

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA



“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE GELES DE
HIDROXIETILCELULOSA”

PRESENTADO POR:
Addharelys Del Valle Gil Méndez

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al Título de
INGENIERO QUÍMICO

BARCELONA, ABRIL DE 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA



“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE GELES DE
HIDROXIETILCELULOSA”

ASESORADO POR:

Prof. Shirley Marfisi (Dra.)
Asesora Académica

BARCELONA, ABRIL DE 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA



“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE GELES DE
HIDROXIETILCELULOSA”

Ing. Quím. Shirley Marfisi (Dra.)
Asesor Académico

Ing. Quím. Yraima Salas
Jurado Principal

Ing. Quím. Alexis Cova (Msc)
Jurado Principal

BARCELONA, ABRIL DE 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajos de grado: “los trabajos son de exclusiva propiedad de la universidad de oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fins con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario”.

RESUMEN

En este trabajo se estudió el comportamiento reológico de geles de hidroxietilcelulosa, mediante el uso de dos viscosímetros. Con el viscosímetro Fann 35A se midió el esfuerzo de corte para un rango de cizallamiento de 5 a 1.022 seg^{-1} , y los parámetros reológicos punto cedente, viscosidad plástica, resistencia gel; con el viscosímetro Brookfield L-V se obtuvieron valores de viscosidad a bajo cizallamiento ($0,6$ a $13,2 \text{ seg}^{-1}$). Se prepararon geles con distintas concentraciones de polímero HEC (0,5, 0,8, 1 y 1,2 % g HEC/100 g solución) y tres concentraciones de etanol (20, 30 y 40 % v/v) para estudiar la influencia de este alcohol en el comportamiento reológico de los geles. Adicionalmente, se realizaron otros ensayos donde se evaluó el efecto de un densificante (carbonato de calcio) y de la temperatura en los geles con y sin alcohol. Los resultados demostraron que los geles sin alcohol presentaron un comportamiento reológico tipo pseudoplástico y que la adición de 40 % v/v de etanol produjo un cambio en la reología a un fluido de tipo newtoniano. La tendencia de los valores de los parámetros reológicos para los geles estudiados fue característica de un fluido pseudoplástico (punto cedente mayor que la viscosidad plástica). Un aumento de temperatura (de 27 a 50°C) produjo una disminución sustancial de la viscosidad del gel y a 50°C la tendencia fue lineal, comportándose como un fluido newtoniano. La adición del densificante carbonato de calcio incrementó el carácter pseudoplástico del gel, desarrollando altos valores de viscosidad, esfuerzo de corte y parámetros reológicos.

INDICE DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
RESUMEN.....	v
INDICE DE CONTENIDO	vi
INDICE DE TABLAS	ix
INDICE DE FIGURAS.....	xii
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN	15
1.1 Planteamiento del problema	15
1.2 Objetivos	17
CAPÍTULO II	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Antecedentes	18
2.2 Hidroxietilcelulosa (hec).....	20
2.2.1 Propiedades Físicas y Químicas de la Hidroxietilcelulosa	21
2.3 Viscosidad	22
2.3.1 Ley de Ostwald -de Waele o Ley de la Potencia	25
2.3.1.1 Fluidos newtonianos	25
2.3.1.2 Fluidos no newtonianos	27
2.3.2 Perfiles de Viscosidad de la Goma Xántica y del Polímero HEC respecto a un Fluido Newtoniano.....	30
2.4 Geles.....	32
2.4.1 Estabilidad de Geles	34
2.5 Reometría	35
2.6 Reología.....	37
2.6.1 Parámetros reológicos.....	39
CAPÍTULO III.....	42

METODOLOGÍA	42
3.1 Determinación del protocolo de formulación y la velocidad de agitación necesaria para formar los geles.....	42
3.2 Formulación de geles variando la concentración de hidroxietilcelulosa, porcentaje de agua y de alcohol.....	43
3.3 Medición de las propiedades reológicas de los geles formulados, mediante la variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento, la fuerza gel y el punto cedente	44
3.3.1 Adición de Sólidos al Gel con Aplicaciones a Fluidos o Lodos de Perforación	47
3.4 Análisis de la influencia de la temperatura en la variación de las propiedades reológicas de los geles formulados.....	48
3.5 Equipos, materiales y sustancias	49
3.6 Tabla de datos.....	50
3.7 Muestra de cálculos	65
3.7.1 Cálculo del esfuerzo de corte, de la tasa de cizallamiento y de la viscosidad con los datos obtenidos del viscosímetro Fann.....	65
3.7.2 Cálculo de la tasa de corte o cizallamiento con el viscosímetro Brookfield	66
3.7.3 Cálculo de propiedades reológicas	67
CAPÍTULO IV	68
DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .	68
4.1 Determinación del protocolo de formulación y la velocidad de agitación necesaria para formar los geles.....	68
4.2 Variación del porcentaje de alcohol en cada uno de los geles formulados	70
4.2.1 Efecto de un densificante en las propiedades reológicas del gel	77
4.3 Medición de las propiedades reológicas de los geles formulados.....	80
4.3.1 Efecto del densificante CaCO ₃ en los parámetros reológicos	84

4.4 Análisis de la influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de los geles de hidroxietilcelulosa formulados.....	86
4.4.1 Influencia de la temperatura en los perfiles de viscosidad de los geles.....	93
4.5 Conclusiones	94
4.6 Recomendaciones.....	95
BIBLIOGRAFÍA	96
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:.....	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades físicas y químicas (HEC). ¹¹	22
Tabla 3.1 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para los geles formulados sin alcohol, a diferentes concentraciones de hidroxietilcelulosa.....	50
Tabla 3.2 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el Gel 0,1 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.	50
Tabla 3.3 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el Gel 0,3 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.	51
Tabla 3.4 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.....	51
Tabla 3.5 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.....	52
Tabla 3.6 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.....	52
Tabla 3.7 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1,2 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.....	53
Tabla 3.8 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO ₃).....	53
Tabla 3.9 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO ₃).....	54
Tabla 3.10 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.	54
Tabla 3.11 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.	55
Tabla 3.12 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.	55

Tabla 3.13 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5%HEC con 20% de alcohol a distintas temperaturas.....	56
Tabla 3.14. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5%HEC con 30% de alcohol a distintas temperaturas.....	56
Tabla 3.15. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5% HEC con 40% de alcohol a distintas temperaturas.....	57
Tabla 3.16. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8% HEC con 20% de alcohol a distintas temperaturas.....	57
Tabla 3.17. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8% HEC con 30% de alcohol a distintas temperaturas.....	58
Tabla 3.18. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8%HEC con 40% de alcohol a distintas temperaturas.....	58
Tabla 3.19. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1% con 20% de alcohol a distintas temperaturas.....	59
Tabla 3.20. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1% HEC con 30% de alcohol a distintas temperaturas.	59
Tabla 3.21. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1% HEC con 40% de alcohol a distintas temperaturas.	60
Tabla 3.22. Lectura del dial del viscosímetro Brookfield para los geles formulados sin alcohol a diferentes concentraciones de hidroxietilcelulosa.....	60
Tabla 3.23 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 0,5% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.	61
Tabla 3.24 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 0,8% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.	61
Tabla 3.25 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 1,0% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.	62
Tabla 3.26 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 1,2% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.	62

Tabla 3.27 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,5 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO ₃).....	63
Tabla 3.28 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,8 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO ₃).....	63
Tabla 3.29 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,5 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.	64
Tabla 3.30 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,8 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.	64
Tabla 3.31 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 1,0 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura de la hidroxietilcelulosa. ⁸	21
Figura 2.2. Esquema diferencial de un fluido para definir la viscosidad. ¹²	23
Figura 2.3. Diagramas reológicos típicos de fluidos newtonianos y no newtonianos (pseudoplásticos y dilatantes) en función del esfuerzo de corte (τ) y de la viscosidad (μ) <i>versus</i> el cizallamiento o tasa de deformación (D) ¹⁴	27
Figura 2.4. Perfiles de viscosidad para goma xántica, HEC y fluido newtoniano, a 75°F. ¹⁴	31
Figura 2.5. Perfiles de viscosidad para goma xántica y HEC en agua dulce, a 24°C. ¹⁴	31
Figura 2.6. Relación entre el módulo elástico y viscoso de un fluido. ¹⁴	33
Figura 2.7. Efecto de la Temperatura sobre el comportamiento reológico de los polímeros HEC y XANVIS. ¹⁴	35
Figura 2.8. Módulo elástico de soluciones poliméricas a 80°F. ^[13]	36
Figura 2.9. Módulo elástico de soluciones poliméricas a 200°F. ¹⁴	36
Figura 2.10. Perfil reológico de un fluido pseudoplástico. ¹⁴	39
Figura 3.1 Viscosímetro FANN, modelo 35 A.	45
Figura 3.2 Viscosímetro Brookfield, modelo LV.	46
Figura 3.3 Gel con sólido densificante adicionado.	47
Figura 4.1. Variación del esfuerzo de corte en función de la tasa de corte o cizallamiento para los geles formulados a temperatura ambiente y sin adición de alcohol.	69
Figura 4.2. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Fann).	71
Figura 4.3. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).	72

Figura 4.4. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Fann).	73
Figura 4.5. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).	73
Figura 4.6. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 1%HEC con adición de alcohol (viscosímetro FANN).....	74
Figura 4.7. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 1%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).	75
Figura 4.8. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 1,2%HEC con adición de alcohol (viscosímetro FANN).....	76
Figura 4.9. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 1,2%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).	77
Figura 4.10. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición del densificante CaCO ₃ (viscosímetro FANN).....	78
Figura 4.11. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición del densificante CaCO ₃ (viscosímetro FANN).....	78
con adición del densificante CaCO ₃ (viscosímetro Brookfield).	79
Figura 4.13. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición del densificante CaCO ₃ (viscosímetro Brookfield).	80
Figura 4.14. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,5 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.....	81
Figura 4.15. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,8 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.....	82
Figura 4.16. Variación de los parámetros reológicos del gel 1 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.....	83
Figura 4.17. Variación de los parámetros reológicos del gel 1,2 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.....	84
Figura 4.18. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,5 % HEC con densificante.....	85

Figura 4.19. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,8 % HEC con densificante.....	85
Figura 4.20. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC, sin alcohol, a diferentes temperaturas.....	87
Figura 4.21. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 20 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	88
Figura 4.22. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 30 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	88
Figura 4.23. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 40% de etanol, a diferentes temperaturas.....	89
Figura 4.24. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC, sin alcohol, a diferentes temperaturas.....	89
Figura 4.25. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC y 20 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	90
Figura 4.26. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC y 30 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	90
Figura 4.27. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC y 40 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	91
Figura 4.28. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 1%HEC, sin alcohol, a diferentes temperaturas.....	91
Figura 4.29. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 1%HEC y 20 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	92
Figura 4.30. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 30 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	92
Figura 4.31. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 1%HEC y 40 % de etanol, a diferentes temperaturas.....	93

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Los geles han sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas, no sólo debido al interés teórico para comprender la estructura, propiedades y mecanismos de preparación como sistemas dispersos sólido-líquido, sino también debido a sus considerables aplicaciones prácticas a nivel industrial para la fabricación de diversos productos en la industria alimentaria, agropecuaria, de fertilizantes, farmacéutica, cosmética, papelera y en la industria petrolera.

Muchas sustancias pueden formar geles cuando se añade un agente gelificante. Esto suele ser utilizado en la manufactura de productos, desde comida a pinturas, pasando por adhesivos. Su uso en medicina, está muy difundido. Tras su aplicación, desaparecen rápida y completamente, lo que les otorga un aspecto cosmético excelente. En dermatología se usan ampliamente, sobre todo en zonas pilosas como el cuero cabelludo, o estrechas y de difícil acceso como el conducto auditivo externo o las fosas nasales, en donde la aplicación de productos más grasos hace muy difícil su posterior limpieza. Tienen la ventaja de que admiten la incorporación de numerosos principios activos, bien sea través de la fase orgánica o acuosa.¹⁴

Para estudiar el comportamiento de los geles es de gran utilidad la reología, ciencia que estudia la deformación y flujo de materiales. A pesar de la importancia de esta ciencia en casi todas las actividades del hombre, relativamente poca investigación o desarrollo de la teoría se llevó a cabo hasta principios del siglo XX. En realidad, la reología como ciencia aún está dando los primeros pasos en cuanto a

la predicción acertada del comportamiento de sistemas reales. La reología ha sido muy importante y lo seguirá siendo para el desarrollo de múltiples industrias, como por ejemplo la industria farmacéutica y alimentaria, así que es de relevancia un estudio minucioso de ésta.

La hidroxietilcelulosa (HEC) es un polímero no iónico, con un gran rango de utilidades que van desde la industria de alimentos hasta la industria petrolera, entre sus usos se destacan como agente espesante y suspendente, estabilizante para la polimerización de pinturas vinílicas, retardador de la evaporación de agua en cementos y concretos, ligante en cerámicas y cristal, entre otros.¹¹

El uso del polímero HEC en la industria petrolera está relacionado con la selección y diseño de fluidos de perforación para reducir las pérdidas de presión por fricción, para limpieza y suspensión de sólidos, para transmitir energía, disminuir la erosión del pozo durante la perforación y mejorar la estabilidad de un fluido homogéneo.

A pesar de ser muy utilizado es poca la información existente sobre el comportamiento de este polímero ya que generalmente se encuentra en sistemas que contienen otros aditivos. Para realizar una caracterización de sus propiedades es de utilidad la evaluación reológica y descripción de parámetros como la viscosidad aparente, el punto cedente, y la fuerza gel usando reómetros. La evaluación reológica puede ser deseada en cualquiera de los casos siguientes: cálculo de los requerimientos de energía de un proceso de transporte, control de algún proceso, control de calidad, desarrollo de nuevos productos e investigación científica.

Con el propósito de contribuir al avance y desarrollo de la ciencia en cuanto a reología de geles se trata, en el presente estudio se determinarán los parámetros reológicos de dicho fluido que permitan caracterizar y determinar las propiedades del

gel formado, debido a que es poca la información y las investigaciones existentes sobre su estructura, formulación y propiedades.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Estudiar el comportamiento reológico de geles de hidroxietilcelulosa.

Objetivos específicos

1. Determinar el protocolo de formulación y la velocidad de agitación adecuada para la formación de geles de hidroxietilcelulosa.
2. Formular geles variando la concentración de hidroxietilcelulosa, porcentaje de agua y de alcohol.
3. Medir las propiedades reológicas de los geles.
4. Analizar la influencia de la temperatura sobre el comportamiento reológico de los geles formados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Paraqueima¹ determinó la eficiencia de las gomas xánticas e inhibidores químicos nacionales para la formulación de un fluido de perforación base agua FLO-PRO, realizó formulaciones en las que se analizaron las propiedades reológicas utilizando los viscosímetros Fann y Brookfield, evaluó la capacidad de las gomas para generar elevadas viscosidades a bajas tasas de corte. Concluyó que el sistema de goma e inhibidor nacional aporta excelentes propiedades de limpieza del pozo, suspensión y acarreo de los ripios como el sistema FLO-PRO original.

González² evaluó en forma preliminar un fluido sellante de nombre comercial *thermatek* para perforaciones naturales fracturadas. Para llevar a cabo esta investigación se procedió a formular un fluido sellante, luego a caracterizarlo y a determinar mediante pruebas de laboratorio sus principales propiedades físicas y reológicas. En relación a los parámetros reológicos concluyó que la viscosidad plástica, punto cedente, y fuerzas gel del fluido sellante disminuyen con el aumento de la temperatura; a temperaturas superiores a 125 °F el fluido invierte su comportamiento reológico y comienza a endurecerse.

