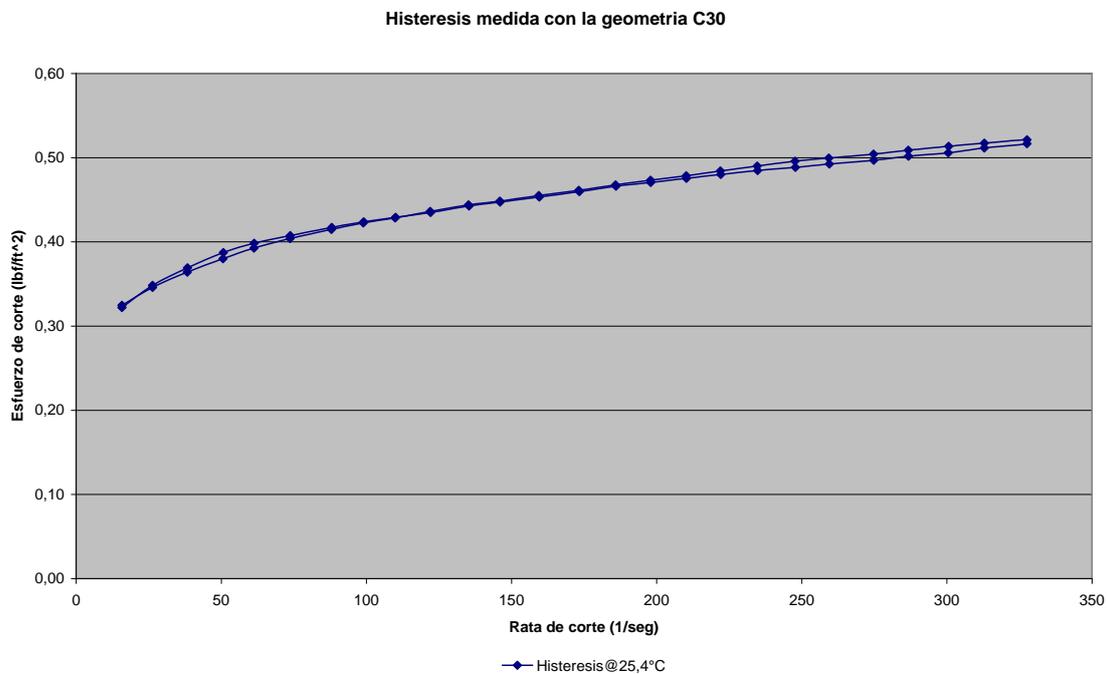


Figura 121. Curva de histéresis medida a 25.4°C con la geometría C30 para el fluido LAPE 001.

Como se puede notar en la curva de histéresis mostrada en la figura 121, la variación de esfuerzo de corte entre cada lectura, no tiene una variación significativa, es decir que la histéresis del fluido no es alta, razón por la cual se podría despreciar dicho valor, sin embargo hay que tener en cuenta que este valor no se podría despreciar si la amplitud de la curva tuviera un valor relativamente alto.

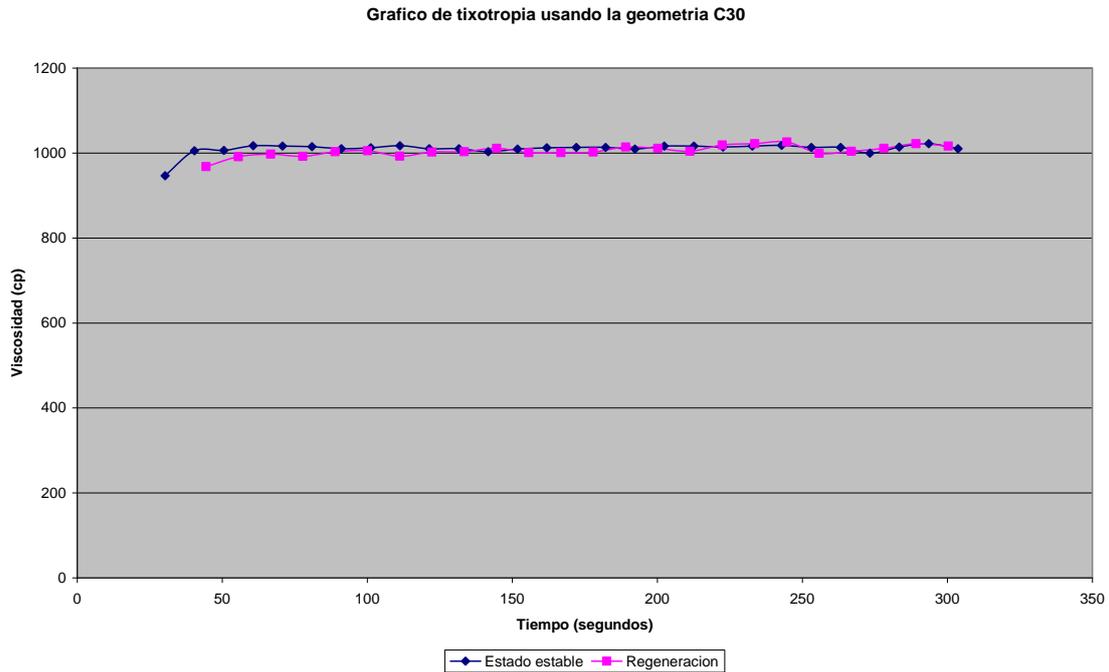


Figura 122. Curva de tixotropía medida a 25.2°C usando la geometría C30 para el fluido LAPE 001.

Si se analiza la figura anterior, se puede concluir que el fluido no tiene un efecto tixotrópico notable, solamente es un efecto retardante en la recuperación de la viscosidad, también se puede notar que la recuperación del fluido en la curva “regeneración”, es del 100% razón por la cual no hay que expresar la tixotropía como porcentaje de regeneración, ni hacer ningún calculo para poder determinar que tanto porcentaje se recupera el fluido, en otras palabras se puede decir que el fluido es tixotrópico pues se puede notar que a partir de los 100 segundos de prueba ambas curvas son muy parecidas, ósea que el fluido se recupera totalmente sin importar a que rata de corte se ha sometido.

Luego de realizar las diferentes pruebas, se realiza una caracterización de viscosidad por temperatura, tomando de todas las curvas las lecturas de temperatura y viscosidad dejando la rata de corte constante para todos los puntos leídos, obteniendo así las siguientes gráficas.

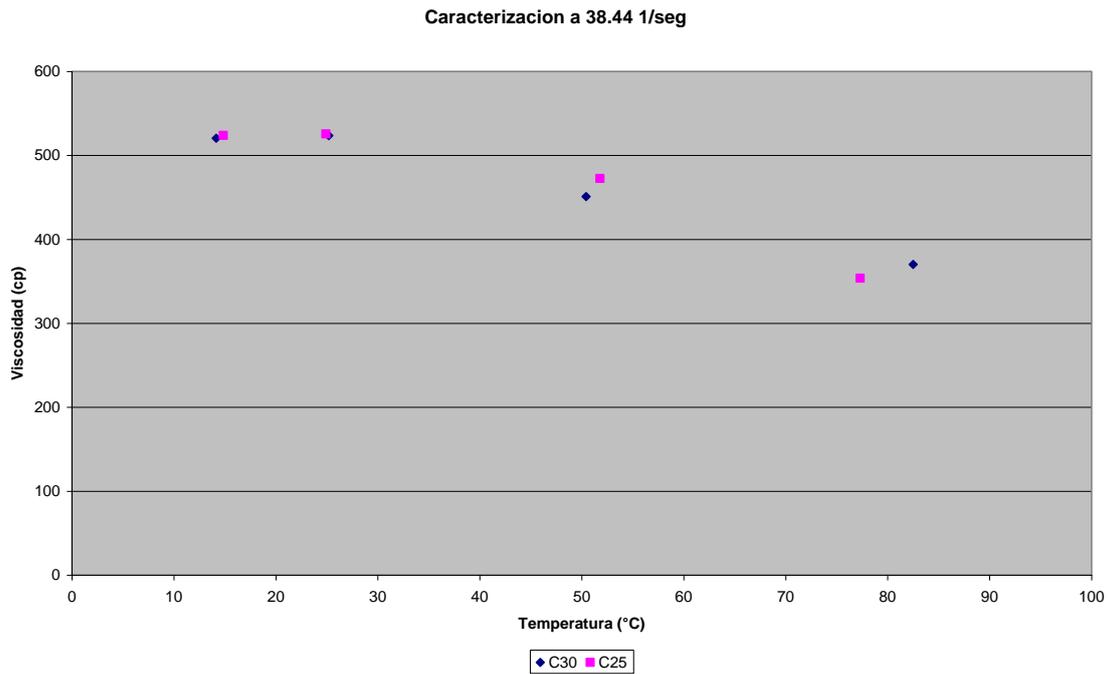


Figura 123. Caracterización de viscosidad por temperaturas a una tasa de corte de 38.44 1/seg para el fluido LAPE 001.

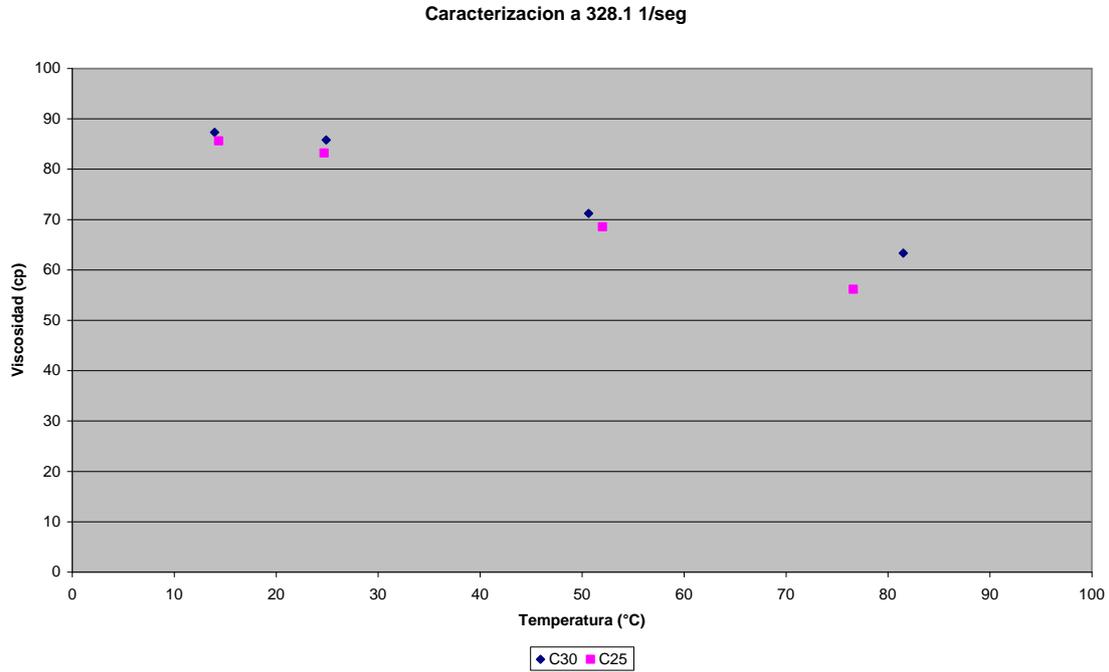


Figura 124. Caracterización de viscosidad por temperaturas a una tasa de corte 328.1 1/seg para el fluido LAPE 001.

Las dos figuras anteriores son muy esenciales para la caracterización de un fluido, debido a que en esta se muestra claramente la relación que existe entre la temperatura y la viscosidad de un fluido, además que teniendo estas figuras para un fluido se hace mas sencillo el momento de escoger el tipo de fluido y de aditivo dependiendo de las necesidades de viscosidad que se tengan para trabajar en el fondo del pozo; pues como es bien sabido la temperatura de un yacimiento es muy diferente a la temperatura de superficie, por lo tanto también lo será el comportamiento de la viscosidad y las propiedades reológicas del fluido. Si se deseara, se podrían generar más puntos para así completar la gráfica, o sencillamente sacar una línea de tendencia para trabajar interpolando la viscosidad y las propiedades reológicas a diferentes temperaturas. Otro comentario sobre las dos figuras anteriores, es que se puede ver que tanto para la geometría C25 y la geometría C30 del viscosímetro Bohlin Visco 88, las curvas generadas son casi las mismas, las diferencias entre los puntos radican en las temperaturas a las cuales fueron realizadas las pruebas y a posibles errores en cuanto al control de la temperatura, sin embargo se puede ver que es indiferente usar la geometría C30 a la C25 para caracterizar fluidos.

Adicionalmente a estas graficas para determinar la viscosidad de un fluido a la temperatura deseada, también se pueden determinar otras propiedades propias de los fluidos pseudoplasticos, estas propiedades son el índice de consistencia k y el índice de comportamiento de flujo n , estos valores representan las variables c y n respectivamente en la ecuación 4 en el capítulo 3, y tener un conocimiento de estas variables a cualquier temperatura representa una gran ventaja durante las operaciones de fracturamiento hidráulico.

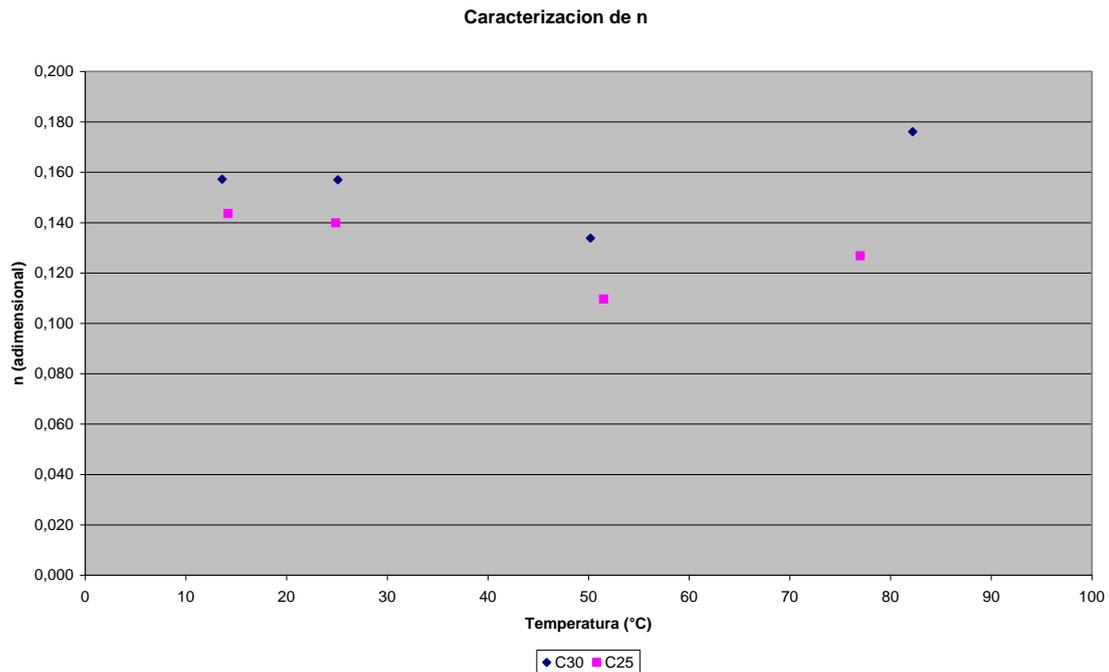


Figura 125. Caracterización de la propiedad n para el fluido LAPE 001.

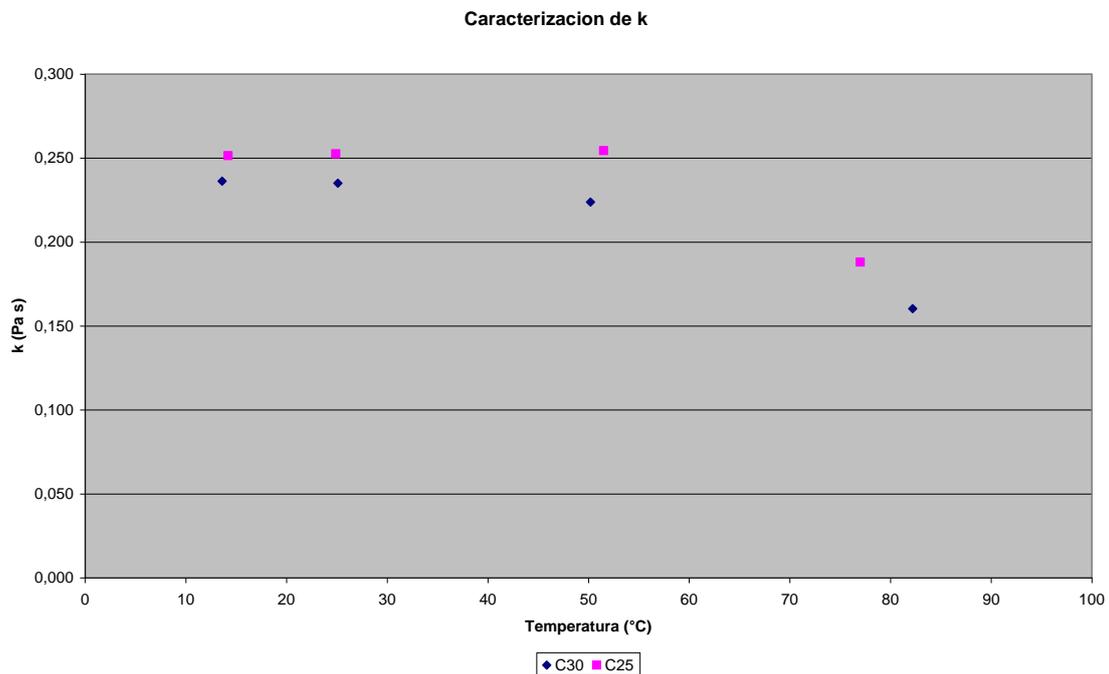


Figura 126. Caracterización de la propiedad k para el fluido LAPE 001.

Como se puede notar en las dos gráficas anteriores, con el viscosímetro Bohlin Visco 88 se puede generar un amplio conocimiento de los fluidos de fracturamiento para varias temperaturas, también se puede destacar que el

mismo paquete de datos puede ser generado por varias geometrías, esto representa una gran ventaja debido a que toda la información puede ser validada por cada geometría y dependiendo del numero de veces que se repita la prueba.

8.3 Fluido LAPE 002

El fluido LAPE 002, es un reductor de perdidas de filtrado, la primer gráfica que se construyó para la caracterización de este fue la curva de comparación de geometrías, esto con el fin de juzgar los diferentes sistemas de medición y poder sacar conclusiones respecto a estos.

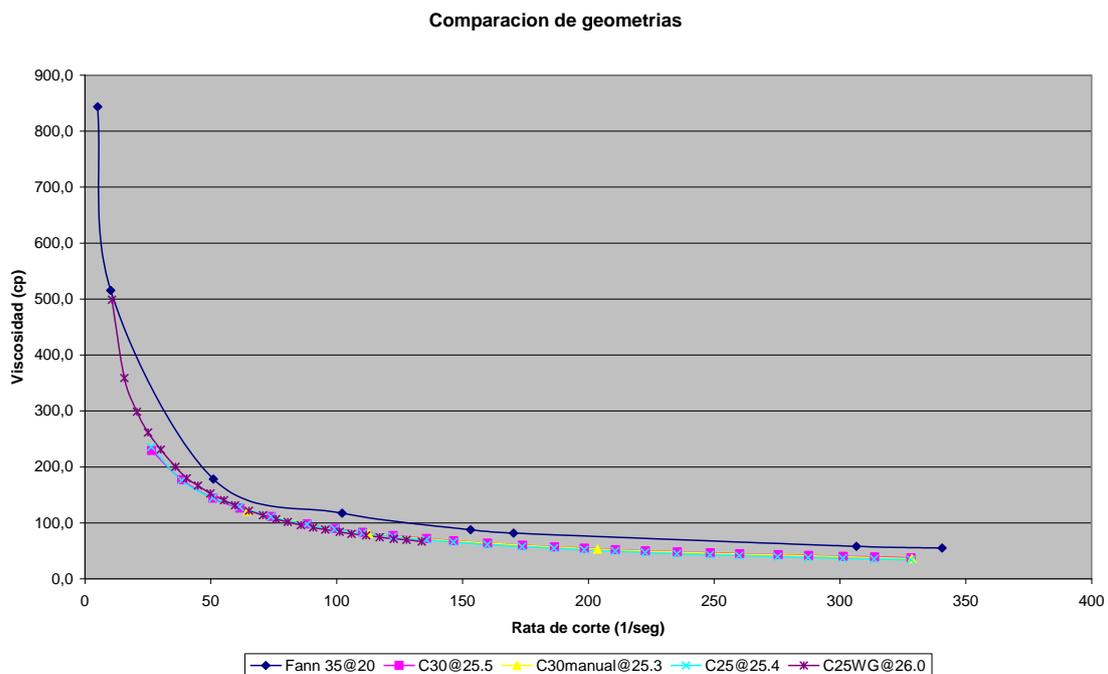


Figura 127. Figura de comparación de geometrías para el fluido LAPE 002.

Como se puede observar en la figura anterior, la curva correspondiente al viscosímetro Fann 35, no ajusta y por el contrario difiere de las otras curvas, esto se debe evidentemente a la lectura a la cual fue realizada la prueba, pues como se nota en la leyenda de la figura, esa prueba fue corrida a 20°C y el resto de figuras fueron corridas entre 25.3°C y 26°C, es decir que hay una diferencia de 5°C en la prueba, esta diferencia es muy grande y por eso se nota

el efecto de variación de viscosidad por temperatura, si se analizan el resto de curvas, se puede ver que todas ajustan y tienen la misma tendencia, tanto las geometrías de rango medio de rata de corte como la geometría de bajo rango de rata de corte.

Con este fluido se quiso hacer un ejercicio diferente, no se compararán dos geometrías de igual rango de rata de corte sino que se trabajaran una de rango medio (C30) y una de rango bajo (C25 wg), esto con el fin de observar las diferencias entre ambos y ver si el viscosímetro puede trabajar y corregir el efecto de los fluidos pseudoplasticos a bajas y elevadas ratas de corte.

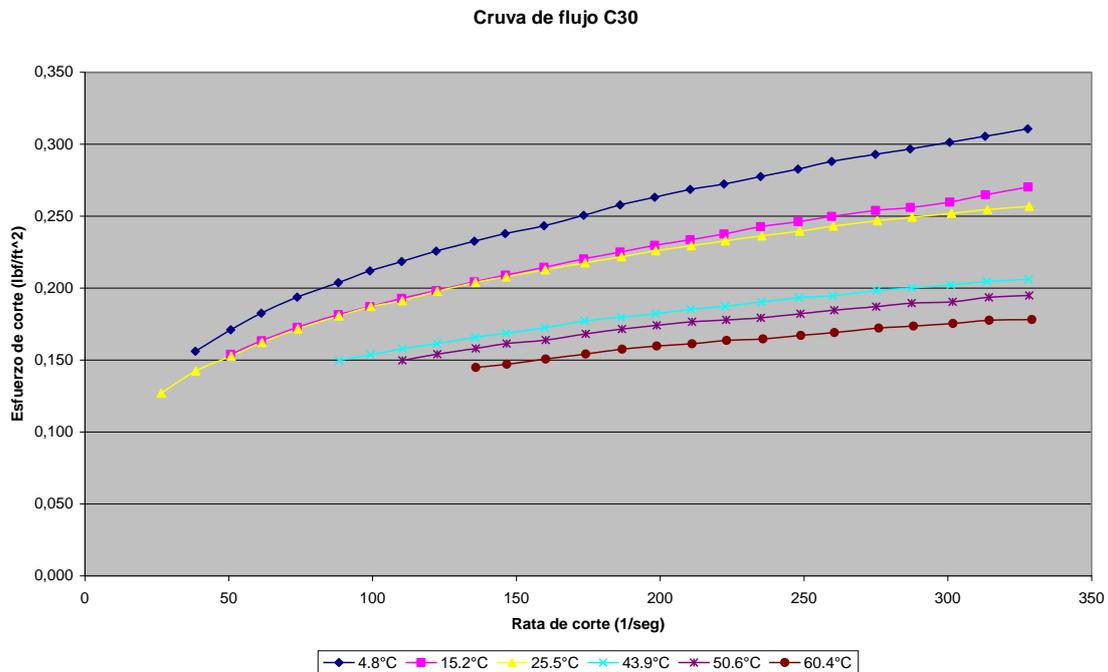


Figura 128. Curva de flujo usando la geometría C30 en el fluido LAPE 002.

Curva de viscosidad

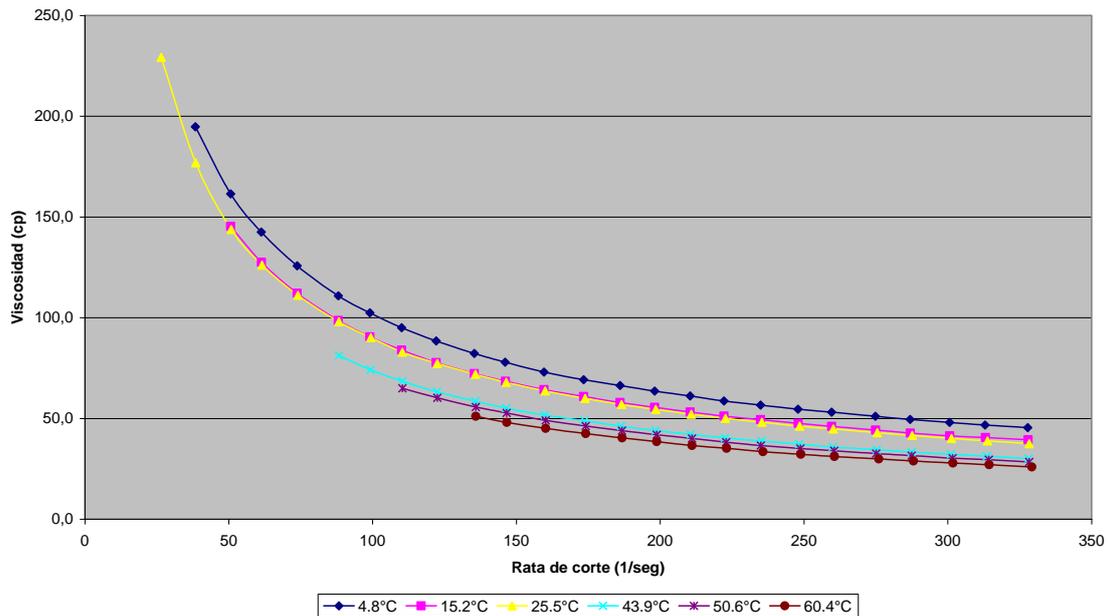


Figura 129. Curva de viscosidad usando la geometría C30 en el fluido LAPE 002.

Lo primero que salta a la vista en las dos figuras anteriores, es la dificultad de tomar medidas de viscosidad a elevadas temperaturas en un fluido de baja viscosidad, pues como se mencionó antes, este fluido no posee características viscosas sino que tiene características de reducción de pérdida de filtrado. Este efecto se muestra claramente en la figura 29, pues a medida que se aumentaba la temperatura de la prueba, se hacía más difícil para el viscosímetro leer datos y es por eso que se tienen menos puntos para graficar la curva de viscosidad a altas temperaturas. También se puede mencionar que el fluido posee un comportamiento normal de la viscosidad a medida que aumenta la temperatura, pues como se observa a mayores temperaturas la viscosidad leída es menor.