Bompart³ realizó pruebas de reología a los fluidos espaciadores comerciales *Dual Spacer* y *SAM-4* a diferentes densidades y temperaturas, determinó los esfuerzos y tasas de deformación y aplicó regresión simple para generar los modelos reológicos en función de la densidad y de la temperatura para la viscosidad plástica y el punto cedente. Se encontró que el fluido *Dual Spacer* se comporta como un fluido

plástico de Bingham, el esfuerzo de corte cedente aumenta con el incremento de la densidad, la viscosidad plástica aumenta con la densidad y disminuye con un aumento de temperatura. El fluido *SAM-4* tuvo un comportamiento similar para los parámetros reológicos estudiados.

Paruta⁴ estudió la influencia de la formulación y de la fracción de fase dispersa sobre las propiedades reológicas de las emulsiones geles de tipo inverso (W/O), con el fin de determinar cómo se comportan las emulsiones geles a valores cercanos y alejados de la formulación óptima. El sistema estudiado fue agua/surfactantes no iónicos (*Span-Tween*)/dodecano y como variable de formulación el *HLB* (balance hidrofílico-lipofílico del surfactante o de la mezcla de surfactantes). La caracterización reológica fue mediante pruebas de cizallamiento oscilatorio de baja amplitud, utilizando un reómetro a esfuerzo inducido. Corroboró que al aumentar la fracción de la fase dispersa se produce el aumento del módulo elástico del esfuerzo crítico y la deformación crítica, la cual está influenciada por la formulación, y que el módulo elástico de la emulsión en función del tiempo tiene un comportamiento de tipo exponencial decreciente.

Montesi y Peña⁵ estudiaron el comportamiento viscoelástico de emulsiones de agua dispersada en una base de aceite lubricante y estabilizadas con un surfactante no iónico (*Span-80*). Realizaron pruebas de cizallamiento oscilatorio, variando la concentración de agua y utilizando emulsiones con y sin el polímero polisobutileno (PIB). El tamaño de gota de cada emulsión se determinó mediante resonancia magnética nuclear. La viscosidad de cizallamiento aumenta notablemente al variar el contenido de agua. Las propiedades viscoelásticas fueron influenciadas principalmente por el contenido de la fase dispersa y no por el contenido de PIB en el aceite, el efecto del polímero fue notario sólo en emulsiones con bajo contenido de fase interna. Las propiedades reológicas viscosidad a cizallamiento constante, tensión máxima del comportamiento viscoelástico lineal, módulo elástico G' ,

módulo viscoso G'' y los parámetros asociados tales como ángulo de fase de relajación fueron afectados principalmente por el contenido de fase dispersa y no por la presencia del polímero.

Watson y Mackley⁶ compararon las propiedades reológicas de dispersiones de resinas alquílicas en agua y de la emulsión inversa, para ello realizaron una investigación experimental sobre los efectos de la fase dispersa y el tamaño de gota en las propiedades reológicas de las emulsiones producidas. Constataron que la emulsión inversa (W/O) logró siempre una distribución de gota más pequeña que la emulsión directa (O/W). Para una determinada fracción de fase dispersa las emulsiones inversas tuvieron un menor índice de viscosidad que la emulsión directa; las diferencias observadas fueron asociadas a la presencia o no de un exceso de surfactante en la fase acuosa.

Laurencio y Delgado⁷ determinaron la influencia que ejerce la variación de temperatura sobre las propiedades reológicas de las emulsiones de petróleo pesado en agua, empleando una mezcla formada por 70% vol. de petróleo de 15° API, 29% vol. de agua y 1% vol. de tensoactivo. A partir del estudio reológico se relacionó el comportamiento de la viscosidad aparente con el gradiente de velocidad a diferentes temperaturas. Se observó que la emulsión presentó propiedades pseudoplásticas; la variación de temperatura no provocó cambios en el índice de flujo, no siendo así con la viscosidad aparente y el índice de consistencia, que disminuyeron con el aumento de la temperatura, lo que se corrobora con estudios de otros autores.

2.2 Hidroxietilcelulosa (hec)

Es un polímero no iónico derivado de la celulosa, donde sobre los grupos hidroxilos han sido adicionados grupos óxido de etileno para dar la estructura mostrada en la figura 2.1. Se caracteriza por formar geles viscosos en agua, usados

para fabricar productos dietéticos, cosméticos y detergentes. La hidroxietilcelulosa es un agente antiredeposición que "captura" la suciedad e impide que se redeponga en los tejidos de nuevo.⁸

La HEC se procesa mediante reacción de celulosa natural con una solución de soda cáustica y haciendo reaccionar al producto resultante con óxido de etileno. Las concentraciones de uso son del 1% en productos acondicionadores y champús, y del 0,2 a 2% en emulsiones. Este polímero es ampliamente empleado como viscosante en fluidos de completación, de perforación y de reacondicionamiento de pozos, preparados con salmuera o agua fresca.⁹

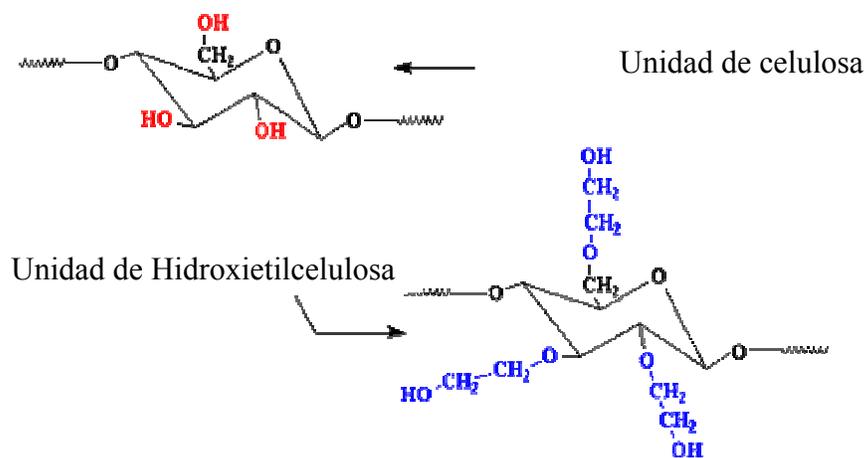


Figura 2.1. Estructura de la hidroxietilcelulosa.⁸

2.2.1 Propiedades Físicas y Químicas de la Hidroxietilcelulosa

En la industria de recubrimientos existen una serie de espesantes celulósicos, entre los cuales el más importante es la hidroxietilcelulosa. En la tabla 2.1 se muestran algunas de sus propiedades.

Para disolver la HEC en agua se procede de diferentes maneras, siempre tratando de evitar una reacción muy rápida con el agua que conduzca a la producción de granos insolubles¹⁰:

- Agregando lentamente la HEC al agua en el vórtice del cono formado del agua a baja agitación.
- Humectando la HEC en un disolvente polar miscible en agua, preferiblemente, alcohol etílico anhidro, alcoholes de cadena larga y cetonas.
- HEC y este solvente puede ser 1:1. De esta forma, se acelera el hinchamiento de la celulosa notablemente sin riesgos de grumos.
- Pre-mezclando la HEC en polvo con las demás cargas de alimentación del proceso antes de agregarlas al agua, un procedimiento difícil en una planta de producción.

Tabla 2.1. Propiedades físicas y químicas (HEC).¹¹

Apariencia	Polvo granular blanco, sin olor
Punto de fusión (°C)	Se descompone a 250 °C
Solubilidad	Soluble en agua caliente o fría, resistente a las grasas y aceites. Insoluble en disolventes orgánicos.
pH en agua	Neutro
Densidad	
(kg/m³)	656
(lb/pie²)	41

2.3 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de transporte que cuantifica la conductividad de cantidad de movimiento a través de un medio conductivo o fluido. Puede también

interpretarse como la resistencia que ofrecen los fluidos a ser deformados cuando son sometidos a un esfuerzo.¹²

La viscosidad es la propiedad que caracteriza la resistencia de un fluido a desplazarse. Se define a partir de un caso simple en el cual un fluido se ubica entre dos láminas paralelas distantes de y , como se muestra en la figura 2.2. Una de las láminas se mantiene fija, mientras que la otra se pone en movimiento (paralelamente a la primera) al aplicarse una fuerza F por unidad de área A . La relación F/A es proporcional al gradiente de velocidad V/y , y la constante de proporcionalidad es la viscosidad μ .

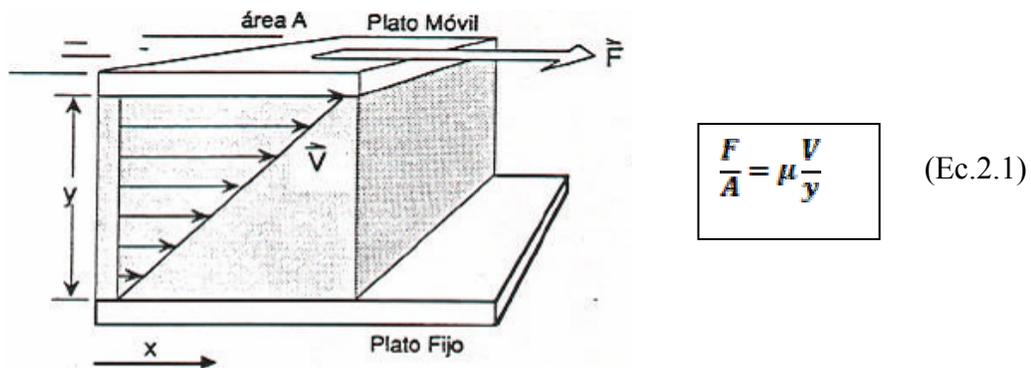


Figura 2.2. Esquema diferencial de un fluido para definir la viscosidad.¹²

En forma diferencial, esta relación se define por la ecuación 2.2, que es la Ley de Newton de la viscosidad, así:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \quad (\text{Ec.2.2})$$

Donde:

τ_{yx} : es el esfuerzo ejercido en la dirección x sobre una superficie A .

v_x : representa el componente de la velocidad en la dirección x . Su derivada respecto a y es el gradiente de velocidad llamado velocidad de deformación, o cizallamiento, expresa por la siguiente ecuación:

$$\frac{dV_x}{dy} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) \quad (\text{Ec.2.3})$$

El significado del tensor de esfuerzo τ es siempre difícil de comprender en su forma original. Se puede utilizar la ecuación (2.2) para deducir un significado más fácil de entender. En la vecindad de $y = 0$, cerca de la superficie en movimiento, el fluido adquiere una cierta cantidad de movimiento. Al desplazarse este fluido, provoca el desplazamiento de otra capa más alejada y así sucesivamente. En consecuencia la cantidad de movimiento o momentum en la dirección x se transmite en la dirección y . τ_{xy} es por lo tanto el flujo del componente "x" de la cantidad de movimiento en la dirección "y".

La relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad o tasa de corte define la viscosidad de un fluido:¹²

$$\mu = \frac{\text{esfuerzo de corte } (\tau)}{\text{velocidad de corte } (\theta)} = \frac{\text{dinas/cm}^2}{\text{seg}^{-1}} \quad (\text{Ec.2.4})$$

En unidades cgs, el esfuerzo es una fuerza por unidad de área (dina/cm) y por lo tanto la viscosidad tiene como unidad g/cm.s ó poise (en honor del científico francés Poiseuille). El agua tiene una viscosidad del orden de 0,01 poise o 1 centipoise (cP) que es la unidad más utilizada.

Para ciertas aplicaciones se define la viscosidad cinemática ν como la relación entre la viscosidad y la densidad. En unidades cgs se expresa en cm^2/seg ó Stokes; el agua tiene una viscosidad cinemática del orden de 0,01 St ó 1 centistoke (cSt).¹²

2.3.1 Ley de Ostwald -de Waele o Ley de la Potencia

Esta ley permite determinar si un fluido es o no newtoniano, la cual está descrita por la siguiente ecuación:¹⁴

$$\tau = (\mu D^{n-1})D = \mu D^n \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Para $n = 1$ corresponde a la ley de Newton y μ es la viscosidad del fluido; D es el cizallamiento o tasa de deformación. Para n diferente de la unidad, el fluido es no newtoniano de tipo pseudoplástico ($n < 1$) o dilatante ($n > 1$), como se muestra en la figura 3. El parámetro n es el índice de fluidez y μ es el índice de consistencia o viscosidad aparente en $D = 1$. Para un fluido pseudoplástico, la viscosidad aparente, es decir la relación τ/D varía con D^{n-1} y por lo tanto decrece cuando D aumenta.

Las soluciones poliméricas, las dispersiones y las emulsiones son fluidos pseudoplásticos, con índice de fluidez a menudo en el rango 0,2 – 0,6. El índice de fluidez tiende a disminuir cuando la concentración de la fase dispersada aumenta.

2.3.1.1 Fluidos newtonianos

Un fluido es cualquier sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo de corte por muy pequeño que éste sea; puede ser newtoniano o no newtoniano.¹³

Los fluidos newtonianos son aquellos que se comportan de acuerdo a la ley de Newton de la viscosidad, exhiben una relación lineal entre el esfuerzo de corte y el cizallamiento, lo cual significa que la viscosidad es constante con respecto a estas variables, figura 2.3.^[12] La ley de Newton describe bastante bien el comportamiento de líquidos homogéneos de bajo peso molecular, tales como agua, aceites orgánicos e inorgánicos y todo tipo de soluciones (electrolíticas, de ácidos y de bases), así como el comportamiento de soluciones poliméricas, emulsiones y suspensiones muy diluidas.

La viscosidad de los fluidos newtonianos es función única de la temperatura a presiones moderadas cercanas a la atmosférica. A presiones elevadas se puede producir un fuerte incremento de la viscosidad con la presión, lo cual es muy relevante en la industria petrolera y en el manejo de aceites lubricantes.

La relación entre la viscosidad y la temperatura de un líquido puede representarse de forma aproximada mediante la ecuación de Arrhenius:¹³

$$\mu = Ae^{-B/T} \quad (\text{Ec.2.5})$$

Donde T es la temperatura en escala absoluta; A, B constantes que dependen del líquido.

La ley de Newton es la relación constitutiva (o modelo matemático) más sencilla de los fluidos viscosos, puesto que una sola función material, la viscosidad, y es suficiente para caracterizar el comportamiento de un fluido newtoniano.¹³

Entre las características más relevantes de los fluidos newtonianos se pueden mencionar las siguientes:¹⁷

- Es un fluido incompresible.
- La relación punto cedente/viscosidad plástica es cero.
- La viscosidad es independiente del esfuerzo de corte y disminuye con la temperatura.
- El perfil de velocidades se asemeja a una parábola y siempre es constante.