Cruva de flujo C25 wg

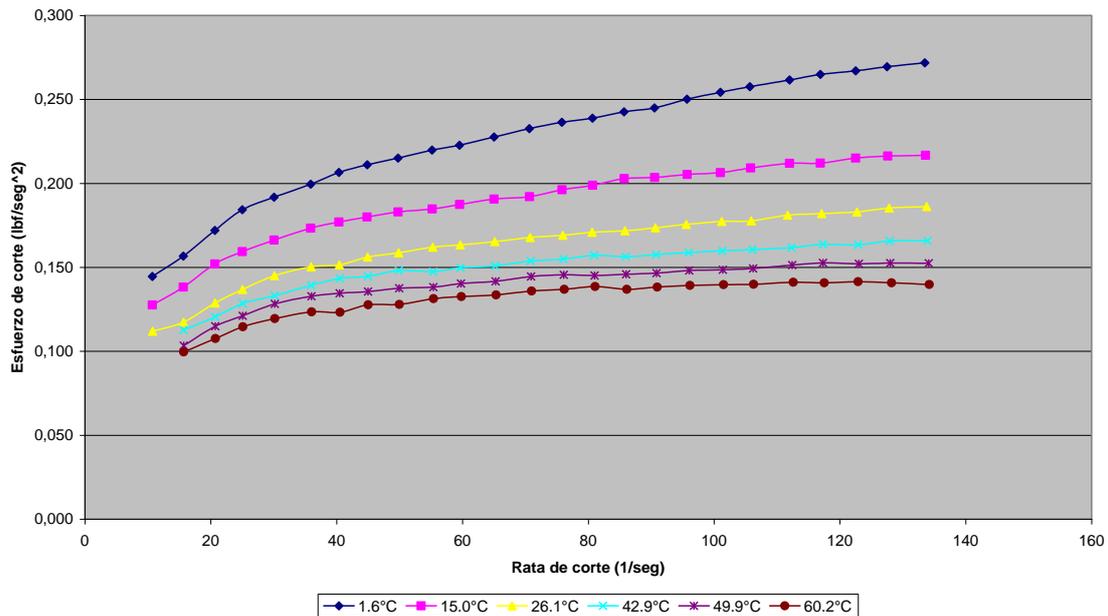


Figura 130. Curva de flujo usando la geometría C25 wg en el fluido LAPE 002.

Curva de viscosidad C25 WG

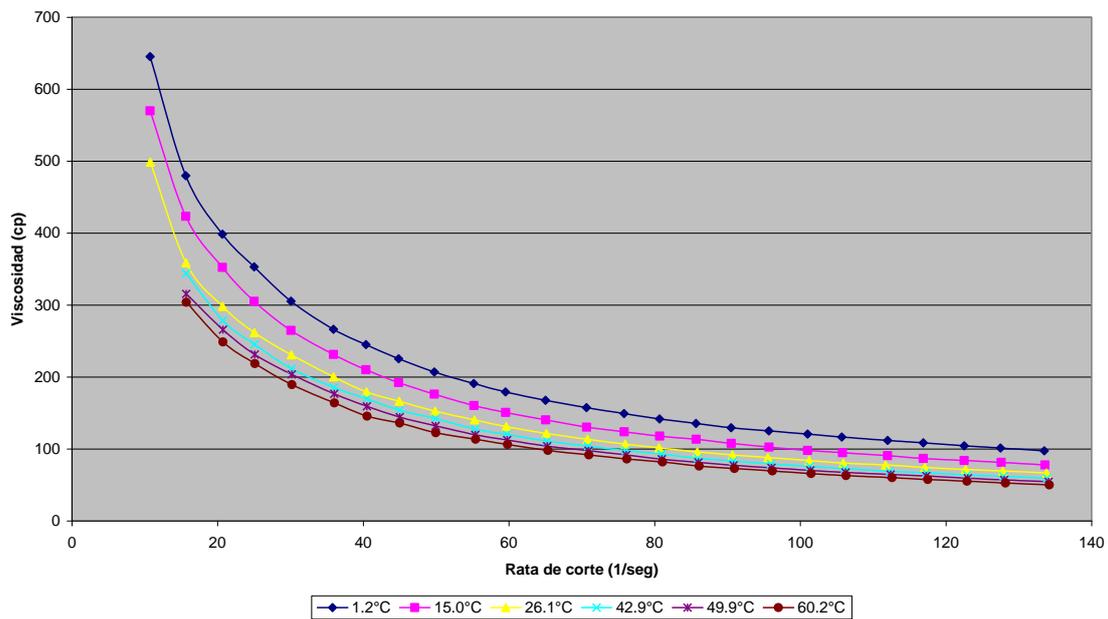


Figura 131. Curva de viscosidad usando la geometría C25 wg en el fluido LAPE 002.

De las curvas anteriores, se puede destacar el ruido que hubo durante las pruebas, el ruido en las lecturas se hace de mayor evidencia en la figura 130, dicho ruido puede ser ocasionado por múltiples variables, sin embargo la que

mas influyó fue la de que ningún punto leído superó el valor de 0.5 mNm, es decir que si se discretizara la prueba rechazando todos los valores inferiores a 0.5 mNm, se desecharía toda la prueba, sin embargo debido a que el 100% de puntos esta por debajo del limite de inferior, se decidió evaluar las propiedades del fluido bajo esta condición para compararlas con las propiedades evaluadas con el C30 el cual ya se tiene certeza de que funciona por las pruebas realizadas con el fluido anterior. Los resultados no son confiables, debido a que el fluido no es muy viscoso para entrar al rango de lecturas de la geometría C25 wg, aunque a pesar de este problema, los datos tienen cierta semejanza con los datos generados por la geometría C30, si se compraran las figuras 129 y 131, se puede notar que para una rata de corte de 100 1/seg, la figura 129 tiene todos los puntos en un rango de viscosidad entre 74 y 105 cp, y la figura 130 tiene todos los puntos en un rango de viscosidad entre 65 y 120 cp, si se analiza dichos rangos se puede notar que no son muy diferentes siempre y cuando se tenga en cuenta que el viscosímetro realiza las mediciones en unidades de Pas, la cual es una unidad demasiado sensible a los cambios de viscosidad cuando se pasan a cp debido a su factor de conversión.

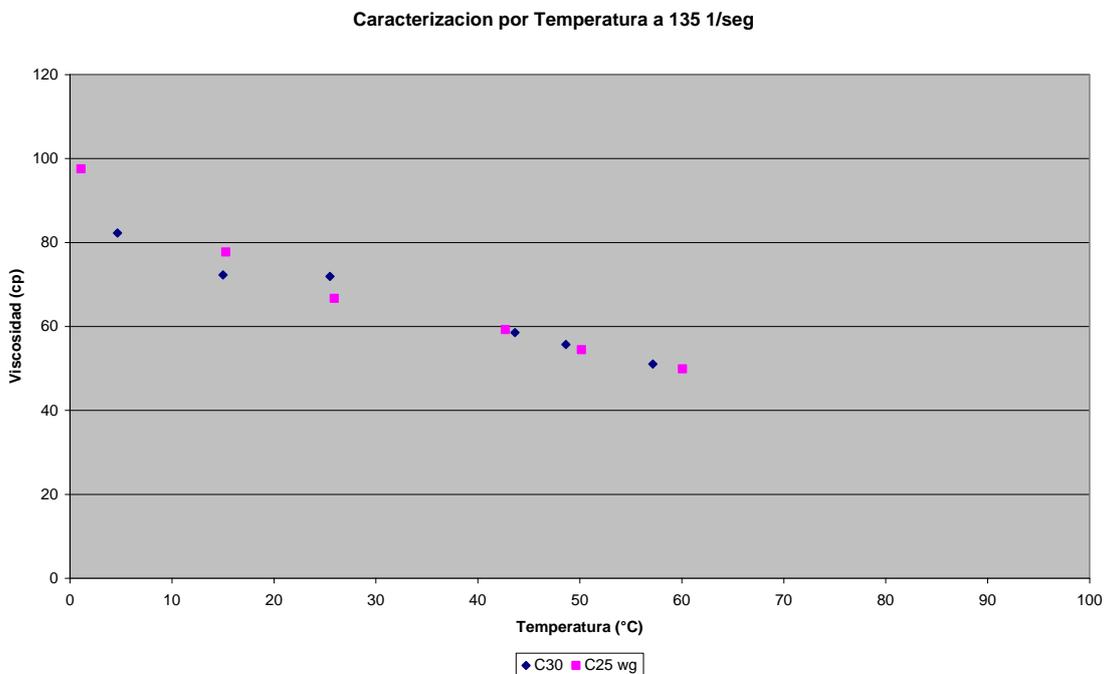


Figura 132. Caracterización de viscosidad por temperatura generada a 135 1/seg para el fluido LAPE 002.

La figura anterior, se construyó sacando de las diferentes pruebas, los puntos de viscosidad a una rata de corte constante con valor de 135 1/seg, es de tener en cuenta, que cuando se trabajó este fluido, no se pudo realizar pruebas a temperaturas mas altas de 60°C debido a que el aditivo usado por ser un producto orgánico y de comportamiento similar a la colada, a altas temperaturas se empastaba sobre las paredes de la copa donde esta la muestra de fluido aislando temperatura y frenando el rotor del viscosímetro, es decir que este aditivo no puede ser trabajado de manera individual a altas temperaturas, siempre tiene que ir acompañado de un agente viscosificante para que no suceda este tipo de inconvenientes, sin embargo se tomaron varios puntos y se puede generar una línea de tendencia con los puntos tomados. De la figura 132, también se puede mencionar el ajuste que existe entre ambas curvas, a pesar de que la curva construida con el C25 wg sean valores por debajo del limite inferior de validación del viscosímetro Bohlin Visco 88.

A continuación se procede a caracterizar las variables n y k para cualquier temperatura.

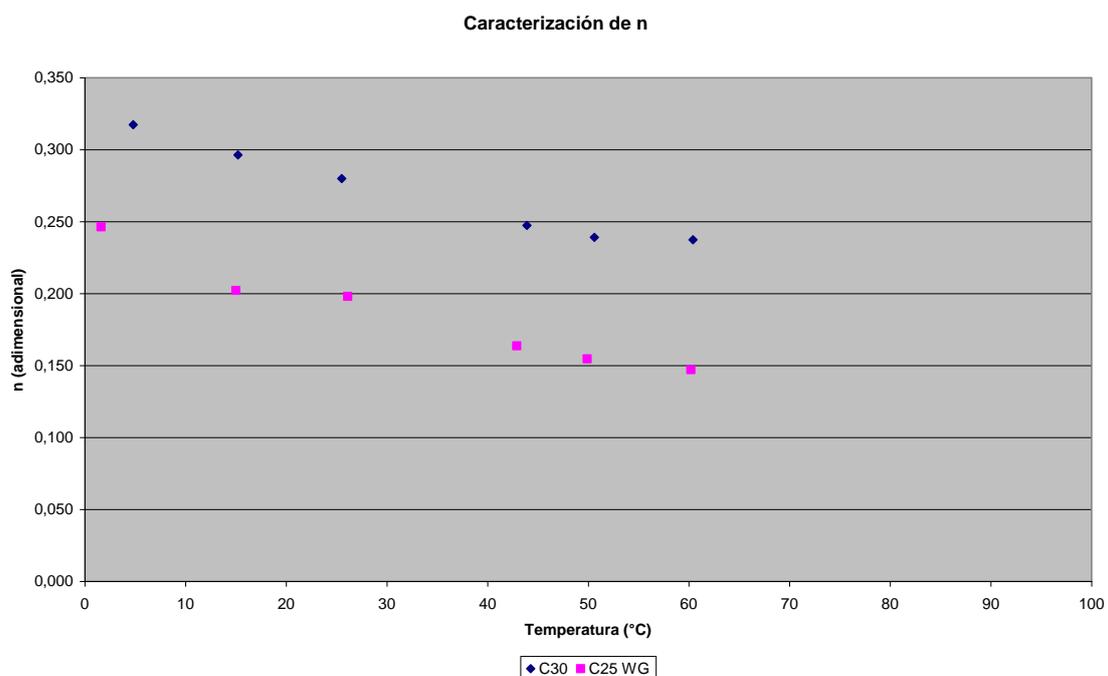


Figura 133. Caracterización de n para el fluido LAPE 002.

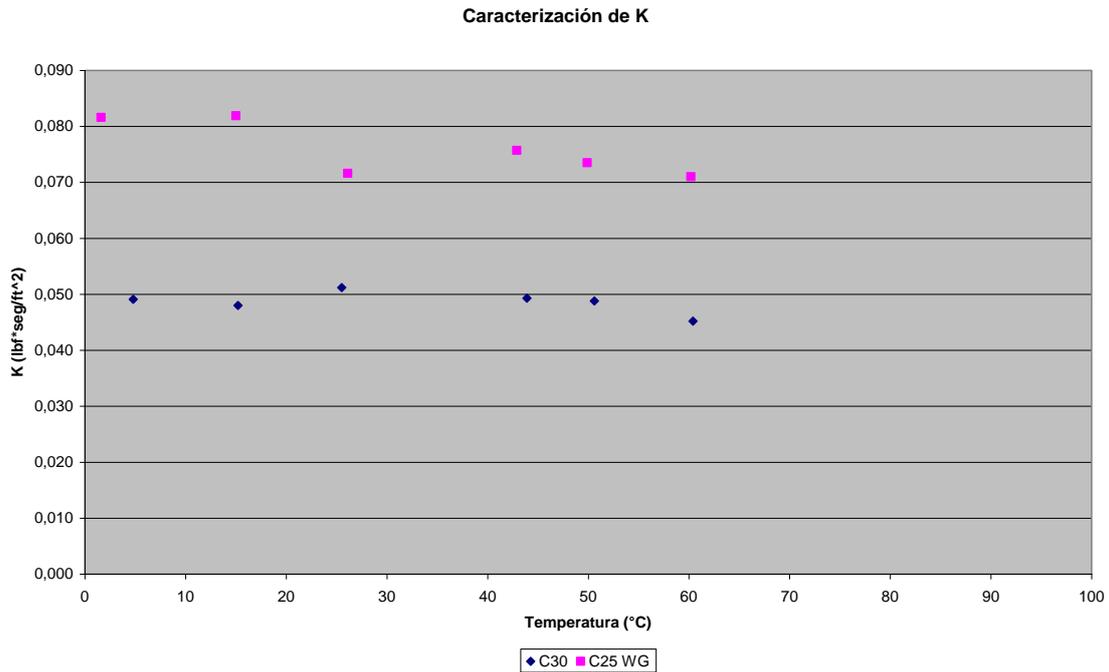


Figura 134. Caracterización de k para el fluido LAPE 002.

Teniendo en cuenta las dos curvas anteriores, se evidencia la diferencia que existe entre las dos geometrías por causa de no tener valores confiables con alguna de las dos geometrías, en este caso el C25 wg, pues como se había mencionado antes de todos los valores leídos en todas las pruebas corridas ninguno superó el límite inferior de validación de 0.5 mNm. Se podrían haber tomado más puntos para poder generar una tendencia y así extrapolar estos dos parámetros a cualquier temperatura, aunque con cinco puntos ya se están tomando más puntos de los indicados por la norma API RP 39 y de paso se tiene un conocimiento más específico del fluido.

Por último se analizarán las pruebas de tixotropía e histéresis para analizar el comportamiento del fluido en dichas pruebas.

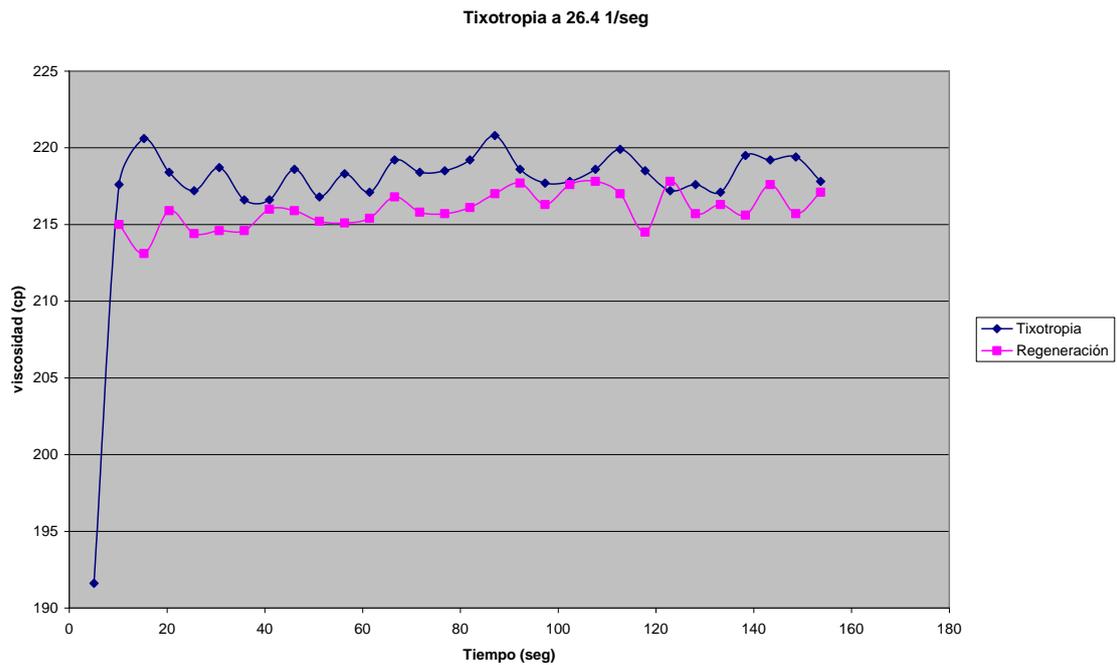


Figura 135. Curva de tixotropía a 26.4 1/seg para el fluido LAPE 002.

De esta figura, se puede notar una pequeña variación en las tendencias de los puntos leídos de alrededor de 5 cp, es decir que el fluido es tixotrópico pues si se hacen líneas de tendencia y se determina la variación entre la curva de tixotropía y la de regeneración el orden de variación es de alrededor del 2.3% valor que no es muy representativo para tener en cuenta. Es de comentar también, que ambas curvas tienen mucho ruido, posiblemente generado por el difícil control de una temperatura estable durante la prueba, pues se evidencia claramente con la manera en que están distribuidos los puntos a medida que avanza el tiempo.

HisteresisC30@25.02°C

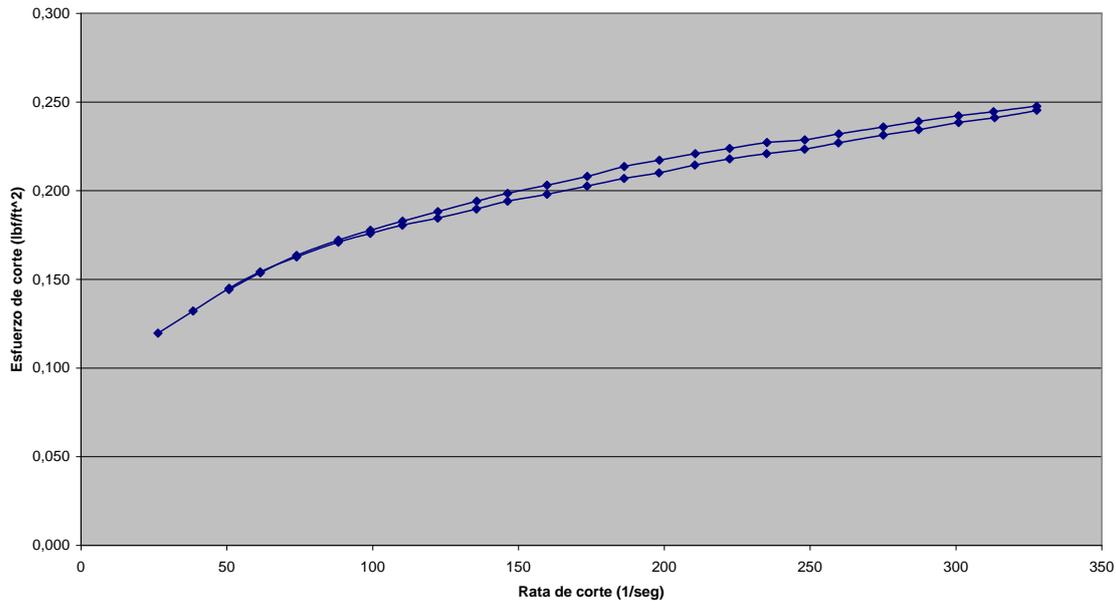


Figura 136. Curva de histéresis a 25.02°C para el fluido LAPE 002.

De la figura anterior, se puede decir que el efecto de histéresis en el fluido es despreciable, debido a que la amplitud de la curva es muy pequeña, si fuera mas grande se consideraría el fluido con una histéresis que se debe calcular hallando el área bajo la curva, sin embargo se ve que la tendencia de la curva es a mantenerse cerrada.

8.4 Fluido LAPE 003

El fluido LAPE 003 se analizó empleando las mismas geometrías que se usaron en el fluido LAPE 001, debido a que se quiere probar de nuevo como reaccionan estas dos geometrías ante fluidos de alta viscosidad, pues el fluido LAPE 003 fue preparado con un aditivo viscosificante líquido de ultima tecnología y es necesario asegurarse de que las lecturas pasen los rangos de tolerancia usando las dos geometrías mas sensibles que son el C30 y el C25.

Comparacion de geometrias

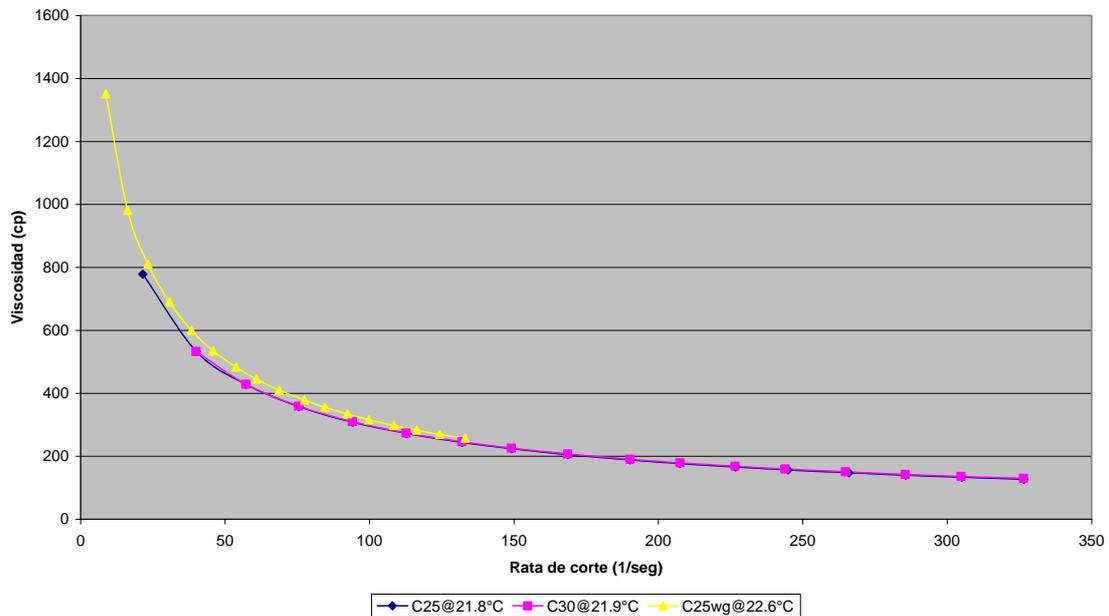


Figura 137. Comparación de geometrías en el fluido LAPE 003.

Como se observa en la figura anterior, las curvas de C25 y C30 tienen un ajuste muy parecido, mientras que la curva de C25 wg tiene datos de muy baja confiabilidad pues cuando se hizo la prueba ningún valor paso el limite inferior de confiabilidad que tiene el viscosímetro por defecto que es 0.5 mNm, al ocurrir 2 veces el mismo efecto se puede inferir que la geometría C25 wg es para geometrías extremadamente altas. Seguidamente se compararán las curvas de flujo y de viscosidad generadas por dos geometrías diferentes.

Curva de flujo C30

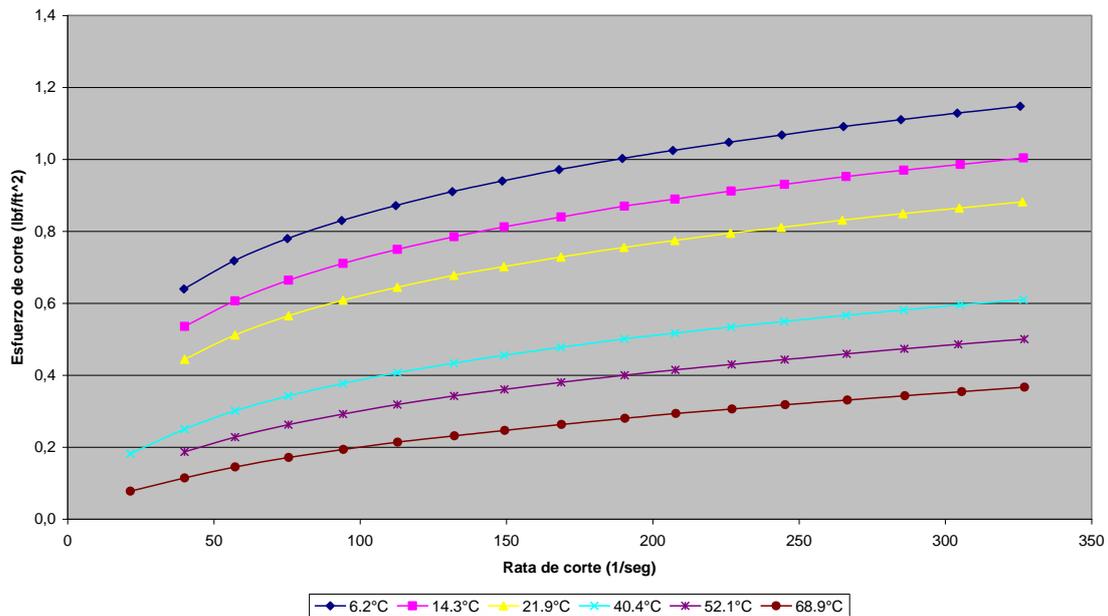


Figura 138. Curvas de flujo generadas a diferentes temperaturas para el fluido LAPE 003 usando la geometría C30.