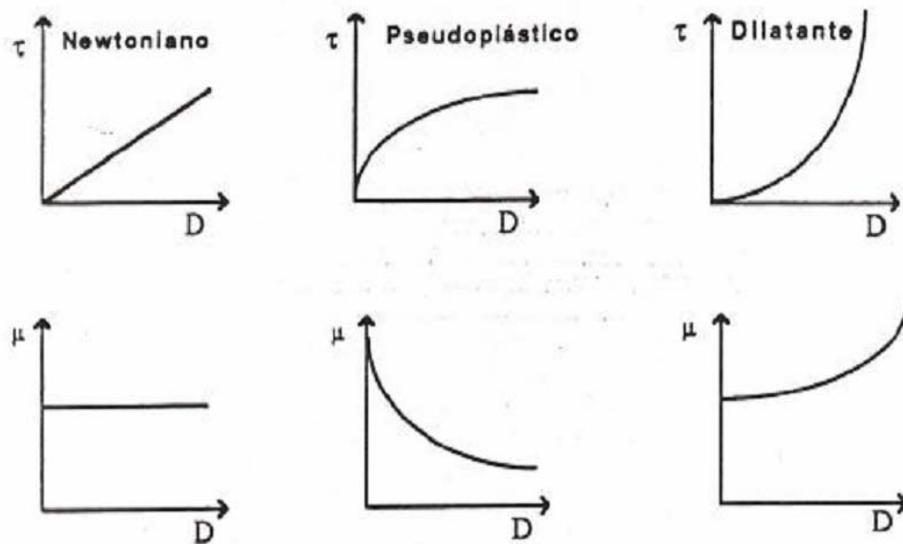


Figura 2.3. Diagramas reológicos típicos de fluidos newtonianos y no newtonianos (pseudoplásticos y dilatantes) en función del esfuerzo de corte (τ) y de la viscosidad (μ) versus el cizallamiento o tasa de deformación (D)¹⁴

2.3.1.2 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no cumplen la ecuación (2.2), es decir, cuya viscosidad varía con la temperatura y presión, pero no con la variación dV/dy . El esfuerzo cortante es función de la velocidad de deformación y tiene una

composición molecular compleja. Se clasifican de acuerdo a la ley de la potencia en.¹³

- a) **Fluidos pseudoplásticos:** La viscosidad aparente se reduce con el gradiente del esfuerzo cortante, figura 2.3.
- b) **Fluido dilatante:** La viscosidad aparente se incrementa con el gradiente del esfuerzo cortante, figura 2.3.

Los fluidos no newtonianos pueden presentar diferentes comportamientos, tales como:

- a) **Elástico:** Una diferencia notoria entre un fluido newtoniano y un sólido elástico es que los fluidos fluyen mientras se mantenga el esfuerzo, en cambio un sólido elástico responde de forma instantánea al esfuerzo y alcanza una deformación dada que se mantiene mientras se le aplique dicho esfuerzo. Algunos sólidos pueden presentar una deformación relativa que es proporcional al esfuerzo, este tipo de respuesta recibe el apelativo de Ley de Hooke, por Robert Hooke quién planteó por primera vez esta relación en el año 1678.¹³

$$\tau = G\gamma \quad (\text{Ec.2.6})$$

Donde G es el módulo de elasticidad; τ el esfuerzo (KPa); γ la deformación relativa. Si el comportamiento es viscoelástico G se denomina módulo de corte dinámico o complejo (simbolizado por G^*), el cual representa la resistencia total de una sustancia a la deformación aplicada.

En general, se verifica que los sólidos deformables siguen la Ley de Hooke sólo para valores de deformación relativamente bajos. Puede decirse que la (Ec.2.6) es la

relación constitutiva para los sólidos elásticos de Hooke, donde G es la función material que en realidad es un coeficiente constante, de forma similar a la viscosidad en fluidos newtonianos. Muchos fluidos también pueden exhibir comportamientos de sólidos elásticos si la escala de deformación es suficientemente pequeña o si la escala de tiempo o frecuencia de observación es adecuada. De igual forma, bajo ciertas condiciones de observación, un sólido puede comportarse como líquido.¹³

- b) Viscoelástico:** El fluido presenta una reología específica, es decir, se caracteriza por tener propiedades viscoelásticas: viscosos como un líquido y elásticos como un sólido. Presentan altas viscosidades a bajas tasas de corte y desarrollan altos geles instantáneos, pero de fácil ruptura; además ofrecen baja resistencia al flujo con mínima presión de bombeo y exhiben un esfuerzo verdadero de cedencia elevado que indica la transición del estado casi sólido al estado casi líquido bajo condiciones de corte mínimo.

- c) Tixotrópico:** La viscosidad aparente decrece con la duración de esfuerzo aplicado. Está presente en emulsiones, suspensiones o soluciones de macromoléculas, entre las que se establecen fuerzas de unión físicas relativamente débiles, por lo que son fáciles de destruir al aplicar un esfuerzo sobre el fluido. Con frecuencia estas moléculas son cadenas largas o con ramificaciones, y es esta morfología la que provoca que los cambios estructurales, inducidos por cambios de gradiente, necesiten de un período de tiempo para producirse lo suficientemente grande como para ser observable. Estos cambios estructurales consisten en formación o destrucción de estructura tridimensional, formación o destrucción de uniones físicas o de entrecruzamientos entre las moléculas, o simplemente cambio de orientación de las moléculas en el seno del fluido. El máximo de estructura se da cuando la orientación de las moléculas y la distribución espacial son aleatorias en las tres dimensiones del espacio, o cuando las uniones físicas

entre moléculas son máximas. El mínimo de estructura tiene lugar cuando las moléculas están formando agrupaciones más pequeñas posibles, y con un grado de orientación máximo en el sentido del flujo que ofrece una mínima resistencia a fluir. La tixotropía es una medida de la cinética con la que un material cambia de una estructura a la otra al variar el gradiente. En la práctica, se consideran tixotrópicos aquellos materiales en los que la evolución de la viscosidad con el tiempo, al cambiar el esfuerzo o el gradiente, se puede cuantificar, es decir aquellos con tixotropía significativa. Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son las pinturas, el yogur, las tintas de impresión, la salsa de tomate, algunos aceites del petróleo, el *nylon*, etc.

d) Reopéctico: La viscosidad aparente se incrementa con la duración del esfuerzo aplicado.

2.3.2 Perfiles de Viscosidad de la Goma Xántica y del Polímero HEC respecto a un Fluido Newtoniano

La figura 2.4 ilustra la región newtoniana para el polímero HEC a velocidades de corte desde 0,1 hasta 1 seg^{-1} , lo cual no es el caso para la goma xántica (Kelzan XCD) que mantiene un comportamiento acorde con la ley de potencia. Esto explica el porque la goma xántica proporciona una mejor suspensión. Se debe notar además las características de adelgazamiento del biopolímero, las cuales son superiores a las del HEC, como lo indica la viscosidad menor a velocidades de corte altas.¹⁴

Medidas de viscosidad a velocidades de corte bajas indican que fluidos como la goma xántica tienen características de suspensión superiores que las de los materiales celulósicos como la HEC. En la figura 2.5 nótese que alrededor de los 5 seg^{-1} (lectura a 3 rpm en el viscosímetro Fann) ambos fluidos tienen la misma viscosidad. Esta es

una de las desventajas de usar mediciones tradicionales de viscosidad para predecir la funcionalidad del fluido.¹⁴

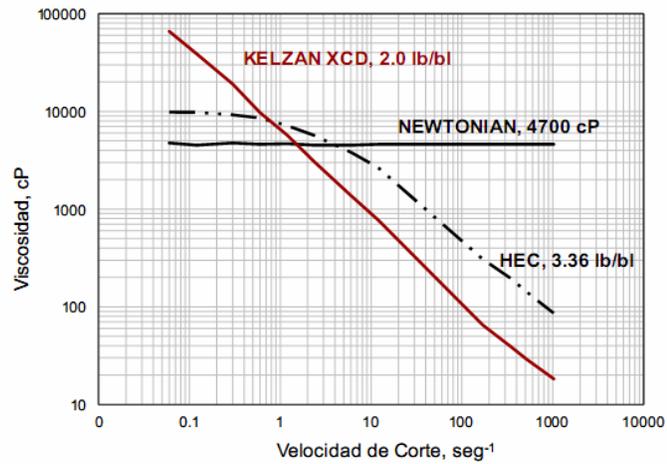


Figura 2.4. Perfiles de viscosidad para goma xántica, HEC y fluido newtoniano, a 75°F.¹⁴

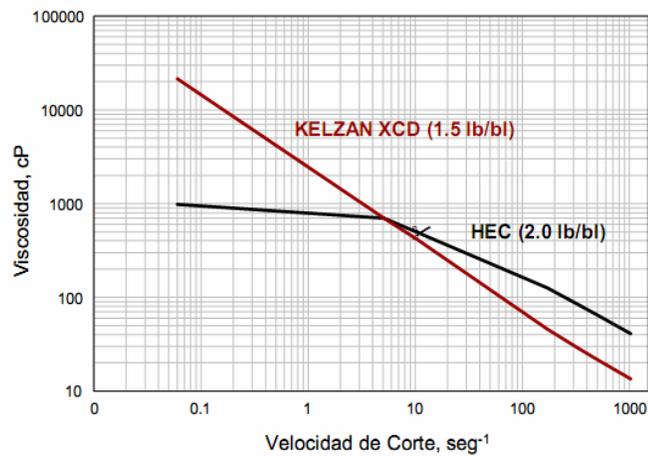


Figura 2.5. Perfiles de viscosidad para goma xántica y HEC en agua dulce, a 24°C.¹⁴

2.4 Geles

Muchas soluciones de hidrocoloides pueden formar un gel, usando diversas técnicas. En este contexto “gel” se refiere a un fluido que se vuelve semi-sólido. Un ejemplo muy común es un fluido de perforación o un fluido para fracturamiento gelificado.¹⁴

Para formar un gel, se debe crear una asociación fuerte entre los sólidos coloidales ó entre las cadenas del polímero. Esto se puede lograr de varias maneras. Una es usar una acción electromecánica muy fuerte como la que existe entre las arcillas y los iones de la sal, ó los extendedores poliméricos y/o los floculantes. Otra manera es fomentar la interacción química entre el polímero y un metal como el cromo.¹⁴

Muchas de las pruebas que se han realizado para estudiar geles implican medidas que se toman en un solo punto, como la estructura de gel, también conocida como “*gel strength*”. Tantas medidas se conocen con este nombre que el término es ambiguo, a menos que se especifique el método empleado para medirlo. Algunos métodos y equipo utilizados para este propósito incluyen el medidor de geles Bloom, Marine Colloids Gel Tester, el medidor de la FIRA, la prueba de decantación y el viscosímetro Fann. Cada uno proporciona información útil sobre geles. Sin embargo, ninguno hace posible una idea completa de la funcionalidad del concepto.¹⁴

La industria petrolera reconoció hace tiempo la existencia de geles como fluidos viscoelásticos, al medir las propiedades viscosas y la estructura de un gel. Estas propiedades consisten en las constantes del modelo de Bingham, la viscosidad plástica y el punto cedente, y las constantes de la ley de Potencia: los valores de n y de B . Tales propiedades se determinan con el viscosímetro Fann y son importantes

para tener éxito cuando se utiliza el fluido, pero son incompletas para evaluar exhaustivamente las características del rendimiento del fluido.

Una forma de cuantificar las propiedades viscoelásticas de los materiales consiste en medir su módulo elástico (G') y su módulo viscoso (G''), figura 2.6. Es conveniente considerarlos como vectores localizados a una distancia de 90° entre sí. Los vectores tienen una magnitud, la cual se indica por la longitud del vector, y una dirección.

Cuando la reología del gel se mide con un viscosímetro de deformación constante, únicamente se consigue el vector resultante del módulo viscoso y del elástico, el cual se conoce como esfuerzo cortante. Cuando éste se divide entre la velocidad de corte, se obtiene el componente viscoso, presente en la mayoría de los fluidos viscosos.¹⁴

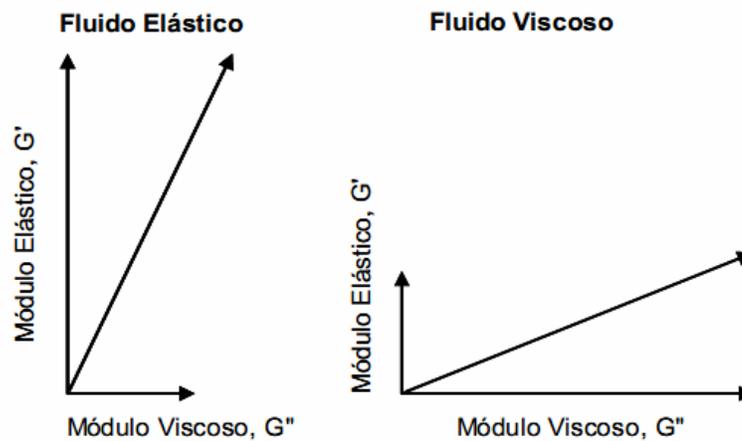


Figura 2.6. Relación entre el módulo elástico y viscoso de un fluido.¹⁴

2.4.1 Estabilidad de Geles

Las propiedades de los polímeros varían significativamente entre sí, por lo tanto, también existen estas variaciones en sus propiedades de suspensión y/o de estabilización. Los factores desencadenantes de la inestabilidad de un gel son: temperatura, pH, agitación violenta y electrolitos. Los geles con el tiempo pierden su condición y su estructura, y pueden llegar a romperse.

La estabilidad de un gel depende también de su correcta formulación. La presión ejerce poco efecto sobre la reología de los fluidos base agua, pero afecta significativamente a los lodos base aceite o petróleo. La viscosidad decrece a medida que aumenta la temperatura. La resistencia de gel es una manifestación de la dependencia del tiempo en fluidos tixotrópicos. La estructura gel sólo se desarrolla después de un período de tiempo durante el cual el lodo ha sido sometido a una velocidad de corte igual a cero.¹⁴

La temperatura puede tener un profundo impacto sobre la viscosidad a velocidad de corte baja de ciertas soluciones poliméricas. En la figura 2.7 se observa el efecto “adelgazante” que tiene la temperatura sobre el comportamiento reológico de la HEC, lo cual no sucede con el polímero XANVIS usado en fluidos de perforación, cuando se comparan las viscosidades medidas a 100 y 180°F. La solución de HEC se vuelve más newtoniana a medida que aumenta la temperatura, mientras que la de XANVIS mantiene su viscosidad a baja velocidad de corte y su comportamiento está acorde con la ley de Potencia.¹⁴

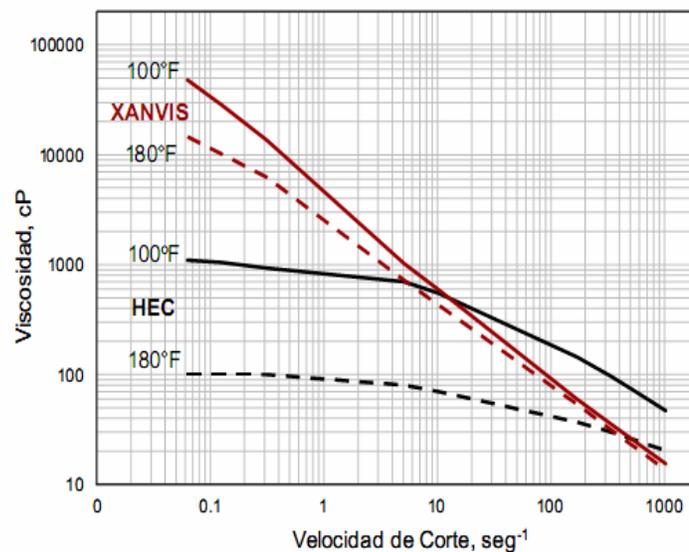


Figura 2.7. Efecto de la Temperatura sobre el comportamiento reológico de los polímeros HEC y XANVIS.¹⁴

2.5 Reometría

La reometría es una técnica experimental basada en la teoría, mediante la cual se hace la evaluación del comportamiento reológico de los fluidos. Con este fin se mide tanto el esfuerzo como la historia de deformación y con esto se pueden obtener las funciones materiales o propiedades reológicas de los fluidos sin conocimiento previo de la relación constitutiva o modelo que rige el comportamiento. Para ello el flujo debe ser reométrico, es decir, se debe conocer con precisión el campo de deformación o esfuerzo al cual se somete el fluido.¹⁵

En las figuras 2.8 y 2.9 se muestra la variación del módulo elástico con el cizallamiento o tasa de deformación para varias soluciones poliméricas, a distintas temperaturas.