Curva de viscosidad C30

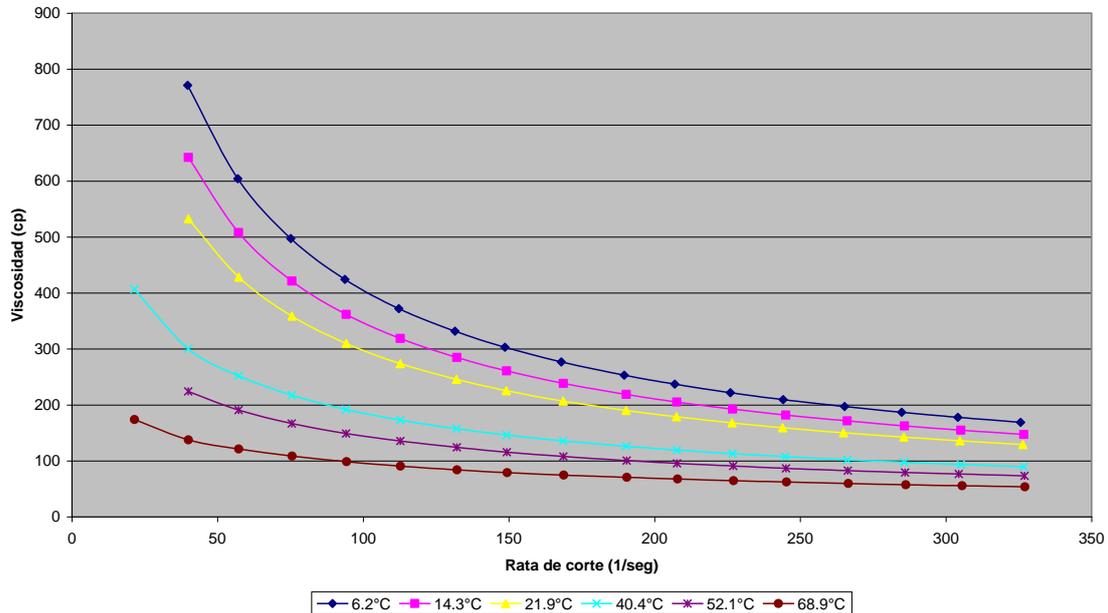


Figura 139. Curvas de viscosidad generadas a diferentes temperaturas para el fluido LAPE 003 usando la geometría C30.

De las dos figuras anteriores, se puede ver que el fluido tiene un comportamiento normal, entre mas temperatura tenga el fluido menor va a ser

su viscosidad, también se puede notar que a mayores temperaturas la tendencia del fluido a variar se va haciendo mínima, es decir que cada vez se va comportando mas como una línea recta, si se compara este fluido con el fluido LAPE 001, se puede notar que este fluido tiene una mayor viscosidad a temperaturas bajas, pero tiene una mayor caída de viscosidad a temperaturas altas, esto puede llegar a ser un problema en yacimientos de alta temperatura pues se perdería el control de sólidos, aumentaría la movilidad del fluido en la fractura y muy seguramente haya perdidas de filtrado considerables, sin embargo en yacimientos de temperatura relativamente baja este fluido podría trabajar de manera excelente por sus elevados valores de viscosidad.

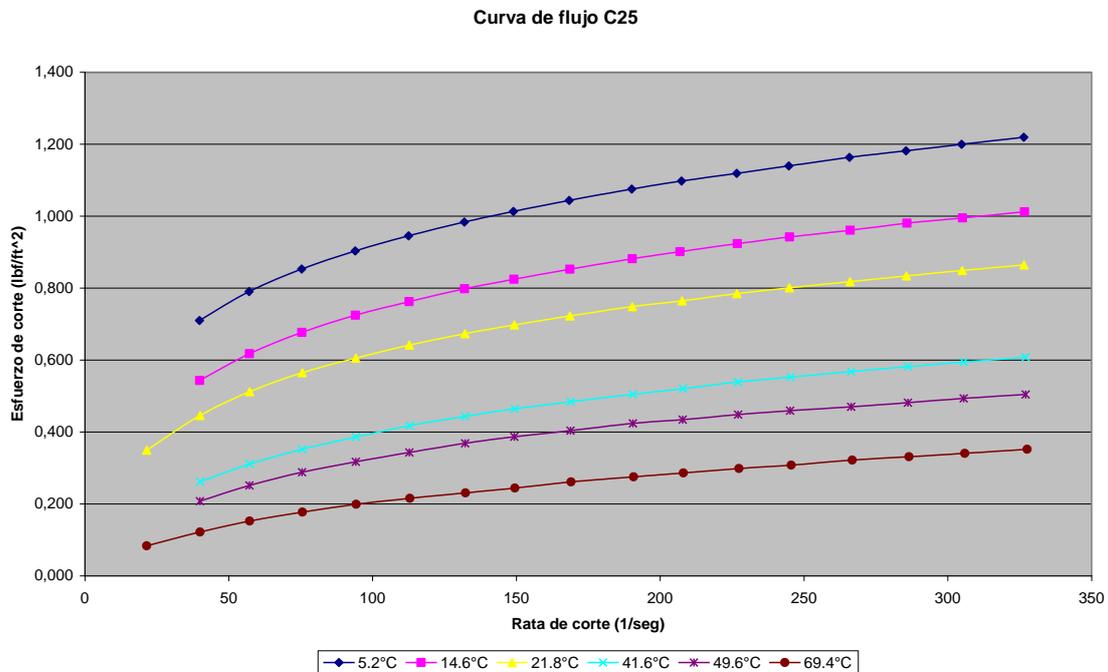


Figura 140. Curvas de flujo generadas con la geometría C25 para el fluido LAPE 003.

Curva de viscosidad C25

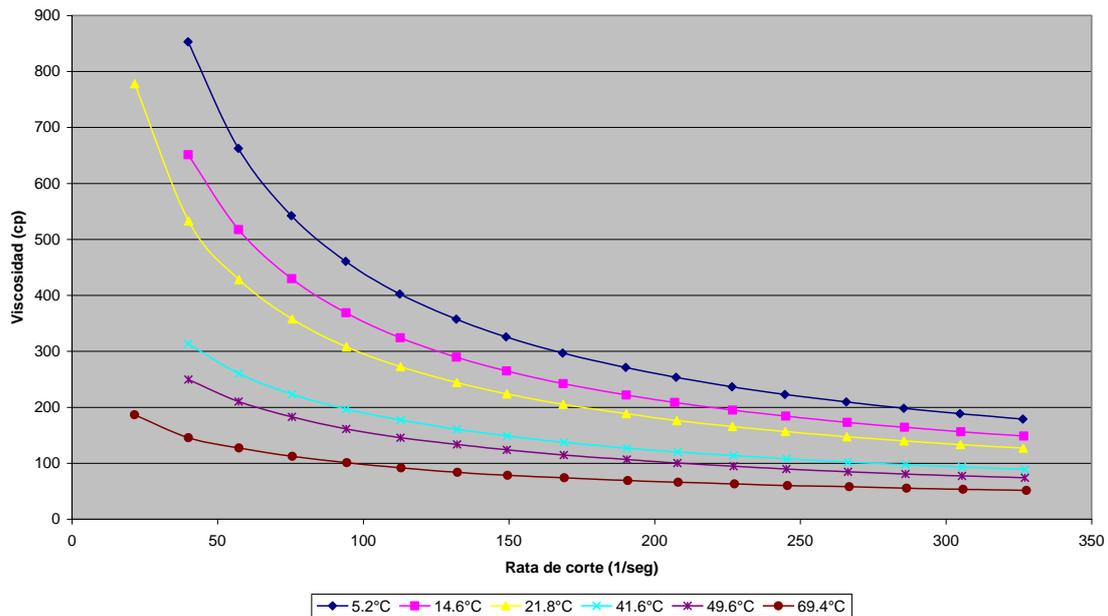


Figura 141. Curvas de viscosidad generadas con la geometría C25 para el fluido LAPE 003.

De las figuras generadas con la geometría C25, se puede decir que tiene valores muy similares a los generados con la geometría C30, esto confirma el hecho de que las mediciones realizadas no dependen de la geometría con la que se hicieron las lecturas, esto es una poderosa herramienta para verificar datos, pues con un viscosímetro de una sola geometría no habría manera de saber si los datos son los correctos.

Lo mencionado anteriormente, se puede confirmar generando las curvas de caracterización del fluido.

Caracterizacion de temperatura a 39.2 1/seg

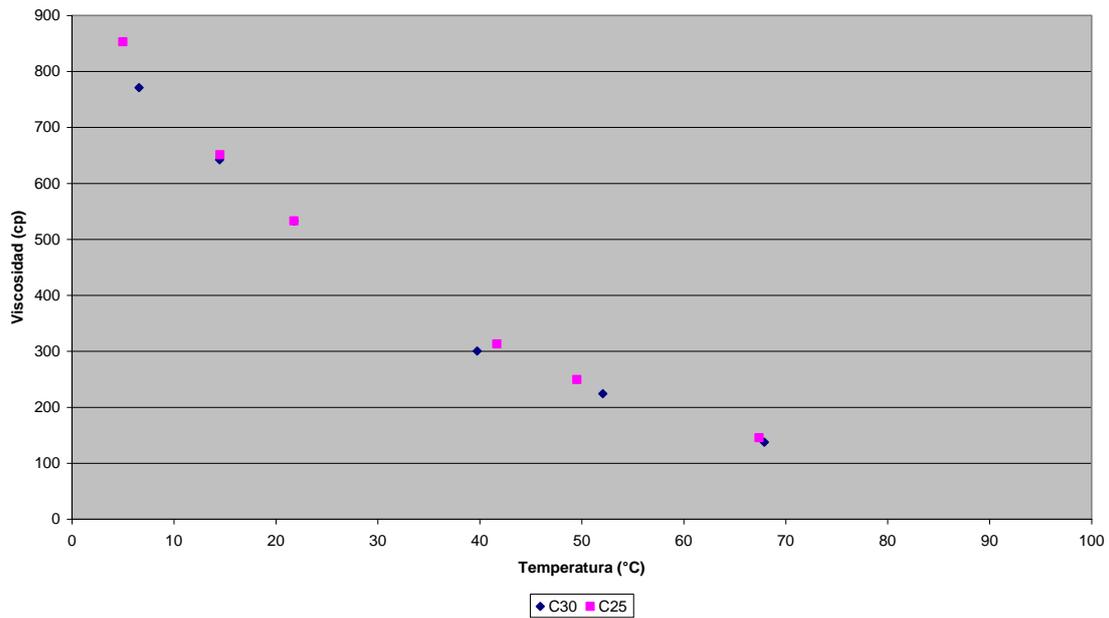


Figura 142. Caracterización de viscosidad a diferentes temperaturas a una tasa de corte de 39.2 1/seg para el fluido LAPE 003.

Caracterizacion de temperatura a 327 1/seg

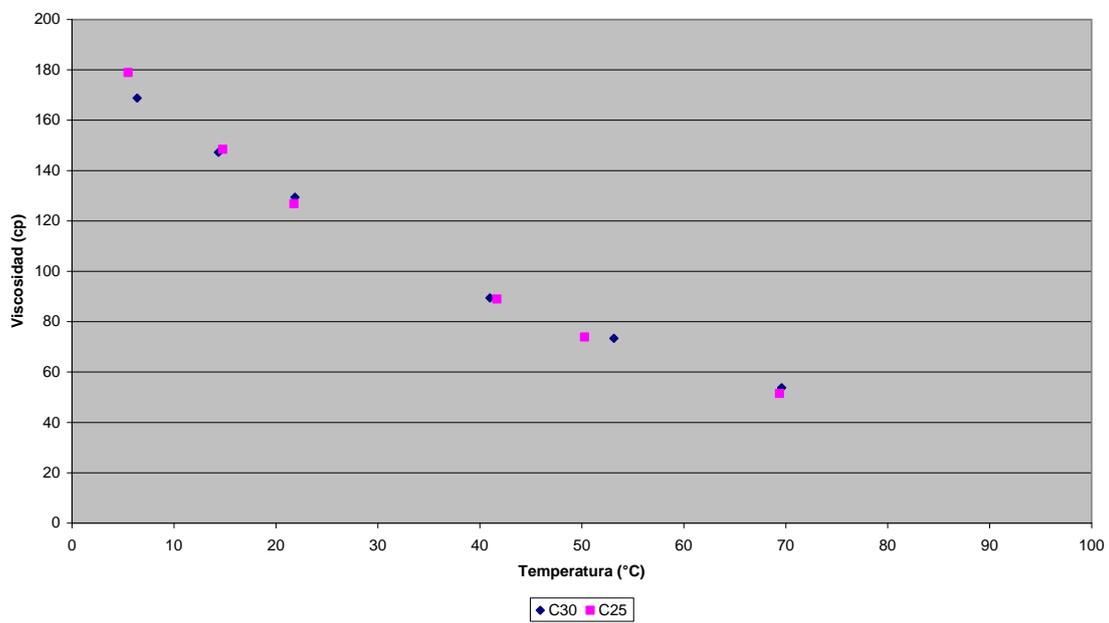


Figura 143. Caracterización de viscosidad a diferentes temperaturas a una tasa de corte de 327 1/seg para el fluido LAPE 003.

De las dos figuras anteriores, se puede decir que se obtiene un muy buen ajuste entre las geometrías C30 y C25 para fluidos de alta viscosidad, con respecto al fluido se observa una gran variación de la viscosidad a diferentes temperaturas lo cual puede ser una ventaja en zonas de baja temperatura, pues si se desea se pueden obtener elevadas viscosidades sin ningún problema, luego, la utilidad de usar curvas de caracterización del fluido es muy importante al momento de escoger el fluido y las propiedades deseadas, además que se torna evidente que para los fluidos de fracturamiento es mas recomendable usar las geometrías C25 y C30 pues las lecturas realizadas son confiables y no hay problemas con los rangos de valores que estas dos geometrías pueden llegar a adquirir.