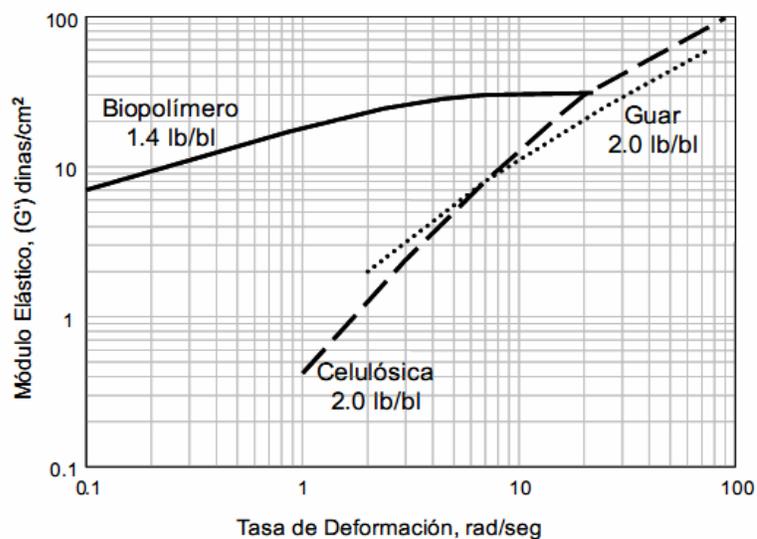


Figura 2.8. Módulo elástico de soluciones poliméricas a 80°F.^[13]

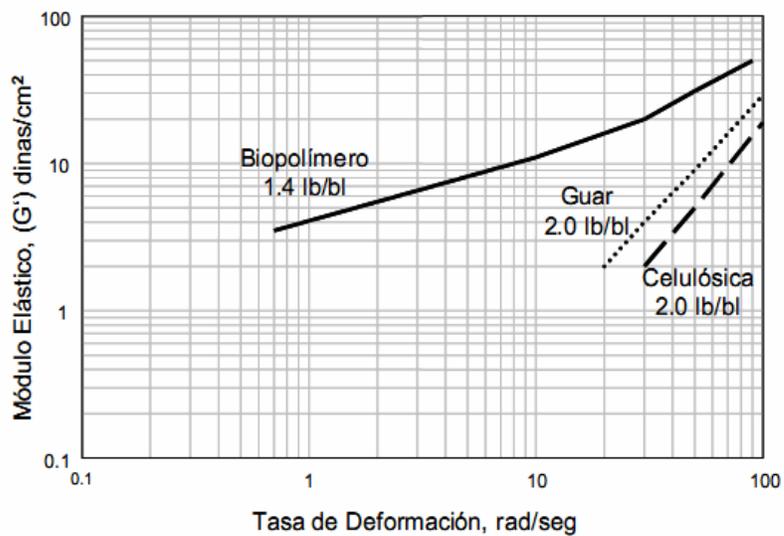


Figura 2.9. Módulo elástico de soluciones poliméricas a 200°F.¹⁴

2.6 Reología

La reología es una disciplina científica que se dedica al estudio de la deformación y flujo de la materia o, más precisamente, de los fluidos.¹³ A pesar de que la reología pudiera cubrir todo lo que tiene que ver con los comportamientos de flujo en aeronáutica, mecánica de fluidos e inclusive la mecánica de sólidos, su objetivo está restringido a la observación del comportamiento de materiales sometidos a deformaciones muy sencillas. Su estudio es esencial en muchas industrias, incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes. Entre la gama de aplicaciones de la reología están:

- Control de calidad de los alimentos. Este control se realiza en la propia línea de producción y es determinante para la aceptación de productos como patatas fritas, cereales, quesos, aperitivos, yogures, dulces, chocolates, cremas, etc.
- Estudio de la textura y consistencia de productos alimenticios. Dichas propiedades son importantes a la hora de que un producto sea del agrado del consumidor.
- Producción de pegamentos, que incluye el estudio de su plasticidad, de la forma de fluir dentro del recipiente que lo contiene, etc.
- Producción de pinturas. Debe ser esparcida de forma fácil, pero sin que escurra.
- Fabricación de productos cosméticos y de higiene corporal. La duración de una laca sobre el pelo, la distribución de la pasta de dientes por toda la boca, la forma de cómo se esparce una crema, etc.; todas estas características se estudian con la reología para obtener la mayor eficacia del producto.
- Producción de medicamentos. Se estudia su estabilidad química, tiempo de caducidad y facilidad de extrusión, entre otras.
- Caracterización de elastómeros y de polímeros tipo PVC.
- Estabilidad de emulsiones y suspensiones.

- Caracterización de gasolinas y otros tipos de hidrocarburos.
- Caracterización de metales (en situaciones de elevada temperatura), y de cristales líquidos.
- Control de sustancias que sean transportadas a lo largo de un recipiente cilíndrico (para evitar la reopexia).
- Estudio del magma en vulcanología. Cuanto más fluido sea el magma más tendencia va a tener el volcán a que provoque una erupción.

Por medio de la observación y el conocimiento del campo de deformación aplicado, el reólogo puede en muchos casos desarrollar una relación constitutiva o modelo matemático que permite obtener, en principio, funciones materiales o propiedades que caracterizan al material.¹³

El rango de interés de la reología se encuentra entre los fluidos de comportamiento newtoniano y el comportamiento elástico de Hooke. Todos los fluidos pseudoplásticos exhiben una región newtoniana inferior y otra superior, como se muestra en la figura 2.10. La velocidad de corte a la cual esto sucede es de importancia crítica. Entre estas dos regiones se puede observar la región que obedece a la ley de Potencia, la cual es representada por una línea recta en dicha gráfica.¹⁴

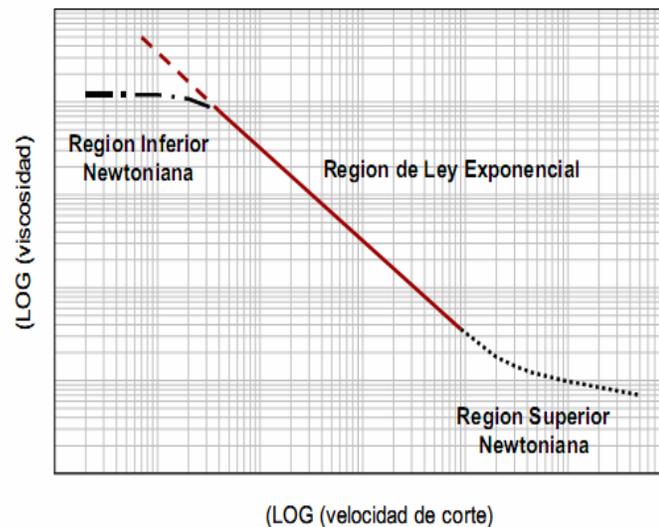


Figura 2.10. Perfil reológico de un fluido pseudoplástico.¹⁴

2.6.1 Parámetros reológicos

Las propiedades reológicas más importantes y de uso frecuente son las siguientes:¹⁵

- a) Viscosidad aparente (VA):** es la medición de viscosidad en centipoise de un fluido newtoniano con un viscosímetro rotacional, a una velocidad de corte de 600 rpm dividida entre dos, estimada por la siguiente ecuación:

$$VA(cp) = \frac{\text{lectura } 600 \text{ rpm}}{2} \quad (\text{Ec.2.7})$$

- b) Viscosidad plástica (VP):** es la resistencia interna de un fluido a fluir causada principalmente por la fricción mecánica entre las partículas suspendidas y la viscosidad de la fase fluida. La concentración de los sólidos juega un papel importante en el control de la viscosidad plástica. Una reducción de las

partículas sólidas o un cambio de forma de las mismas se reflejarán en el aumento de la viscosidad plástica. La unidad utilizada para su medición es el centipoise y se obtiene utilizando el viscosímetro rotacional Fann, tomando la lectura de 600 rpm y restándole la de 300 rpm, así:

$$VP(cp) = \text{lectura } 600rpm - \text{lectura } 300rpm \quad (\text{Ec.2.8})$$

- c) Punto cedente (PC):** es la resistencia de un fluido a fluir ocasionada por las fuerzas de atracción entre las partículas, producto de la interacción de las cargas eléctricas sobre la superficie de las partículas dispersas en la fase fluida del lodo, la cantidad de sólidos y la concentración iónica de las sales contenidas en la fase líquida del lodo. Un punto cedente alto es causado por los contaminantes solubles como el calcio, carbonato, entre otros, y por los sólidos arcillosos de formación y ocasionan la coagulación del lodo, que debe controlarse con diluentes químicos. Al igual que la viscosidad plástica, se obtiene utilizando el viscosímetro rotacional Fann y se calcula por la siguiente ecuación:

$$Pc(\text{lb}/100\text{pie}^2) = \text{lectura } 300 \text{ rpm} - VP \quad (\text{Ec.2.9})$$

- d) Fuerza gel:** es la capacidad del fluido de perforación de desarrollar una estructura de gel rígido o semirígido durante períodos de reposo, con la finalidad de suspender los sólidos indeseables cuando se está realizando un viaje de tubería. Se determina con el viscosímetro rotacional Fann. Altas resistencias de gel pueden causar grandes problemas tales como retención de aire o gas en el lodo, presiones excesivas al romper circulación después de un viaje, reducción de velocidad de sedimentación de sólidos en superficie e imposibilidad de correr registros eléctricos. La aparición de problemas en un

fluido de perforación se observa con la ocurrencia de geles progresivos o geles instantáneos. Un amplio margen entre el gel inicial (10 segundos) y el gel final (10 minutos) se denomina gel progresivo e indica acumulación de sólidos. Cuando ambos valores son elevados se está en presencia de una floculación de los sólidos del lodo.

- **Fuerza gel a 10 segundos (gel inicial):** se mide como la lectura máxima (deflexión) tomada en un viscosímetro de lectura directa después que el fluido ha estado en reposo durante 10 segundos.
- **Fuerza gel a 10 minutos (gel final):** medida como la lectura máxima (deflexión) tomada en un viscosímetro de lectura directa después que el fluido ha estado en reposo 10 minutos.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Determinación del protocolo de formulación y la velocidad de agitación necesaria para formar los geles

Para la formulación de los geles se utilizó como base 600 ml de agua destilada y el polímero hidroxietilcelulosa (HEC) sólido. Empleando una plancha de agitación magnética y un magneto se logró formar el vórtice deseado para agregar el polvo del polímero HEC, el mismo fue adicionado lentamente para evitar la formación de grumos en la preparación; ya que éstos entorpecerían las lecturas con los viscosímetros y afectarían los resultados obtenidos.

Luego de mezclar el polímero con el agua, se empleó una segunda fase de agitación para asegurar el mezclado uniforme y la formación del gel, usando un homogeneizador Ultra-Turrax T 25 y ensayando a varias velocidades de agitación, desde 8.000 a 24.000 rpm. A velocidades altas se formaba demasiada espuma, encontrando que a 8.000 rpm se podía disolver por completo el HEC y la mezcla se tornaba totalmente transparente, sin la presencia de granos insolubles. La agitación debió mantenerse de manera ininterrumpida por un tiempo prolongado de cuatro horas a una velocidad de 8.000 rpm, al detener la agitación antes de cumplirse este tiempo mínimo el polvo aún no disuelto precipitaba y gelificaba en el fondo de recipiente.

Las pruebas fueron realizadas en base a tres repeticiones para asegurar la reproducibilidad. Las concentraciones de polímero oscilaron entre 0,1 y 1,4 % m/m,

con el fin de verificar el rango en el que podían operar los viscosímetros utilizados (FANN y Brookfield) para las mediciones de los parámetros reológicos.

3.2 Formulación de geles variando la concentración de hidroxietilcelulosa, porcentaje de agua y de alcohol

Según las limitaciones de operación de los viscosímetros usados (Fann y Brookfield) y siguiendo el protocolo de formulación señalado en la sección 3.1, primero se prepararon seis muestras de geles a las cuales se le midió esfuerzo de corte y viscosidad variando el cizallamiento; cuyas concentraciones fueron 0,1- 0,3- 0,5- 0,8- 1,0- 1,2, expresadas en la unidad de concentración g de HEC/100 g de solución. El menor valor del rango estuvo limitado por el uso del viscosímetro Brookfield que opera a bajas tasas de corte y altas viscosidades; la concentración mayor de HEC fue truncada por el viscosímetro Fann debido a que permite lecturas desde bajas a alto cizallamiento.

Haciendo uso de ambos viscosímetros fue posible caracterizar otras cuatro formulaciones de geles, denominadas con la palabra “Gel” seguido por la respectiva concentración de HEC que contenían, de esta manera se tiene: Gel 0,5%HEC; Gel 0,8% HEC; Gel 1% HEC y Gel 1,2% HEC. A cada uno de los geles se le adicionó etanol para mejorar la humectación del polímero en la fase acuosa; la cantidad de alcohol varió en tres niveles (20, 30 y 40 % v/v), tomando en cuenta las concentraciones promedio utilizadas en la preparación de geles de uso médico. El porcentaje de agua utilizado depende directamente del porcentaje de alcohol adicionado, en este caso los geles formulados contenían 80,70 y 60 % v/v de agua.

3.3 Medición de las propiedades reológicas de los geles formulados, mediante la variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento, la fuerza gel y el punto cedente

Las propiedades reológicas fueron determinadas haciendo uso de dos viscosímetros para lograr un amplio rango de mediciones.

Con el viscosímetro rotacional Fann 35A, figura 3.1, se hicieron mediciones a bajas y altas tasas de corte, es decir, a velocidades de 3, 6, 100, 200, 300 y 600 rpm; así como lecturas de geles a 10 segundos y 10 minutos. Todas las lecturas se obtuvieron a una temperatura ambiente del laboratorio de 27 °C. Los datos de lectura del dial en función de la tasa de corte a las diferentes velocidades se reportan en las tablas 3.1 a 3.21 de la sección 3.6.

Con los datos obtenidos a 600 y 300 rpm se calculó la viscosidad plástica, el punto cedente y la viscosidad aparente del fluido. La lectura de gel inicial se obtuvo dejando el gel estático durante 10 segundos y luego tomando la lectura obtenida inmediatamente después de encender el viscosímetro a 3 rpm.

Para obtener el gel final se agitó la muestra por diez minutos a 600 rpm, luego se dejó en reposo durante diez minutos, pasado este tiempo el viscosímetro se encendió y se tomó la lectura máxima obtenida en el dial, inmediatamente después de poner en funcionamiento el viscosímetro a una velocidad de 6 rpm.



Figura 3.1 Viscosímetro FANN, modelo 35 A.

El viscosímetro Brookfield LV, figura 3.2, fue utilizado para medir esfuerzos de corte a bajas tasas de corte o cizallamiento. Este viscosímetro ofrece la ventaja de obtener lecturas directas de la viscosidad, desde una velocidad de 0,3 rpm hasta 100 rpm.

El equipo puede ser adaptado con 4 agujas diferentes para hacer las mediciones. Se hicieron pruebas con las agujas disponibles para verificar con cual se obtenía un mayor rango de mediciones y lecturas de mayor confiabilidad. La aguja seleccionada y utilizada para todas las mediciones fue la aguja S61.

Las lecturas estuvieron sujetas a las condiciones de trabajo del equipo, teniendo en consideración el porcentaje de torque que éste emite al hacer la lectura, el cual debe ser mayor o igual a diez.



Figura 3.2 Viscosímetro Brookfield, modelo LV.

El uso de los dos viscosímetros permitió caracterizar y describir el comportamiento del fluido a bajas y altas tasas de corte o cizallamiento. Todas las pruebas antes descritas se realizaron para cada uno de los geles preparados con distintas concentraciones de HEC, porcentaje de agua y porcentaje de alcohol. También se hicieron mediciones preliminares de geles sin alcohol. Cabe destacar que las mediciones con el viscosímetro Brookfield sólo fueron realizadas para los geles de mayor concentración de HEC, es decir, 0,5- 0,8- 1,0 y 1,2 g/100 g solución. En cambio con el viscosímetro Fann se pudieron incluir mediciones para los geles de concentración baja de 0,1 y 0,3 g HEC/100 g solución.