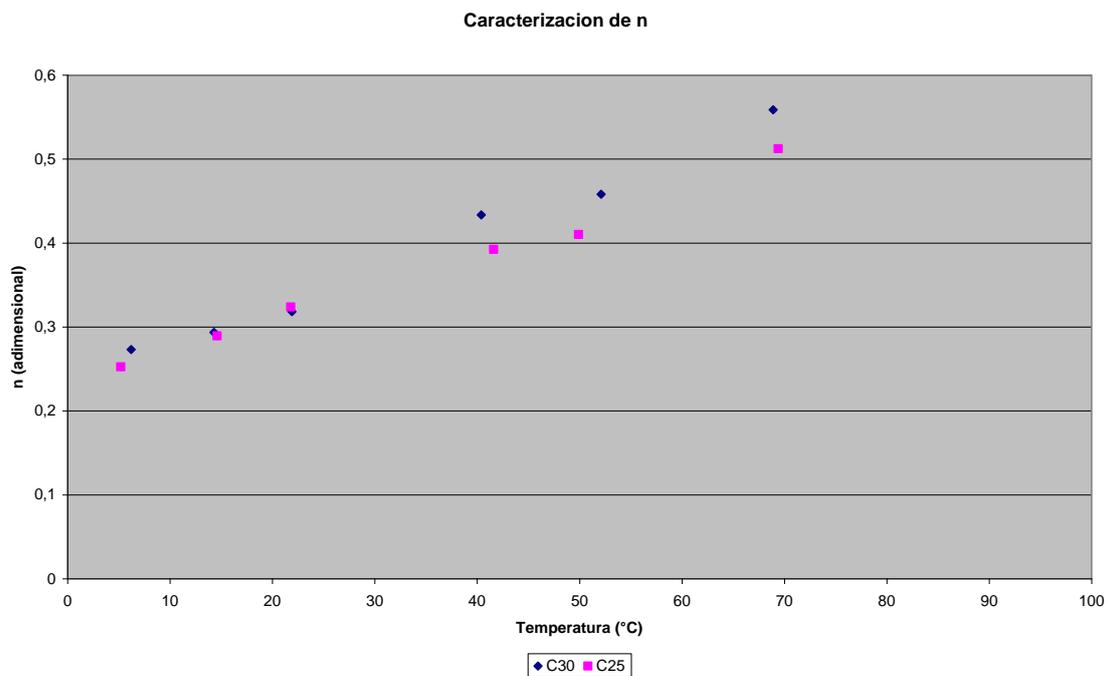


Figura 144. Caracterización de n a diferentes temperaturas para el fluido LAPE 003.

Caracterizacion de k

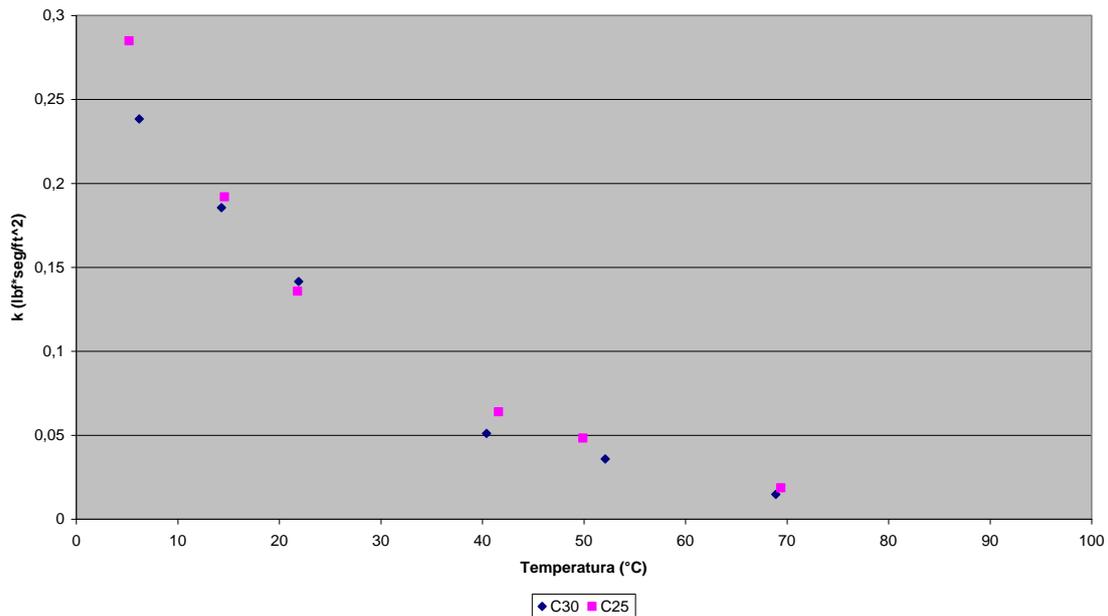


Figura. 145. Caracterización de de k a diferentes temperaturas para el fluido LAPE 003.

Al observar las curvas de caracterización de n y k para este fluido, se puede observar una diferencia entre este y los demás, y la diferencia radica en una evidente tendencia de n a aumentar conforme aumenta la temperatura, esto indica que la tendencia del fluido es a comportarse como newtoniano a elevadas temperaturas, pues los fluidos newtonianos tienen valor de $n = 1$ y como se ve en las graficas para una temperatura aproximada de 70°C el valor de n oscila entre 0.51 y 0.55 para ambas geometrías, esto explica porque en las figuras 139 y 141 la variación de la viscosidad con respecto a la rata de corte a la mayor temperatura es menor si se compara con las otras curvas de temperatura. Si se comparan los valores de n y de k obtenidos por las diferentes geometrías, se puede ver un buen ajuste de k, mientras que n presenta un buen ajuste a las temperaturas bajas, pero conforme aumenta la temperatura las diferencias se van haciendo evidentes, sin embargo la tendencia en ambas se mantiene. Esta diferencia de valores de n a elevadas temperaturas, puede ser debido a que las curvas de temperatura para cada geometría presentaron pequeños desajustes puntuales de lecturas mediante

las pruebas, y al caracterizar las curvas de temperatura mediante ecuaciones se nota con mayor detalle este pequeño inconveniente.

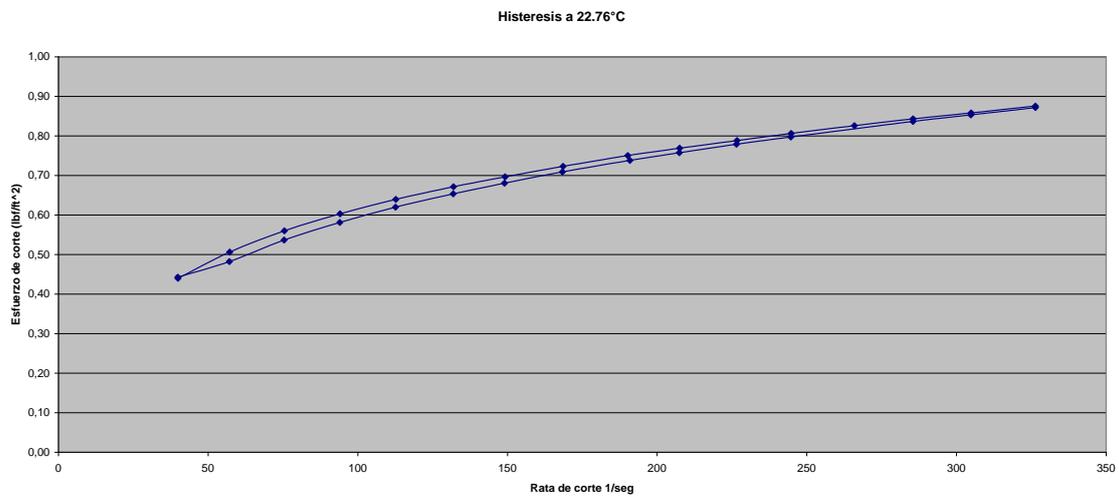


Figura 146. Curva de histéresis a 22.78°C mediante la geometría C30 para el fluido LAPE 003

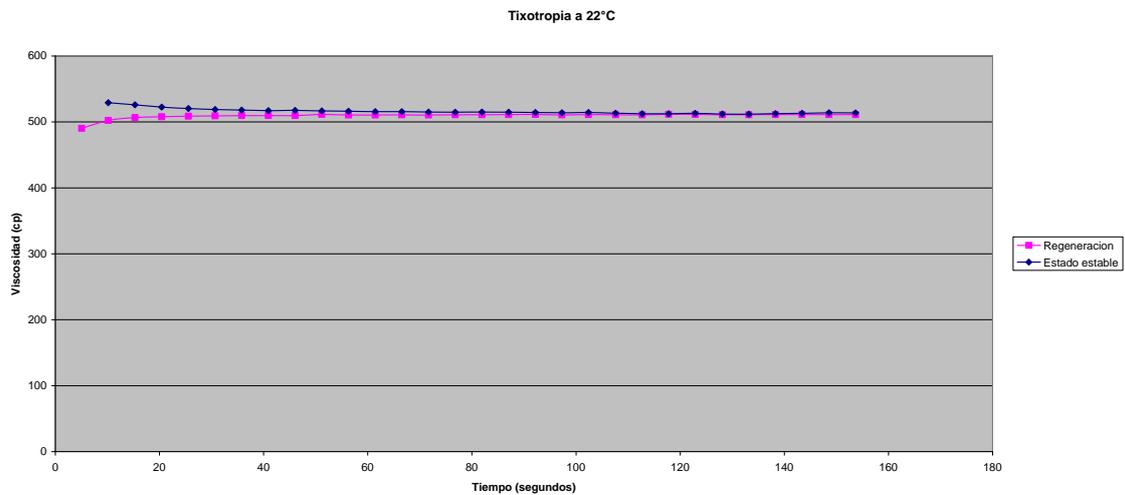


Figura 147. Curva de tixotropía a 22°C mediante la geometría C30 para el fluido LAPE 003.

De la curva de histéresis en la figura 146, se puede decir que su amplitud tiene a un valor muy pequeño, despreciable para este tipo de operaciones, razón por la cual el concepto de ingeniería aplicada diría que es despreciable, pues como se nota en la figura 146 cuando la tasa de corte va aumentando el cierre de la curva se hace mas notable, mientras que a ratas de corte bajas se observa un leve aumento en la amplitud de la curva.

De la figura 147, se puede decir que el fluido es tixotrópico, debido a que la estructura molecular tiene una regeneración del 100% a tiempos muy cortos, en la figura 147 esto se muestra alrededor del segundo 70 donde ya se empieza a ver una tendencia de la curva de regeneración a mantenerse estable en un valor de 512 cp, valor que representa también la tendencia de la curva de estado estable, por ese motivo se puede afirmar que el fluido es tixotrópico y que posee una regeneración del 100%.

8.5 Fluido LAPE 004.

El fluido LAPE 004, como ya se había mencionado, fue preparado con todos los aditivos que se tienen en el laboratorio, razón por la cual se espera una viscosidad muy elevada, por esta razón se corrieron las pruebas con las geometrías C30 y C25 wg, pues como ya se vio con el fluido LAPE 002 su viscosidad no alcanzo a entrar en el rango de valores tolerables de la geometría C25 wg.

Como en los fluidos anteriores, la primera figura a analizar es la de las geometrías.

Comparacion de geometrias

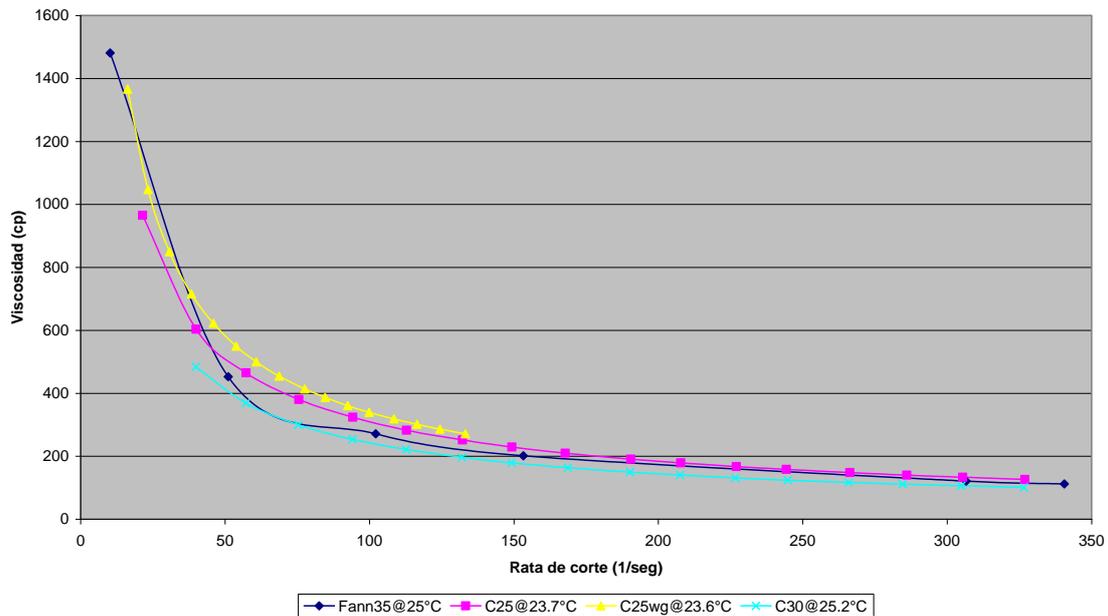


Figura 148. Comparación de viscosidades a diferentes de geometrías en el fluido LAPE 004.

Como se puede ver en la figura, no se puede tener una correlación exacta sobre las similitudes de las geometrías debido a las temperaturas a las que fueron corridas las pruebas, pues las curvas C25 y C25 wg tienen una temperatura diferente a las curvas C30 y Fann35, sin embargo comparándolas en parejas se pueden ver similitudes entre las curvas de Fann35 y C30, mientras que las curvas C25 y C25 wg difieren un poco debido al problema de la tolerancia en los valores obtenidos con el C25 wg, esto indica que esta geometría es para aun viscosidades mas extremas y con valores superiores a los 1400 cp.

Para analizar con más detalles los problemas de la tolerancia se debe graficar todas las curvas generadas por cada geometría.

CARACTERIZACION REOLOGICA DE UN FLUIDO DE FRACTURAMIENTO Y MANUAL DE OPERACIONES DEL VISCOSIMETRO VISCO 88 DEL LABORATORIO DE PRUEBAS ESPECIALES EN LA UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Curva de flujo C30

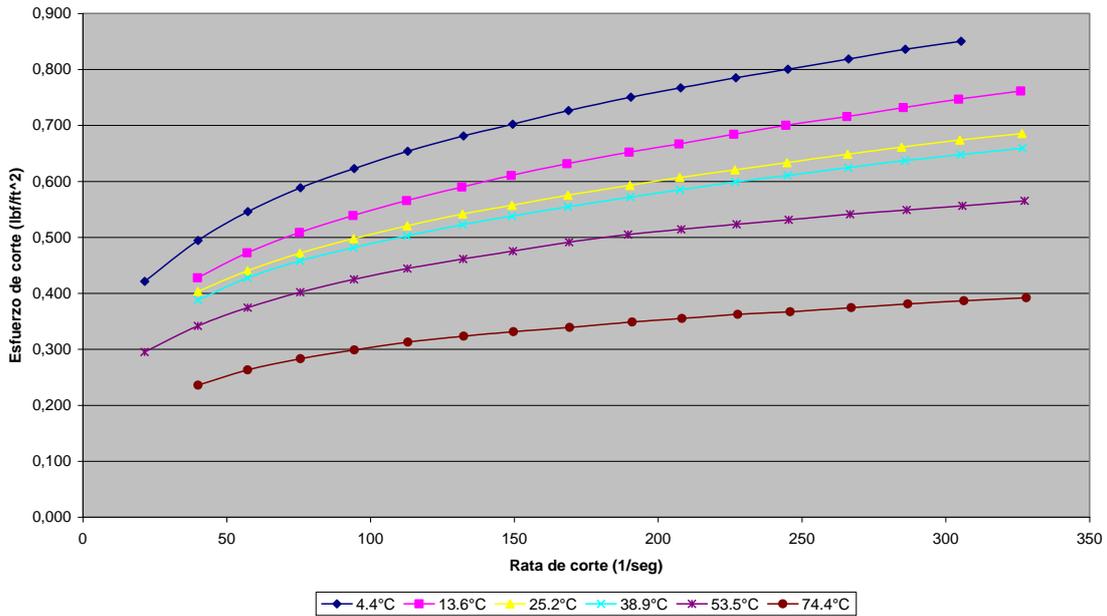


Figura 149. Curvas de flujo generadas con la geometría C30 para el fluido LAPE 004.

Curva de viscosidad C30

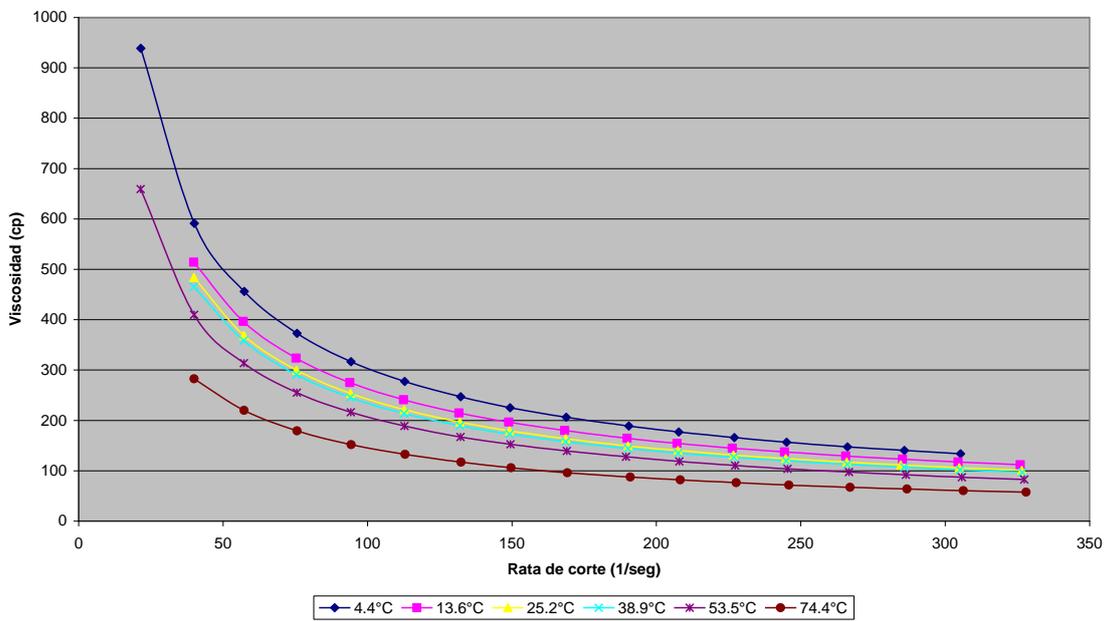


Figura 150. Curvas de viscosidad generadas con la geometría C30 para el fluido LAPE 004.

Según la figura 149 el fluido no tiene una variación elevada de esfuerzo de corte entre 25.2 y 38.9°C pues estas dos curvas no están muy separadas, mientras que el resto de curvas muestran un notorio espaciamento indicando el comportamiento del fluido a diferentes temperaturas. En la figura 150, se puede ver la misma tendencia del fluido a elevadas tasas de corte en todas las curvas, es decir que muy seguramente a tasas de corte superiores a los 350 1/seg todas las curvas de diferente temperatura deberán tener aproximadamente el mismo valor.

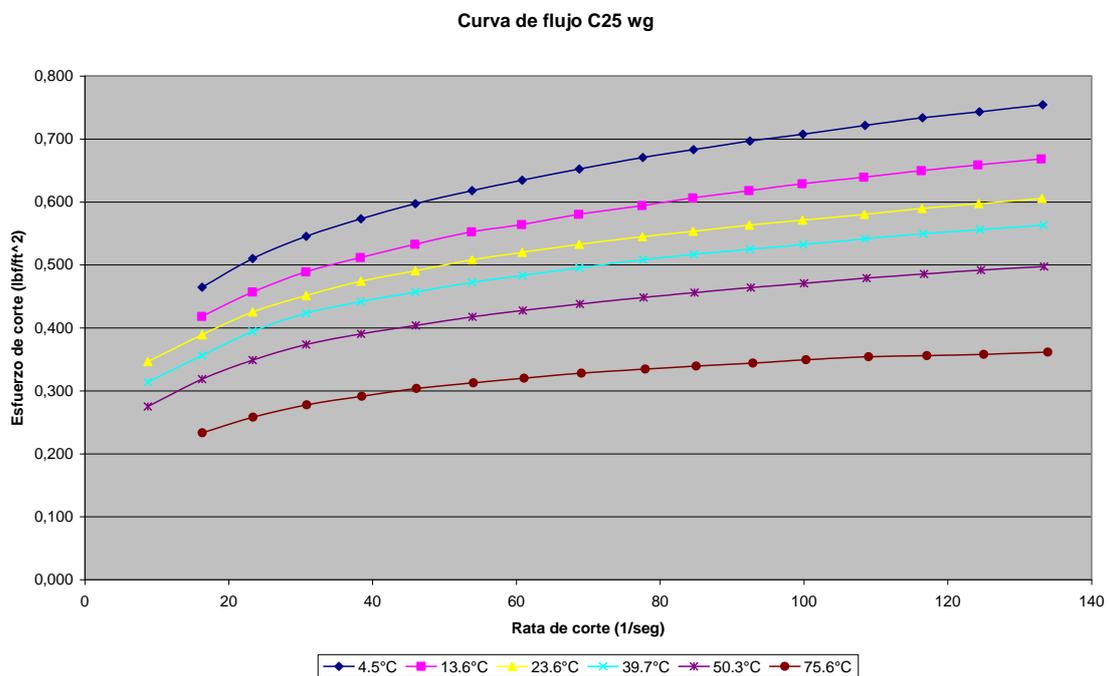


Figura 151. Curvas de flujo a diferentes temperaturas con la geometría C25 wg para el fluido LAPE 004.

Curva de viscosidad C25 wg

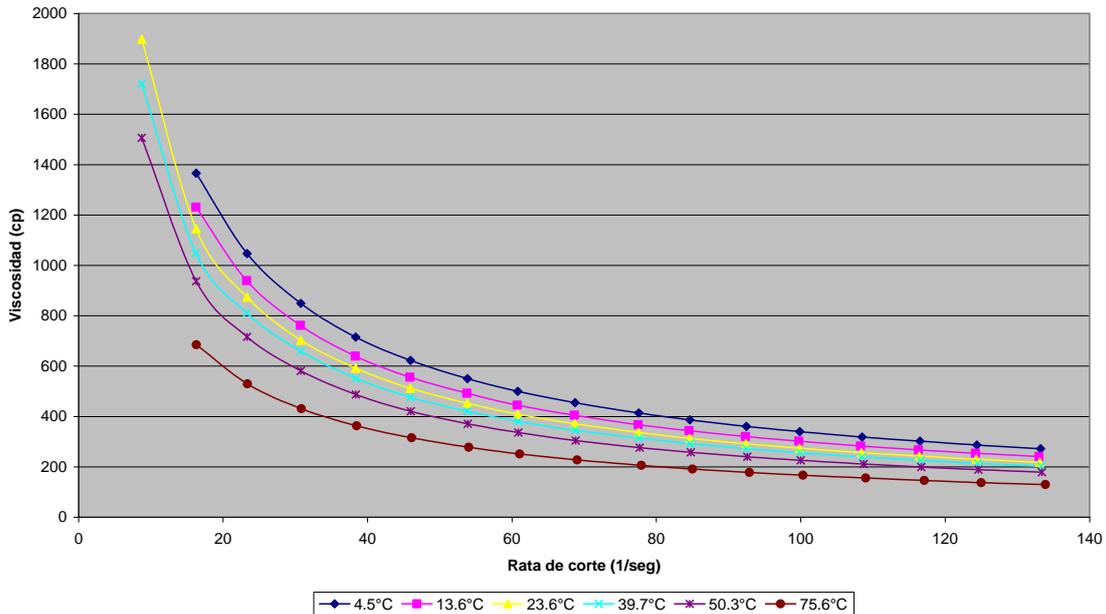


Figura 152. Curvas de viscosidad generadas a diferentes usando la geometría C25 wg para el fluido LAPE 004.

Al observar las figuras 151 y 152, es evidente que no tienen un buen ajuste con las figuras 149 y 150 cuando se esta trabajando a temperaturas grandes, esto se debe a que el limite inferior de viscosidad leída para la geometría C25 wg es una viscosidad muy elevada, y como el fluido ya ha perdido viscosidad debido al calentamiento de la estructura molecular entonces los valores leídos no superan el rango inferior de tolerancia para la geometría ocasionando lecturas erróneas y distantes de las verdaderas, sin embargo se comprobó que para temperaturas bajas el fluido presenta un muy buen ajuste con las curvas generadas por la geometría C30. Esto se nota claramente en las ratas de corte que oscilan entre 120 y 140 1/seg.

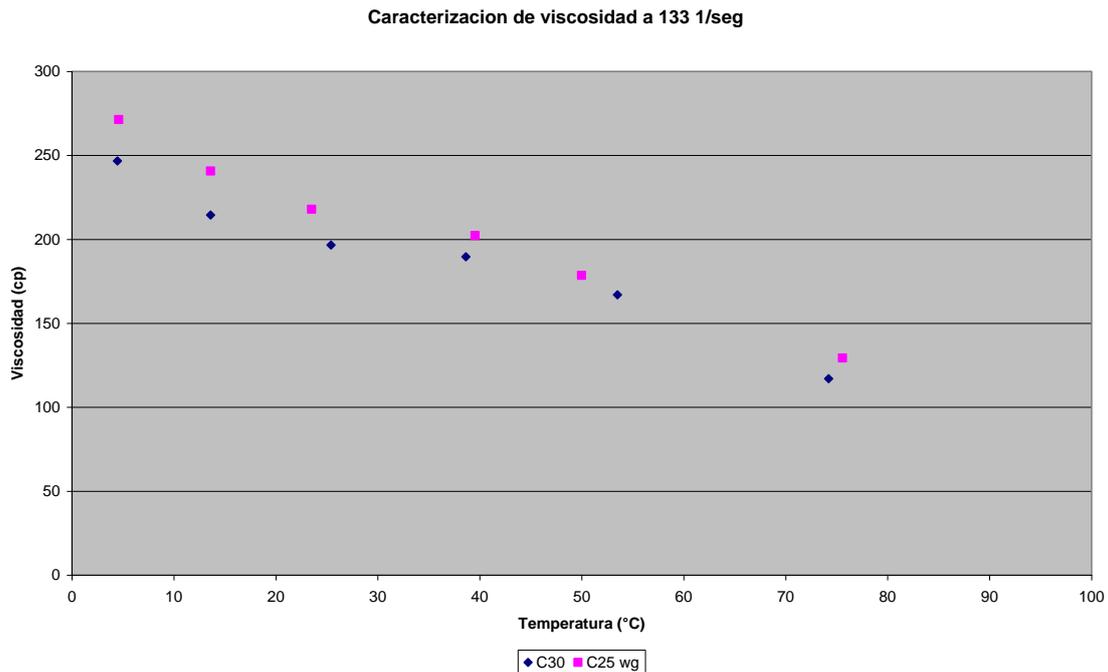


Figura 153. Caracterización de viscosidad a 133 1/seg para el fluido LAPE 004.