En las tablas 3.1 a 3.7 se reportan las lecturas del dial obtenida con el viscosímetro Fann, a diferentes velocidades de cizallamiento, para cada uno de los geles variando la concentración del polímero y del alcohol.

3.3.1 Adición de Sólidos al Gel con Aplicaciones a Fluidos o Lodos de Perforación

Adicionalmente a lo requerido en el cumplimiento de los objetivos planteados, se realizaron pruebas utilizando el Gel 0,5%HEC y añadiendo a éste un aditivo de perforación, con el fin de obtener un punto de comparación en cuanto a los valores de las propiedades reológicas, ya que éstas son medidas principalmente en este tipo de fluido. El laboratorio de perforación de la Universidad de Oriente facilitó un densificante, el carbonato de calcio, comúnmente utilizado en la preparación de fluidos de perforación. La cantidad de carbonato de calcio empleada típicamente en los lodos es de 80 g en 350 ml de agua, la cual se usó como referencia en este estudio.

Para la preparación del gel se emplearon dos cantidades de carbonato de calcio a fin de estudiar el efecto que éste sobre los geles de HEC. Las pruebas se realizaron con el gel de concentración 0,5 g/100 g. El CaCO_3 se adicionó de manera lenta a la muestra de gel y se agitó vigorosamente con un agitador de vidrio por un tiempo de 5 min, hasta dispersar el sólido en el gel, como se muestra en la figura 3.3.



Figura 3.3 Gel con sólido densificante adicionado.

En las tablas 3.8 y 3.9 se reportan los datos de la lectura del dial obtenida con el viscosímetro Fann a diferentes velocidades de cizallamiento, para los geles formulados con densificante.

3.4 Análisis de la influencia de la temperatura en la variación de las propiedades reológicas de los geles formulados

Para evaluar la influencia de la temperatura se utilizaron tres de los seis geles formulados: Geles 0,5- 0,8- 1,0 %HEC. Cada uno fue sometido a una variación de temperatura en tres niveles: 30, 40 y 50 °C; esta última se tomó como temperatura máxima de evaluación cuidando no sobrepasar el punto de ebullición del alcohol (78,45°C). Se siguió el procedimiento descrito anteriormente en la sección 3.3 para medir la reología del fluido, utilizando los viscosímetros Fann y Brookfield.

El viscosímetro Fann posee una copa térmica que permitió aumentar la temperatura y mantenerla constantes al realizar las lecturas. En cuanto al viscosímetro Brookfield, éste no posee ningún sistema de calentamiento integrado, por lo cual se utilizó una plancha de calentamiento y un termómetro para verificar la temperatura del gel al momento de realizar las mediciones.

En las tablas 3.10 a 3.21 se muestran los datos de lectura del dial medida con el viscosímetro Fann para los geles sin alcohol y variando la temperatura de 27 a 50 °C.

En las tablas 3.22 a 3.31 se reportan los datos medidos con el viscosímetro Brookfield para los geles sin y con alcohol, así como con densificante y temperatura.

Las tablas que contienen los datos de viscosidad obtenidos con el viscosímetro Brookfield para los geles con alcohol y variando la temperatura se encuentran en el anexo A.

3.5 Equipos, materiales y sustancias

Equipos

- Viscosímetro Fann, marca Baroid Testing Equipment, modelo 35 A.
- Viscosímetro Rotacional Brookfield, modelo LV
- Balanza electrónica, marca Symmetry, modelo Cole-Parmer, apreciación \pm 0.0001g
- Agitador magnético T.W.Heidolph Diax, 200- 600 rpm
- Homogenizador UltraTurrax modelo T25, velocidad de agitación 8.000 a 24.000 rpm

Materiales

- Vaso de precipitado de 50, 100, 250, 600 ml
- Soporte Universal
- Magneto
- Cilindro graduado de 100 ml
- Pizeta
- Termómetro: apreciación \pm 1 °C
- Cronómetro: apreciación \pm 0,01min

Sustancias

- Agua Destilada
- Hidroxietilcelulosa
- Alcohol Etilico

3.6 Tabla de datos

Tabla 3.1 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para los geles formulados sin alcohol, a diferentes concentraciones de hidroxietilcelulosa.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)					
	Gel 0,1	Gel 3,0	Gel 0,5	Gel 0,8	Gel 1,0	Gel 1,2
3	1	1,5	2	8	13	18
6	1,5	2,5	4	12	19	21
100	2	10	20	53	79	105
200	3	15	29	71	103	136
300	4	19	35	84	120	158
600	7	29	49	105	151	198

Tabla 3.2 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el Gel 0,1 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V (rpm)	Φ (lectura del dial)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
3	1	1	1
6	1,5	1	1
100	2	2	1
200	2,5	2	2
300	3	2	2
600	4	3	3

Tabla 3.3 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el Gel 0,3 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
3	2	1	1
6	2,5	1,5	1,5
100	8	6	5
200	12	10	10
300	17	14	13
600	26	22	21

Tabla 3.4 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
3	2	1	1
6	3	2	2
100	17	15	13
200	27	23	20
300	33	30	27
600	48	44	40

Tabla 3.5 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
3	7	5	2
6	10	8	3
100	45	43	23
200	61	60	34
300	73	72	43
600	97	94	62

Tabla 3.6 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
3	8	7	5
6	13	11	8
100	60	51	41
200	82	72	58
300	98	81	71
600	126	114	97

Tabla 3.7 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1,2 %HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
3	15	11	10
6	23	18	15
100	93	71	67
200	122	103	91
300	142	122	109
600	182	153	143

Tabla 3.8 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO₃).

V(rpm)	Φ (lectura del dial)	
	40g de CaCO ₃	100g de CaCO ₃
3	3	3
6	4	5
100	21	25
200	31	36
300	38	44
600	53	61

Tabla 3.9 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO₃).

V(rpm)	Φ (lectura del dial)	
	40 g de CaCO ₃	100 g de CaCO ₃
3	9	10
6	13	15
100	55	58
200	73	77
300	86	91
600	117	120

Tabla 3.10 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	1,5	1,5	1
6	2	2	2
100	14	11	8
200	21	17	13
300	27	22	17
600	39	33	27

Tabla 3.11 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	5	3	2
6	7	6	4
100	38	35	30
200	54	51	43
300	60	58	55
600	88	84	67

Tabla 3.12 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	11	8	7
6	17	13	9
100	78	70	49
200	101	88	76
300	119	109	90
600	150	136	113

Tabla 3.13 Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5%HEC con 20% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	2	2	1
6	3	3	2
100	16	14	10
200	24	20	15
300	32	28	21
600	45	39	30

Tabla 3.14. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5%HEC con 30% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	1	1	1
6	2	2	1
100	13	9	8
200	20	16	13
300	26	20	16
600	39	32	28

Tabla 3.15. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,5% HEC con 40% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	1	1	1
6	2	2	1
100	12	10	6
200	19	16	11
300	25	21	14
600	37	33	24

Tabla 3.16. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8% HEC con 20% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	5	3	2
6	8	6	2,5
100	41	30	21
200	60	44	35
300	70	51	43
600	95	75	61

Tabla 3.17. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8% HEC con 30% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	3	3	2
6	5	4	3
100	28	25	21
200	41	37	32
300	51	47	39
600	71	65	60

Tabla 3.18. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 0,8%HEC con 40% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	2	1	1
6	3	3	2
100	22	21	17
200	33	31	26
300	42	39	32
600	61	60	48

Tabla 3.19. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1% con 20% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	7	6	4
6	12	11	7
100	52	47	40
200	79	67	58
300	94	81	61
600	123	117	96

Tabla 3.20. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1% HEC con 30% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	6	5	3
6	11	9	6
100	53	46	32
200	73	66	47
300	87	77	57
600	117	109	80

Tabla 3.21. Lectura del dial con el viscosímetro Fann 35A para el gel 1% HEC con 40% de alcohol a distintas temperaturas.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
3	4	4	2
6	7	6	3
100	40	32	24
200	56	46	37
300	70	57	46
600	95	79	66

Tabla 3.22. Lectura del dial del viscosímetro Brookfield para los geles formulados sin alcohol a diferentes concentraciones de hidroxietilcelulosa.

V(rpm)	μ (cp)			
	Gel 0,5	Gel 0,8	Gel 1,0	Gel 1,2
0,3	212	-	-	5080
0,5	202	-	2460	5000
0,6	176	1130	2330	4990
1,0	173	1008	2250	4878
1,5	159,8	992	2168	-
2,0	157,5	981	2106	-
2,5	154,8	974	2047	-
3,0	146,8	954	1998	-
4,0	-	928	-	-
5,0	-	888	-	-
6,0	-	871	-	-

Tabla 3.23 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 0,5% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V (rpm)	μ (cp)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
6	115	111	-
10	106	95	85,2
12	101,5	94,2	85
20	97,4	92,8	84
30	95	92,9	82,4
50	92,9	88,6	80
60	91,1	87,8	79,2

Tabla 3.24 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 0,8% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V (rpm)	μ (cp)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
1,5	404	-	-
2,0	399	318	-
2,5	389	317	-
3,0	384	310	276
4,0	379	303	269
5,0	373	294	262
6,0	368	291	256
10	355,8	279	246
12	352	275	242,5
20	-	261,6	231

Tabla 3.25 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 1,0% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V (rpm)	μ (cp)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
0,6	1450	-	
1,0	1410	954	
1,5	1380	928	652
2,0	1359	915	648
2,5	1339	902	643
3,0	1316	890	636
4,0	1281	869	627
5,0	-	847	614
6,0	-	830	606
10	-	-	573,6

Tabla 3.26 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el Gel 1,2% HEC, a diferentes concentraciones de alcohol.

V (rpm)	μ (cp)		
	20% Etanol	30% Etanol	40% Etanol
0,3	2400	-	-
0,5	2320	1450	-
0,6	2290	1440	1060
1,0	2238	1436	996
1,5	2200	1430	952
2,0	2163	1419	918
2,5	2118	1402	898
3,0	-	1368	878
4,0	-	1320	849
5,0	-	-	818
6,0	-	-	780

Tabla 3.27 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,5 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO₃).

V(rpm)	μ (cp)	
	40g de CaCO ₃	100g de CaCO ₃
2,5	254	264
3,0	234	248
4,0	221	240
5,0	194	217
6,0	189	215
10	178	198,5
12	174	196,5
20	168,6	190,5
30	160,4	181

Tabla 3.28 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,8 %HEC, con diferentes concentraciones de densificante (CaCO₃).

V(rpm)	μ (cp)	
	40g de CaCO ₃	100g de CaCO ₃
0,6	1170	1320
1,0	1086	1224
1,5	1064	1196
2,0	1053	1182
2,5	1044	1169
3,0	1014	1142
3,5	984	1108
4,0	944	1064

Tabla 3.29 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,5 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
10	74,4	-	-
12	73,5	50,5	-
20	70,8	48,6	32,1
30	70	48	32
50	66,7	46,4	31,6
60	65	45,8	31,3
100	-	44,22	30,66

Tabla 3.30 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 0,8 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
1,5	472	-	-
2,0	465	-	-
2,5	454	368	-
3,0	446	352	228
4,0	439	336	217
5,0	434	325	203
6,0	426	318	200
10	411,6	307,2	194,4
12	405,5	301,5	186,5
20	-	286,8	180,9
30	-	-	175,4

Tabla 3.31 Lectura del dial con el viscosímetro Brookfield para el gel 1,0 %HEC, a diferentes temperaturas y sin alcohol.

V(rpm)	Φ (lectura del dial)		
	30 °C	40 °C	50 °C
0,5	2020	-	-
0,6	1930	1310	-
1,0	1920	1188	-
1,5	1860	1160	640
2,0	1827	1125	600
2,5	1788	1102	586
3,0	1752	1082	566
4,0	-	1052	546
5,0	-	1031	523
6,0	-	-	514
10	-	-	487,8
12	-	-	476,3

3.7 Muestra de cálculos

3.7.1 Cálculo del esfuerzo de corte, de la tasa de cizallamiento y de la viscosidad con los datos obtenidos del viscosímetro Fann

Se utilizaron dos ecuaciones para moderadas y altas tasas de corte, suministradas por el manual del equipo, las cuales son:

$$\tau \text{ (Dinas/cm}^2\text{)} = 5,007 \times \Phi \quad (\text{Ec.3.1})$$

$$\theta \text{ (seg}^{-1}\text{)} = 1,704 \times V(\text{rpm}) \quad (\text{Ec.3.2})$$

Los valores sustituidos en estas ecuaciones son los referidos en las tablas 3.1 a 3.3. Por ejemplo, utilizando la ecuación 3.1 y sustituyendo los datos de la tabla 3.1 para el gel de concentración 0,5% HEC resulta un esfuerzo de corte de:

$$\tau = 5,007 \times 3 = 15,231 \text{ dinas/cm}^2$$

Luego, usando la ecuación 3.2 y sustituyendo los datos de la tabla 3.1 resulta que para una velocidad de 3 rpm, la tasa de corte es:

$$\theta = 1,704 \times 3 = 5,112 \text{ seg}^{-1}$$

3.7.2 Cálculo de la tasa de corte o cizallamiento con el viscosímetro Brookfield

La aguja utilizada en todas las pruebas de laboratorio fue la S61. La geometría de la aguja usada permitió calcular el cizallamiento mediante la ecuación 3.3, referida en el manual de uso del equipo.

$$\theta \text{ (seg}^{-1}\text{)} = 0,220 \times \text{RPM} \quad (\text{Ec.3.3})$$

Por ejemplo, usando los datos de la tabla 3.22 se determina el cizallamiento para una velocidad de 0,3 rpm con el gel 0,5%, así:

$$\theta \text{ (seg}^{-1}\text{)} = 0,220 \times 0,3 = 0,66$$

3.7.3 Cálculo de propiedades reológicas

- **Viscosidad aparente**

Según la ecuación 2.7 se tiene que la viscosidad aparente para los datos obtenidos con el gel de concentración 0,5% HEC, sin etanol, reportados en la tabla 3.1, es:

$$VA \text{ (cp)} = 49/2 = 24,5$$

De igual manera se hicieron los cálculos de viscosidad aparente para los demás geles.

- **Viscosidad plástica**

La viscosidad plástica de los geles fue estimada con la ecuación 2.8, sustituyendo los valores correspondientes al gel de 0,5%HEC reportados en la tabla 3.1, resulta:

$$VP \text{ (cp)} = 49 - 35 = 14$$

- **Punto cedente**

Según la ecuación 2.9 y la tabla 3.1 se tiene que para el gel 0,5%HEC sin etanol, el punto cedente es:

$$PC \text{ (lb/100pie}^2\text{)} = 35 - 14 = 21$$

De igual forma se realizó el cálculo para todos los geles formulados, sustituyendo en cada caso los datos presentados en las tablas 3.1 a 3.21.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Determinación del protocolo de formulación y la velocidad de agitación necesaria para formar los geles

La formulación ideal de los geles de hidroxietilcelulosa se obtuvo utilizando el agitador Ultra-Turrax T25 a una velocidad de 8.000 rpm; por ser un polímero de alto peso molecular el tiempo de agitación debe ser elevado. En las pruebas de laboratorio fue necesaria una agitación constante por un espacio de 4 horas aproximadamente. Este tiempo de agitación dependió únicamente de la concentración de HEC utilizada, ya que al aumentar ésta aumentó también el tiempo de homogenización y de gelificación.

Siguiendo este protocolo se prepararon seis geles, a los cuales se les determinó las propiedades reológicas de esfuerzo de corte en función del cizallamiento, utilizando el viscosímetro Fann en el rango de cizallamiento de 5,112 a 1.022,4 seg^{-1} , figura 4.1.

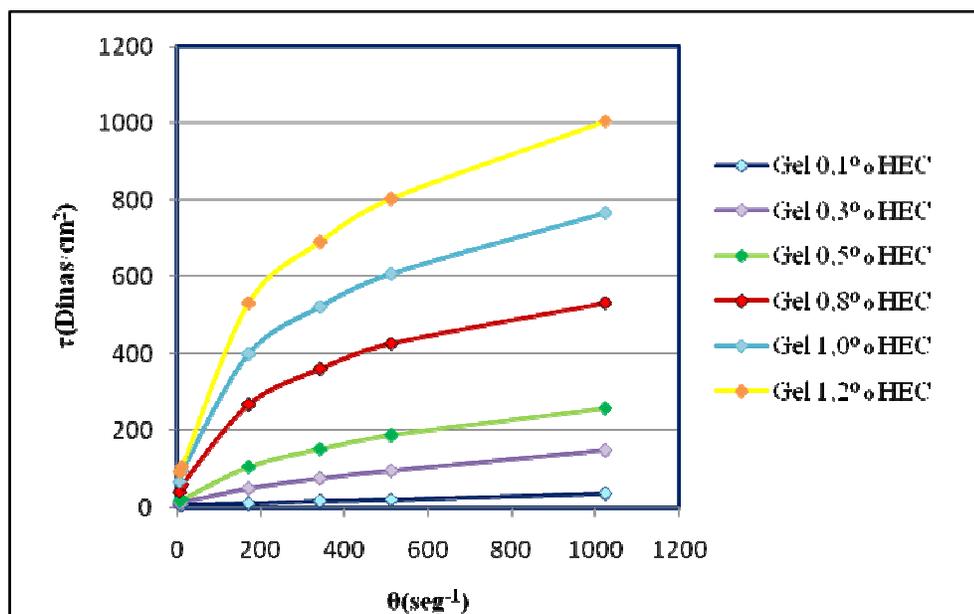


Figura 4.1. Variación del esfuerzo de corte en función de la tasa de corte o cizallamiento para los geles formulados a temperatura ambiente y sin adición de alcohol.

En la figura 4.1 se observa que a medida que aumenta la concentración del polímero HEC desde concentraciones de 0,3 a 1,2 % m/m se acentúa el comportamiento reológico tipo pseudoplástico; sólo a muy baja concentración (0,1 % m/m) es que se tiene un comportamiento newtoniano. A la concentración de 0,1 % m/m los valores de esfuerzo cortante del gel formado no sobrepasan las 100 dinas/cm², esto se debe a que la suspensión resultante tiende a comportarse según las propiedades del medio de disolución, que en este caso es el agua destilada.

El comportamiento observado en los geles de mayor concentración es típico de fluidos no newtonianos tipo pseudoplásticos, el cual depende de la velocidad de corte a la que es sometido dicho gel. En la figura 4.1 se evidencia también que a valores de cizallamiento superior de 170,4 seg⁻¹, correspondiente a 100 rpm, ocurre un cambio

en la pendiente de las curvas del esfuerzo cortante con un aumento de la velocidad de corte o cizallamiento.

Los geles más viscosos a concentraciones 0,8, 1 y 1,2 % HEC ofrecen una mayor resistencia a fluir porque los valores de esfuerzo cortante aumentan considerablemente hasta valores de 1.000 dinas/cm^2 al someterlo a un cizallamiento de $1022,4 \text{ seg}^{-1}$.

4.2 Variación del porcentaje de alcohol en cada uno de los geles formulados

La cantidad de alcohol añadida a cada muestra de gel preparada fue variada utilizando tres porcentajes distintos: 20, 30 y 40% volumen, la razón de ello obedeció a que por lo general en las formulaciones de geles suele adicionarse alcohol (aproximadamente 30 % vol.) para asegurar la completa disolución del polímero en agua. Es de destacar que concentraciones mayores a 40% de alcohol, el gel pierde sus propiedades viscosas y fue imposible realizar mediciones.

Los geles utilizados fueron a las concentraciones de 0,5, 0,8, 1 y 1,2 %HEC y en las figuras 4.2 a 4.19 se compara su comportamiento reológico respecto al sistema sin alcohol.

En la figura 4.2, para una concentración de 0,5 % m/m de polímero, se evidencia que a las concentraciones de alcohol utilizadas no se modifica el tipo de fluido al someterlo a cizallamiento desde 5 a 1.022 seg^{-1} , obteniéndose un comportamiento pseudoplástico; pero sí afecta la viscosidad aparente haciendo más fluido el gel respecto al sistema sin alcohol debido a una disminución del esfuerzo de corte con el cizallamiento. Tal efecto es progresivo a medida que aumenta la concentración de etanol en el gel, como se muestra en la figura 4.3.

No obstante, a muy bajo cizallamiento, desde 1 hasta $13,2 \text{ seg}^{-1}$, como se muestra en la figura 4.3, los alcoholes inducen a un cambio del tipo de fluido de pseudoplástico a newtoniano. La adición de alcohol conlleva a una pérdida de viscosidad en aproximadamente la mitad del valor sin alcohol, y se mantiene prácticamente constante después de un cizallamiento de $2,64$ a $13,2 \text{ seg}^{-1}$ a valores de 93, 88 y 80 cp a las tres concentraciones de alcohol, respectivamente; indicando un comportamiento newtoniano a muy baja tasa de corte para los sistemas con alcohol.

Para el gel sin alcohol la curva descrita es característica de un fluido pseudoplástico, tal como se muestra en la figura 2.3 del capítulo 2. Para este gel se mantiene el comportamiento pseudoplástico porque la viscosidad disminuye con el cizallamiento, debido a una pérdida de resistencia del fluido.

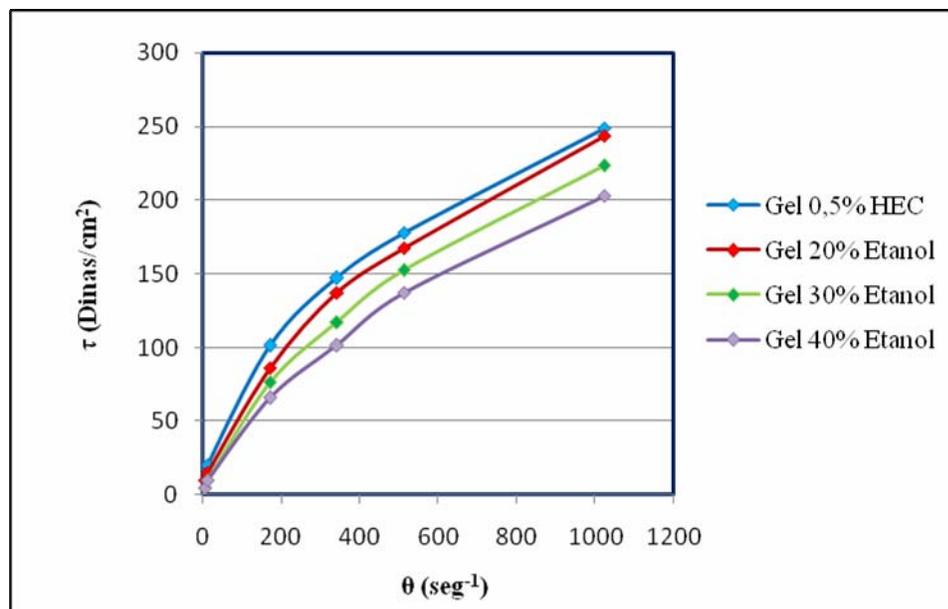


Figura 4.2. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Fann).

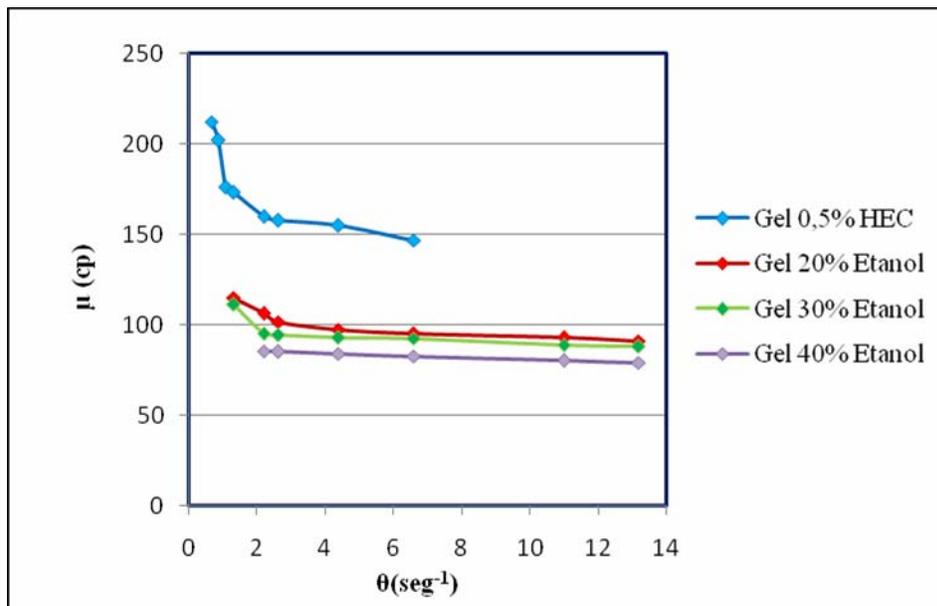


Figura 4.3. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).

Al aumentar la concentración de 0,5 a 0,8 %HEC, el gel resultante mantiene la característica de comportarse como un fluido de tipo pseudoplástico, pero con esfuerzos de corte mayores en aproximadamente un factor de dos, como se representa en la figura 4.4. Al adicionar alcohol la tendencia es a debilitar el gel, disminuyendo el esfuerzo cortante para una misma tasa de corte, con un efecto pronunciado a la concentración de alcohol de 40 % vol.

Al representar los valores de viscosidad obtenidos directamente con el viscosímetro Brookfield para el gel de concentración 0,8%HEC a bajas tasas de corte (0,22 a 4,4 seg⁻¹), figura 4.5, es evidente que dicha propiedad disminuye a medida que aumenta la tasa de corte, desde 1.008 a 871 cp. El alcohol produce una reducción drástica de aproximadamente 700 unidades en la viscosidad, manteniéndose luego constante a tasas de corte superiores a 1 seg⁻¹, indicando un cambio del tipo de fluido de pseudoplástico a newtoniano.

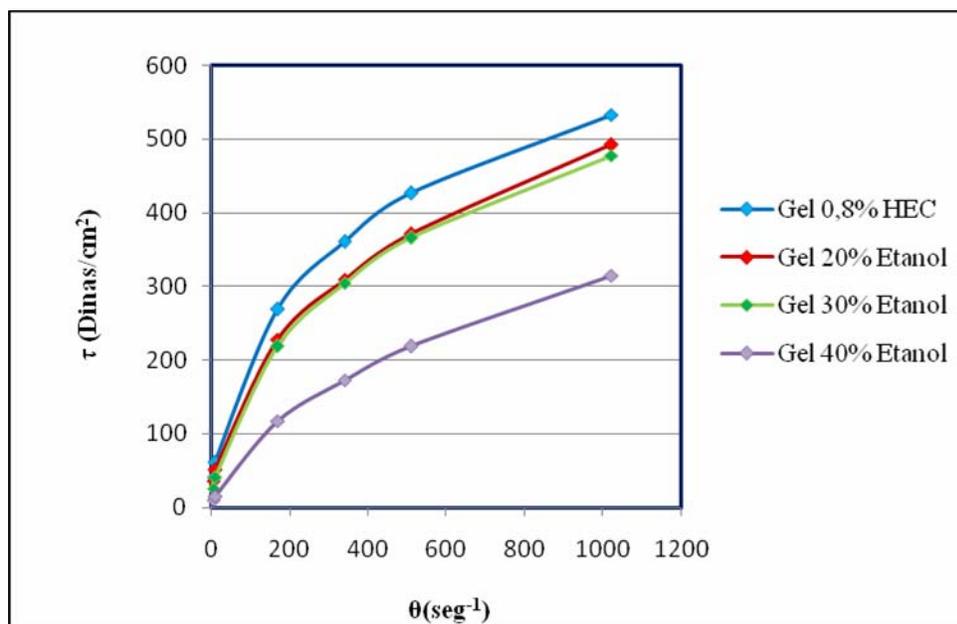


Figura 4.4. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Fann).

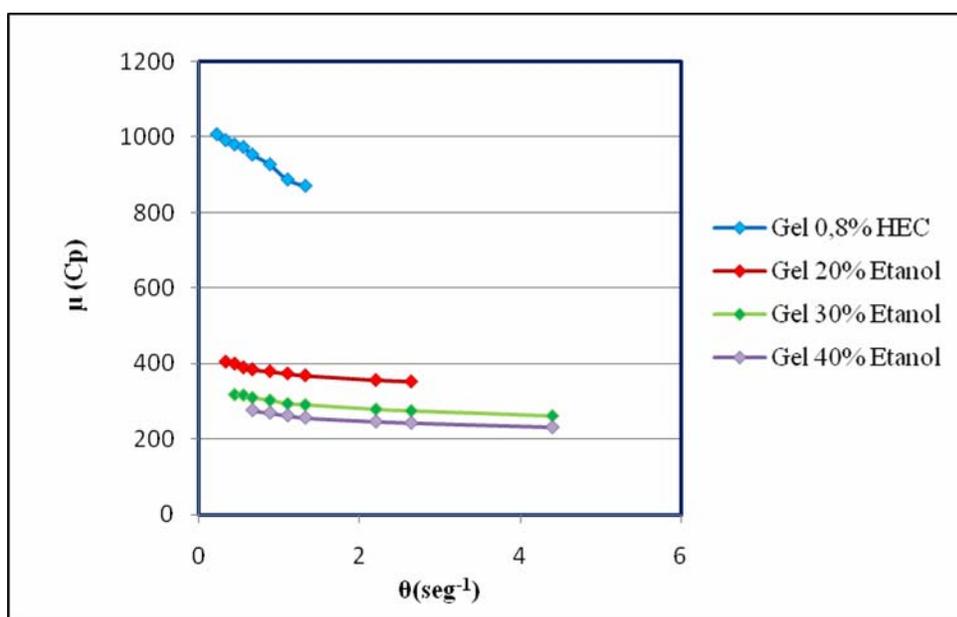


Figura 4.5. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).

Al aumentar la concentración del polímero en gel a 1 %m/m aumenta considerablemente el esfuerzo de corte, figura 4.6, desde 230 hasta 766 dina/cm² para el sistema sin alcohol, en dicha figura se evidencia una clara disminución de esta propiedad al someter al gel con alcohol al mismo cizallamiento, indicando una disminución en la viscosidad del fluido. A partir de un cizallamiento de 170,4 seg⁻¹ ocurre un cambio abrupto de la pendiente de las curvas.