De la figura 153, en cuanto a la geometría C25 wg, se puede decir que no tiene un buen ajuste si se compara con la curva generada por la geometría C30, pues todos sus puntos difieren en los valores y no se observa precisión entre ambas curvas, sin embargo con respecto al fluido, se observa la tendencia de la viscosidad a reducirse a medida que aumenta la temperatura. Con esta figura queda comprobado que la geometría C25 wg no tiene un buen ajuste con los fluidos de fracturamiento, debido a que los rangos de valores leídos por esta geometría, son muy altos y sencillamente los fluidos de fracturamiento no tienen la viscosidad suficiente para generar un torque mayor a 0,5 mNm y poder entrar en la tolerancia recomendada por el fabricante del viscosímetro.

Caracterizacion de n

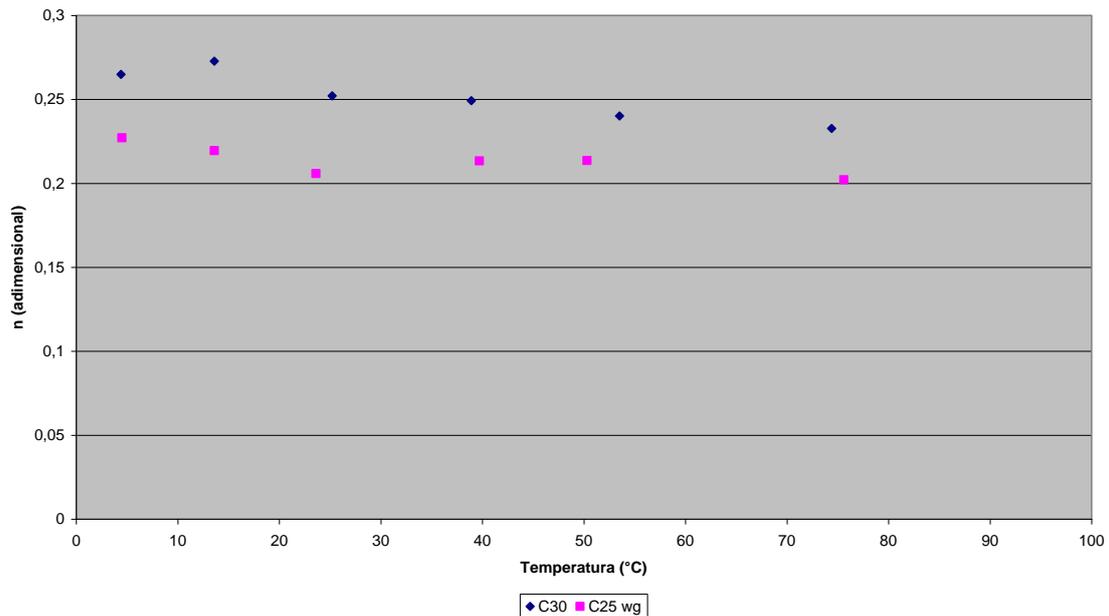


Figura 154. Caracterización de n para el fluido LAPE 004.

Caracterizacion de k

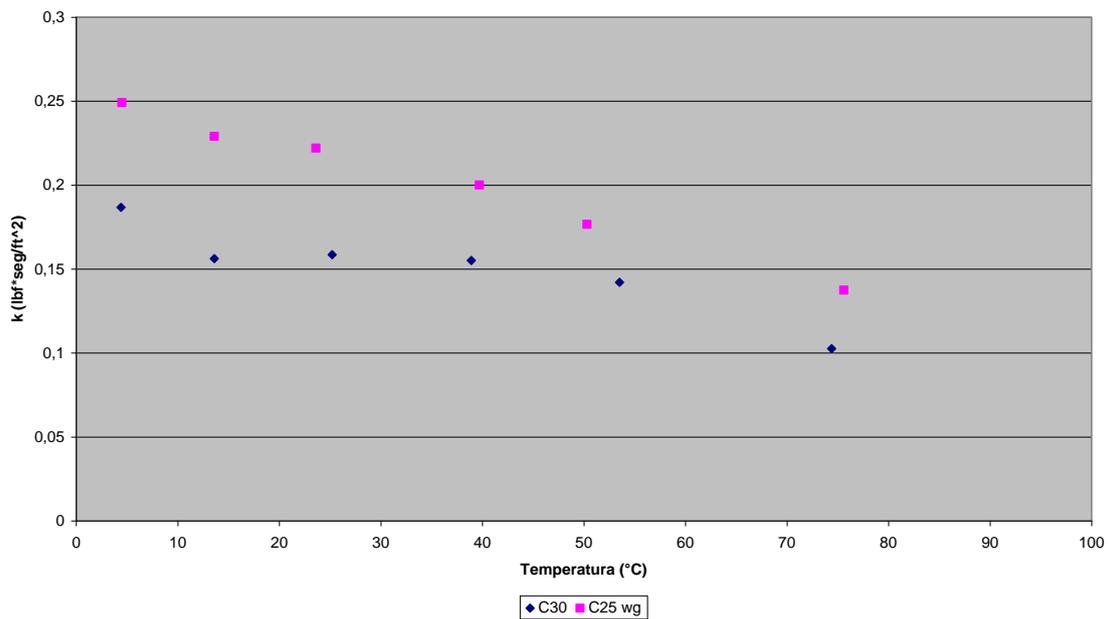


Figura 155. Caracterización de k para el fluido LAPE 004.

Mirando el comportamiento de la figura 154, se puede decir que el fluido LAPE 004, dista mucho de comportarse como un fluido newtoniano a cualquier temperatura, pues todos los valores generados por las dos geometrías usadas están por debajo de 0,3 y como ya se había mencionado antes, los fluidos

newtonianos tienen un $n = 1$. En las figuras 154 y 155, se confirma una vez más la utilidad de la geometría C25 wg, pues el ajuste entre esta geometría y la geometría C30 no es muy bueno si se compara con el ajuste obtenido entre las geometrías C25 y C30, también se puede afirmar que la geometría recomendable para trabajar los fluidos de fracturamiento es la geometría C30, pues en ninguna prueba tuvo problemas con los torques generados por las lecturas, siempre estuvieron por encima de 0,5 mNm.

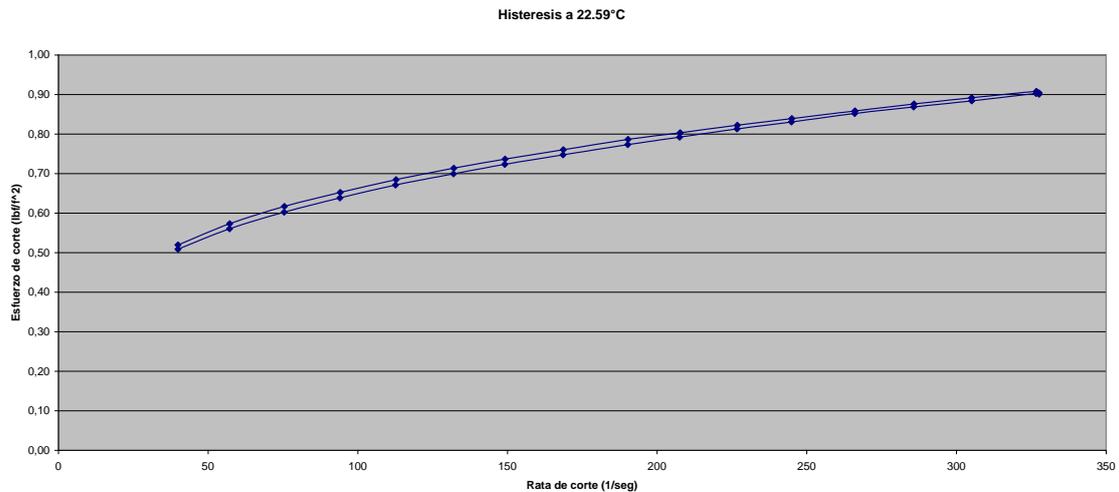


Figura 156. Histéresis a 22.59°C usando la geometría C30 en el fluido LAPE 004.

De la figura 156, se puede decir que el fluido tiene una histéresis muy pequeña, despreciable desde el punto de vista de ingeniería, pues la amplitud de la curva generada no es de tamaño considerable, también se observa que la amplitud de la curva tiene un tamaño constante durante toda la prueba, esto ayuda a decidir que la amplitud generada es despreciable y que posiblemente se generó por el difícil manejo de la temperatura durante la prueba.

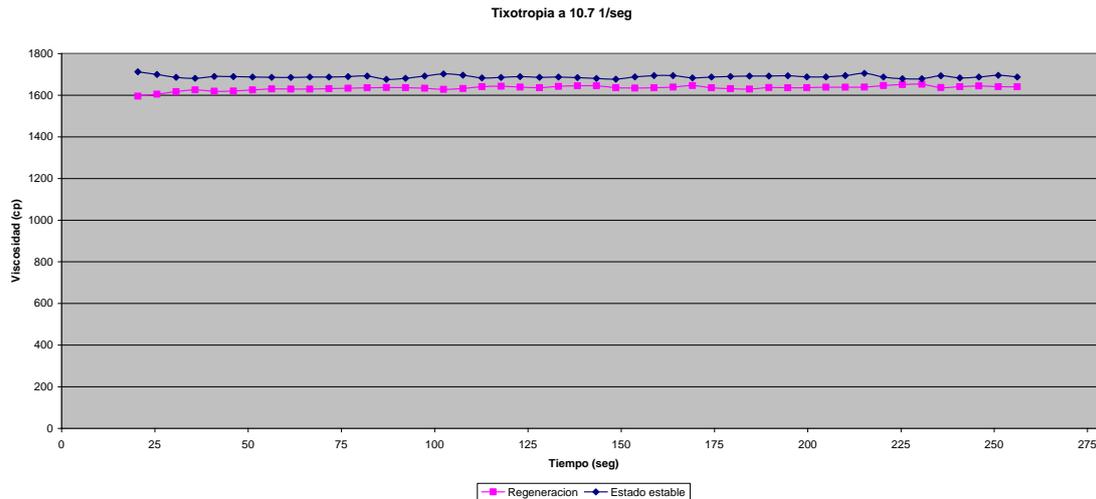


Figura 157. Tixotropía a 10.7 1/seg para el fluido LAPE 004.

De esta curva se puede observar una diferencia en cuanto a los otros 3 fluidos, y es que la curva de regeneración no alcanza el valor inicial, es decir que el fluido presenta tixotropía, si se expresa la tixotropía en términos del porcentaje de regeneración, se puede decir que la tixotropía tiene un valor del 97% a 250 seg, si se analiza bien el comportamiento de la curva de regeneración, se puede notar que a través de los 250 segundos la curva se fue levantando de un valor bajo de 1,595 cp hasta un valor de 1,640 cp a los 250 segundos, es decir que si esta tendencia se mantiene muy seguramente a un mayor tiempo de reposo se obtendría el valor original de viscosidad, es decir el valor promedio de la curva de estado estable, sin embargo esto no se puede asegurar por medio de tendencias, aunque si se puede decir que en estas operaciones de fracturamiento un 97% de porcentaje de regeneración es muy aceptable y se puede trabajar sin ningún problema con ello.

9. CONCLUSIONES

- Si es posible realizar los procedimientos requeridos por la norma API RP 39 para la determinación de propiedades reológicas en los fluidos de fracturamiento usando el viscosímetro Bohlin Visco 88.
- Para poder realizar los cálculos de la norma API RP 39 es necesario adquirir las propiedades del fluido bajo flujo turbulento y bajo flujo laminar, el viscosímetro Bohlin Visco 88 solamente determina las propiedades bajo flujo laminar, haciendo necesaria la presencia de un viscosímetro que opere bajo flujo turbulento.
- Es posible realizar curvas de caracterización de fluido, usando el viscosímetro Bohlin Visco 88 para la determinación de propiedades reológicas a diferentes condiciones de temperatura, este uso es básico para determinar las propiedades del fluido en el fondo del pozo.
- El control constante de la temperatura, es de vital importancia durante las pruebas de viscosidad, pues las variaciones de temperatura afectan de manera drástica los resultados obtenidos durante las pruebas.
- Los fluidos de fracturamiento, generalmente son del tipo pseudo plástico debido a que se necesita que el fluido bajo flujo turbulento tenga una reducción en su viscosidad y pueda ser bombeable, valor agregado a lo anterior se tiene que los fluidos de fracturamiento deben tener una gran viscosidad bajo condiciones de flujo laminar para garantizar la efectividad de la operación de fracturamiento hidráulico.

10.RECOMENDACIONES

- Gestionar la adquisición de equipos reguladores de temperatura mas precisos, junto con un sistema de bombeo de fluido de circulación mas eficaz y que no tenga perdidas al medio ambiente.
- Gestionar la adquisición de un viscosímetro de tubería o cualquier instrumento capaz de medir propiedades reológicas bajo flujo turbulento para poder determinar las propiedades que indica la norma API RP 39.
- Capacitar de manera adecuada a las personas que quieran manipular cualquiera de los equipos mencionados durante el presente proyecto de grado.
- Gestionar la adquisición de nuevas geometrías que operen bajo diferentes rangos de viscosidad usables en el viscosímetro Bohlin Visco 88.
- Desarrollar estudios para ver la viabilidad de usar el viscosímetro Bohlin Visco 88 en la determinación de propiedades reológicas en crudos y derivados.

BIBLIOGRAFÍA

Mezger, G. Thomas. The Rheology Handbook.. Vincent Veriag ,2002.

American Petroleum Institute. STANDAR PROCEDURES FOR EVALUATION OF HIDRAULYC FRACTURING FLUIDS. API RP 39, Segunda Edicion, Washington D.C. 1983.

Barnes, H. A., Hutton, I. F. Walters, K. An introduction to rheology. Elsevier Amsterdam, 1989.

Bohlin Instruments. A basic introduction to rheology. Cirencester, Great Britain, 1994.

Bohlin Instruments. Technical manual for the Bohlin Visco 88 BV. Julio, 2004.

Macosko, C. W. Rheology, principles, measurements, and applications. Wiley-VCH. New York, 1998.