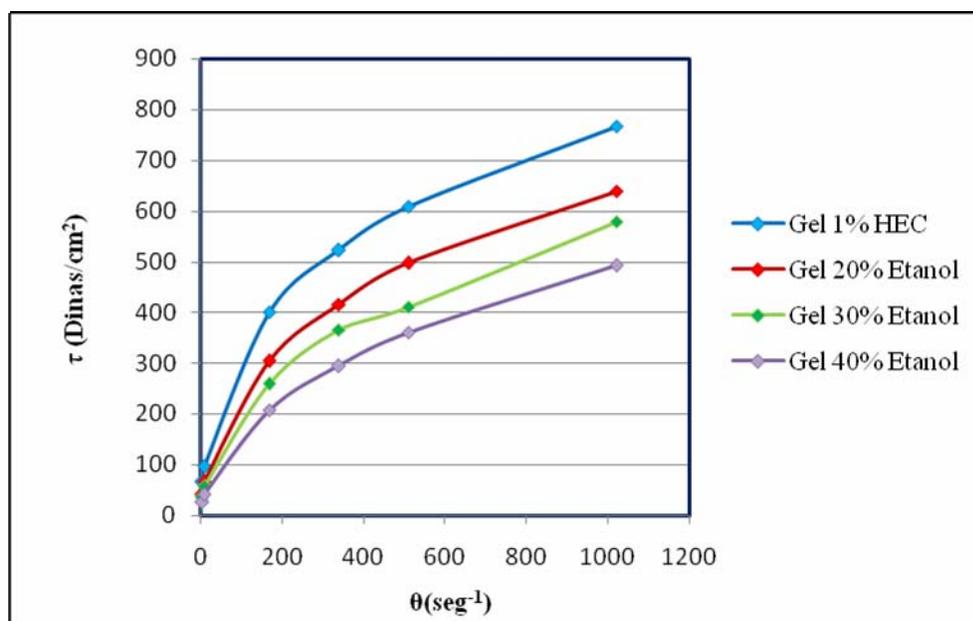


Figura 4.6. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 1%HEC con adición de alcohol (viscosímetro FANN).

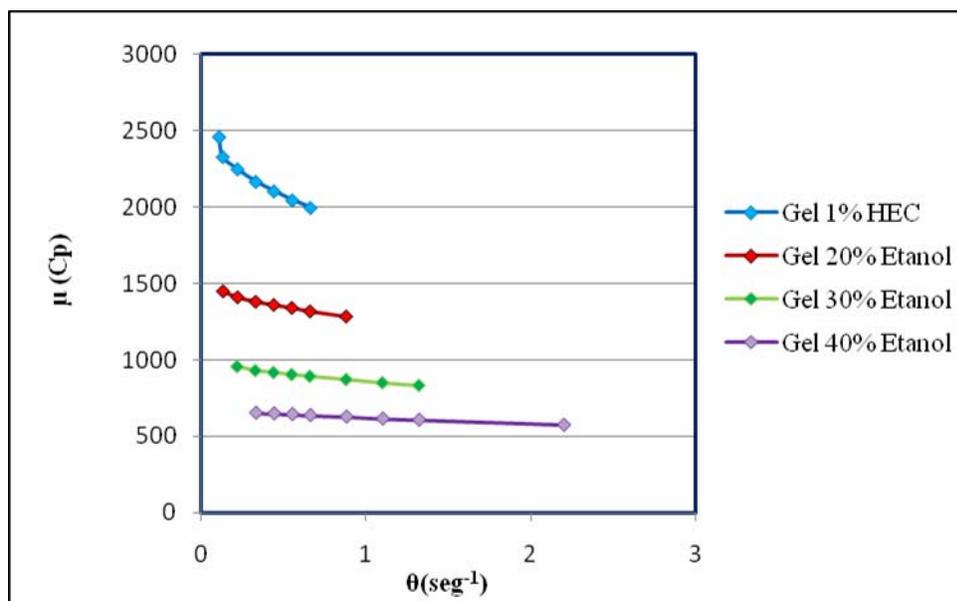


Figura 4.7. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 1%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).

En la figura 4.7 se observa que a bajo cizallamiento ($0,1$ a $2,2 \text{ seg}^{-1}$) la adición de alcohol provoca una reducción de la viscosidad de 1.000 a 1.500 unidades a concentraciones de 20 y 30% de alcohol, manteniéndose el comportamiento pseudoplástico (es de destacar que al cizallamiento utilizado sólo se observa la parte final de la curva característica de la viscosidad para un fluido pseudoplástico señalada en la figura 2.3 del capítulo 2); la viscosidad decrece con el cizallamiento al igual que el gel sin alcohol.

En cambio, a la concentración de 40% alcohol la viscosidad disminuye en 1.900 unidades, pero se mantiene constante en todo el intervalo de cizallamiento, comportamiento característico de un fluido newtoniano, lo que indica un cambio en la reología del gel.

Un aumento posterior en la concentración del polímero a 1,2 g HEC/100 g de solución (representado como 1,2 %HEC) conlleva a un aumento considerable de la viscosidad y gelatinización en el sistema sin alcohol, presentando un comportamiento pseudoplástico pronunciado, como se muestra en las figuras 4.8 y 4.9.

En la figura 4.8 se observa la tendencia de la curva con pendiente positiva, típica de un fluido pseudoplástico.

En la figura 4.9 se muestra que la viscosidad desarrollada es mayor a 5.000 cp para el gel sin alcohol, con una disminución sustancial hasta en 4 órdenes de magnitud cuando se adiciona alcohol a la formulación. Para los geles con alcohol, la disminución de la viscosidad en el rango de cizallamiento aplicado no es notoria, especialmente en el gel con 40% de etanol.

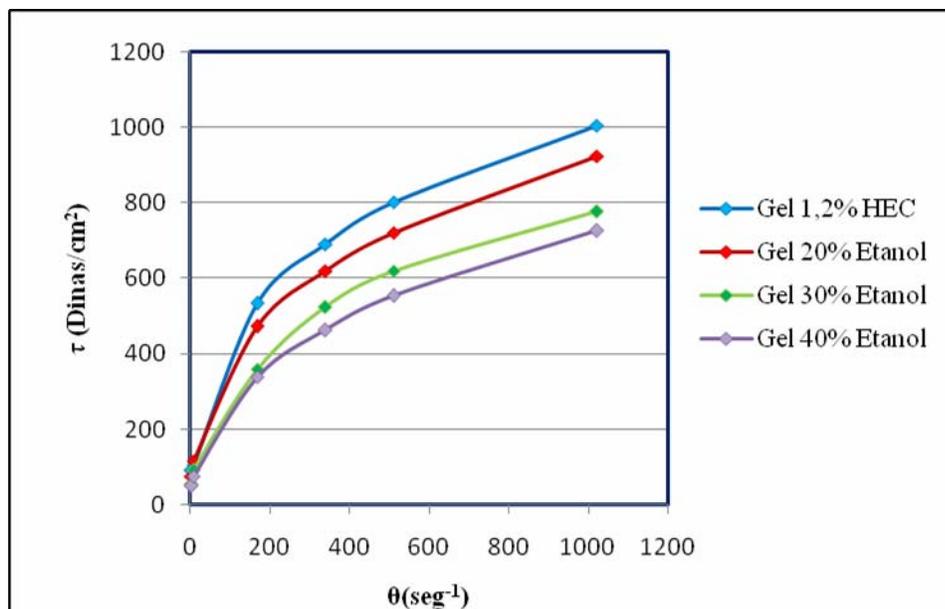


Figura 4.8. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 1,2%HEC con adición de alcohol (viscosímetro FANN).

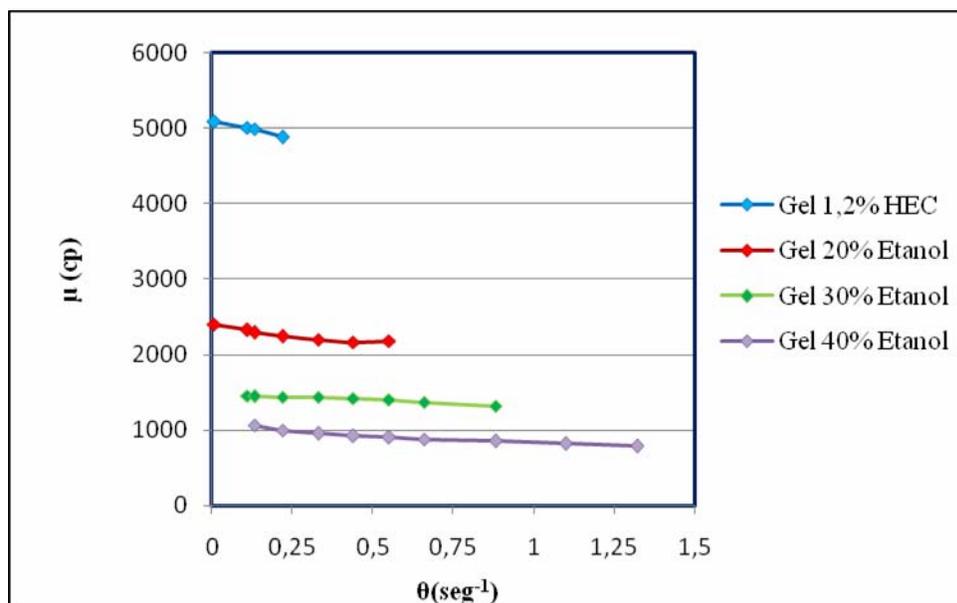


Figura 4.9. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 1,2%HEC con adición de alcohol (viscosímetro Brookfield).

4.2.1 Efecto de un densificante en las propiedades reológicas del gel

Debido a que geles de hidroxietilcelulosa son ampliamente usados en la formulación de fluidos de perforación fue de interés estudiar la variación de las propiedades reológicas esfuerzo de corte y viscosidad, usando un densificante, carbonato de calcio. En las figuras 4.10 y 4.11 se observa un aumento del esfuerzo de corte debido a un aumento de densidad aportada por el densificante, a concentraciones de 40 g CaCO₃/600 ml de gel y de 100 g CaCO₃/600 ml de gel, al someter los geles 0,5 y 0,8%HEC a cizallamiento desde 5 a 1.022 seg⁻¹, respecto al gel sin densificante.

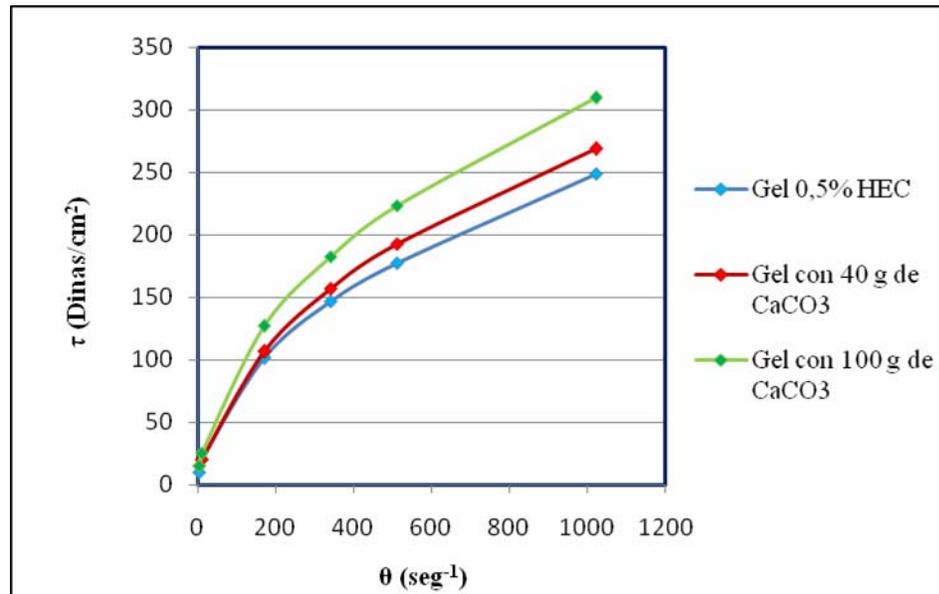


Figura 4.10. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición del densificante CaCO₃ (viscosímetro FANN).

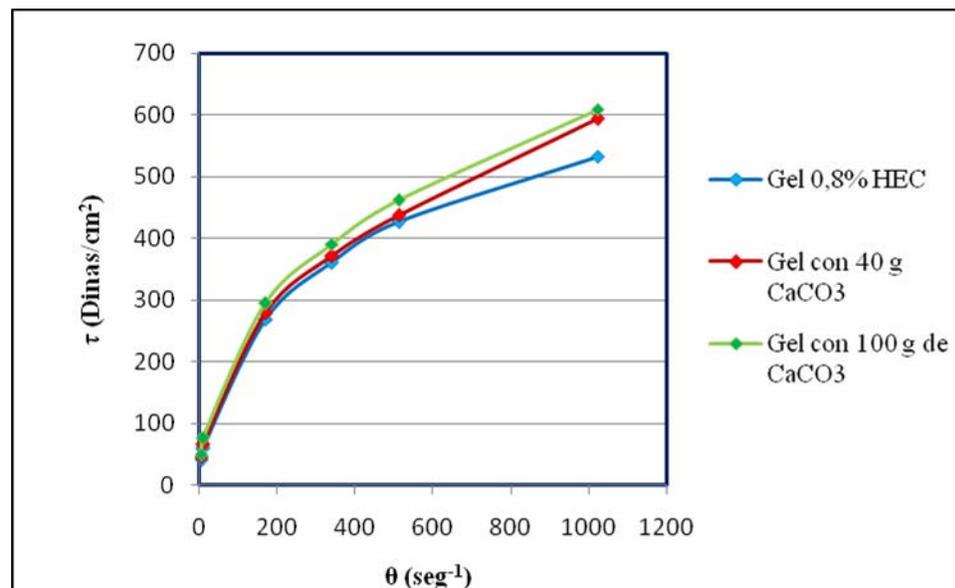


Figura 4.11. Variación del esfuerzo de corte en función del cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición del densificante CaCO₃ (viscosímetro FANN).

Las concentraciones usadas son las que generalmente se aplican en la formulación de los fluidos de perforación para aportar la resistencia de gel y viscosidad plástica deseada para el acarreamiento de sólidos en la sarta de perforación. Este efecto es más pronunciado a la concentración más alta de densificante. El densificante no cambia el tipo de fluido, más bien desarrolla mayor esfuerzo de corte para un mismo cizallamiento.

En las figuras 4.12 y 4.13 se observa que la adición de densificante aumenta la viscosidad del gel respecto al sistema sin aditivo para un mismo cizallamiento, pero mantiene el tipo de fluido. Esto permite afirmar que la adición de carbonato en el gel sólo modifica el valor de esfuerzo de corte y por ende de la viscosidad, pero no el comportamiento reológico del fluido.

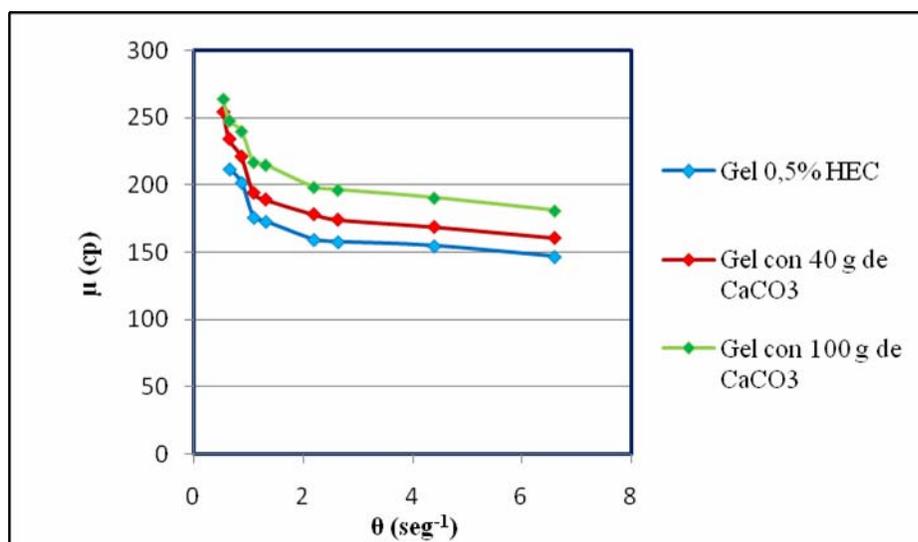


Figura 4.12. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC con adición del densificante CaCO_3 (viscosímetro Brookfield).

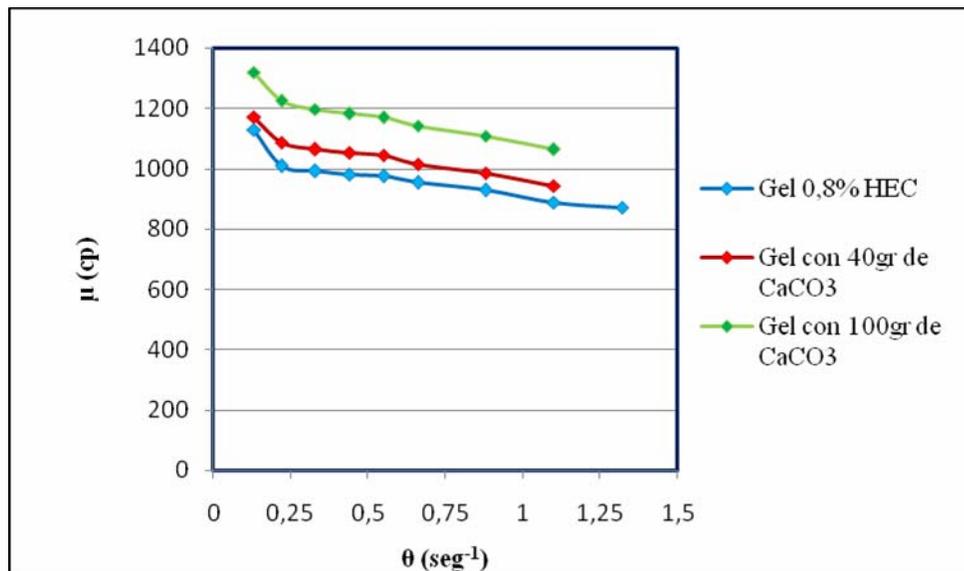


Figura 4.13. Variación de la viscosidad con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC con adición del densificante CaCO₃ (viscosímetro Brookfield).

4.3 Medición de las propiedades reológicas de los geles formulados

La finalidad de este objetivo es obtener los principales parámetros reológicos utilizados en la industria para fluidos viscosantes, tales como: viscosidad plástica, punto cedente, viscosidad aparente, fuerza gel 10 segundos y fuerza gel 10 minutos para cada uno de los geles formulados con y sin alcohol.

Al representar los resultados obtenidos para el gel 0,5% HEC sin alcohol, figura 4.14, se puede decir que el fluido presenta reología inversa, es decir el punto cedente (PC) es mayor que la viscosidad plástica (VP).

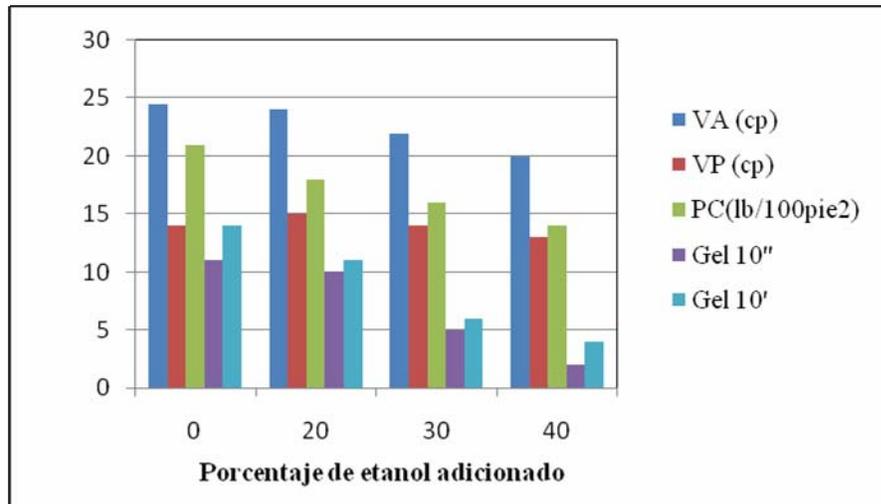


Figura 4.14. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,5 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.

En cuanto a los valores de resistencia de gel se observa que el valor para el gel final (Gel 10': gel a 10 min.) es mayor que el de gel inicial (Gel 10'': gel a 10 s.), lo cual es manifestación de la dependencia del tiempo de los fluidos tixotrópicos. La estructura gel sólo se desarrolla después de un período de tiempo en el que el gel ha permanecido en estado de reposo.

Al considerar la adición de alcohol al gel, figura 4.14, todos los parámetros tienden a disminuir, pero en general mantienen la misma tendencia que el sistema sin alcohol. El punto cedente y la viscosidad plástica son factores determinantes en el control de un lodo de perforación.

Al aumentar la concentración del polímero de 0,5 a 0,8 % masa sin alcohol, figura 4.15, el comportamiento observado anteriormente con el gel a 0,5 % HEC se torna más pronunciado, desarrollando altos valores de punto cedente (PC) mayores que la viscosidad plástica (VP), indicando viscoelasticidad. Los fluidos viscoelásticos poseen propiedades elásticas (comportamiento acorde a la Ley de Hooke) y viscosas

(que obedece a la Ley de Newton), comportamiento importante en los fluidos de fractura para la estimulación de pozos productores de hidrocarburos, lo cual permite incrementar los niveles de producción del pozo.

La presencia de alcohol en el gel disminuye los parámetros reológicos, especialmente a la concentración de 40% vol., como se muestra en la figura 4.15. En cuanto a los valores de fuerza gel, el gel final (a 10 min.) es mayor que el gel inicial (a 10 s.) sólo a concentraciones de alcohol de 20 y 30 % vol., presentando un comportamiento inverso a la concentración de 40 % de alcohol debido al debilitamiento del gel por el alcohol, manifestado por una disminución sustancial de la viscosidad de 1.000 cp (valor sin alcohol) a 230 cp (valor con alcohol), mostrado en la figura 4.5.

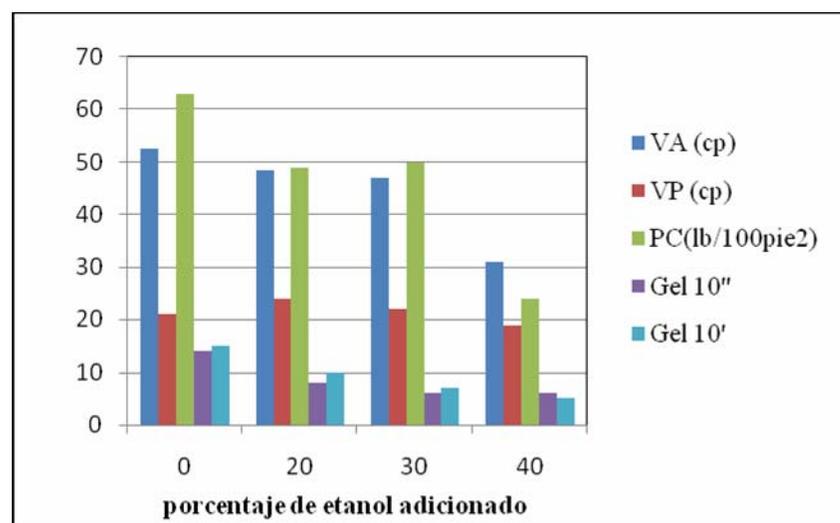


Figura 4.15. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,8 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.

Los valores de fuerza gel son importantes para saber si habrá problemas de circulación al momento de la perforación, si el valor del gel aumenta en gran medida después del tiempo de reposo quiere decir que ese gel ocasionara problemas de

gelificación en el pozo. Tal problema puede solventarse con la adición de alcohol al sistema a concentraciones menores de 30 % vol.

En las figuras 4.16 y 4.17 se presentan los resultados de los parámetros reológicos cuando se aumenta la concentración del polímero a 1 y 1,2 %HEC, evidenciando aumentos progresivos de estas propiedades para el sistema sin alcohol, comparados con los geles de menor concentración (0,5 y 0,8 %HEC). La tendencia se mantiene respecto a los demás geles estudiados, los valores de punto cedente (PC) son mayores que la viscosidad plástica (VP) y en general disminuyen con la adición de alcohol al sistema. La viscosidad aparente medida con el viscosímetro Fann disminuye con la concentración del alcohol en el gel, como se evidenció en las mediciones con el viscosímetro Brookfield a bajo cizallamiento, figuras 4.7 y 4.9.

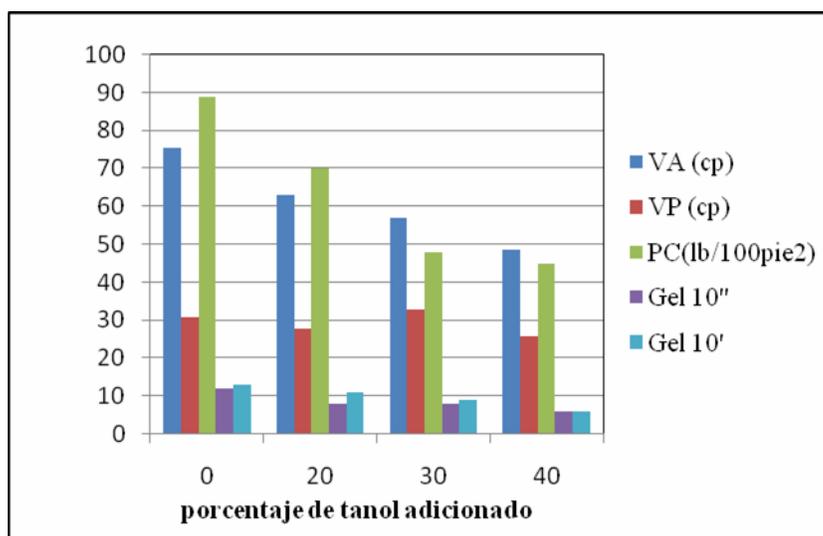


Figura 4.16. Variación de los parámetros reológicos del gel 1 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.

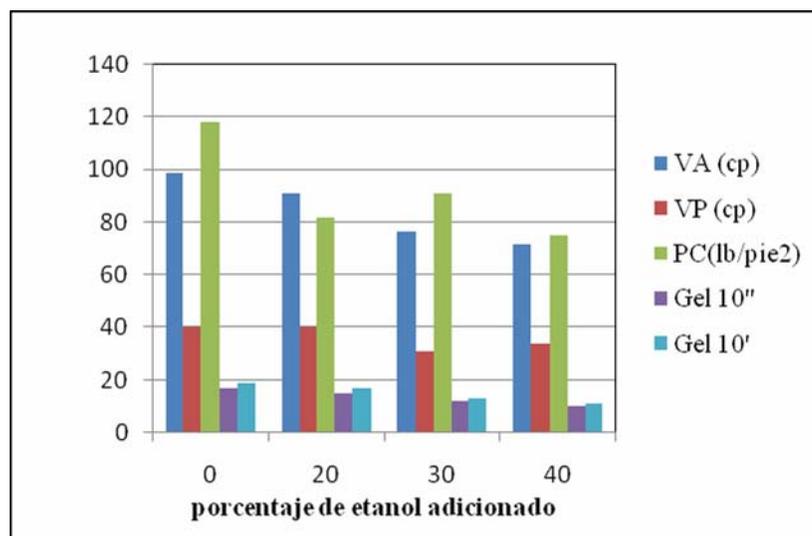


Figura 4.17. Variación de los parámetros reológicos del gel 1,2 % HEC, a diferentes concentraciones de etanol.

Los valores de resistencia gel representados en gel inicial (10 s) y gel final (10 min) mantienen la tendencia a describir el comportamiento de fluido tixotrópico en el que el gel desarrolla cierta resistencia al dejarlo en reposo por tiempo prolongado, en éste caso es evidente que los valores de gel final son mayores que los de gel inicial sin llegar a valores elevados que podrían representar un problema al momento de aplicar el fluido en la perforación de pozos. El gel con 40% de etanol no tiene esta característica y no desarrolla resistencia al dejarlo en reposo, en este caso en particular, las lecturas de gel final e inicial son iguales.

4.3.1 Efecto del densificante CaCO_3 en los parámetros reológicos

Al agregar carbonato de calcio a la muestra de gel ya preparada, éste actúa aumentando los valores de las propiedades reológicas, como se muestra en las figuras 4.18 y 4.19 para concentraciones de polímero de 0,5 y 0,8 % HEC.

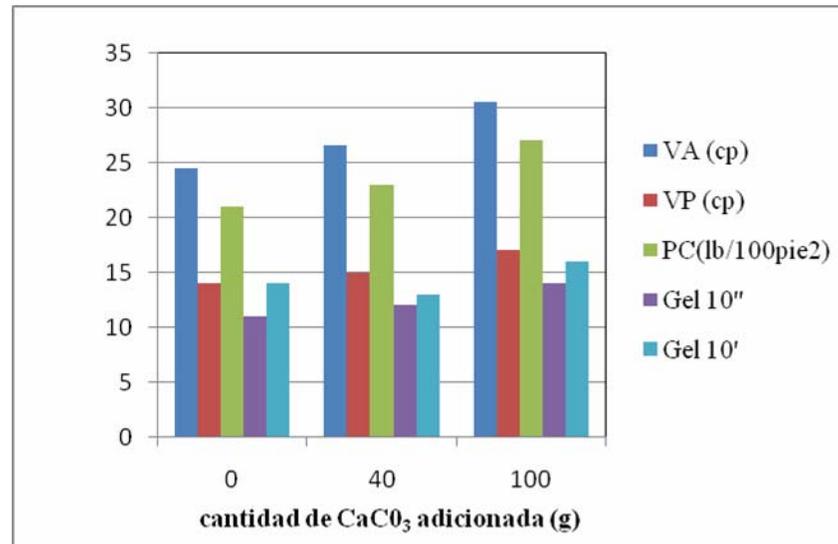


Figura 4.18. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,5 % HEC con densificante.

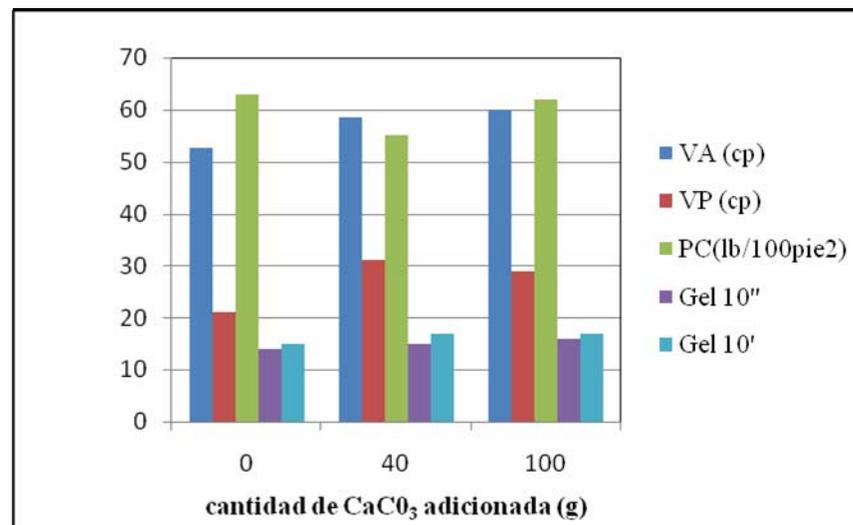


Figura 4.19. Variación de los parámetros reológicos del gel 0,8 % HEC con densificante.

La viscosidad aparente es siempre mayor que el valor de punto cedente y la viscosidad plástica aumenta con el aumento de la cantidad de sólido, la cual está

directamente relacionada con el contenido de sólido. Los valores de gel final son mayores a los de gel inicial, ya que la resistencia gel aumenta con la cantidad de carbonato añadido. La viscosidad plástica es una medida de la resistencia interna al flujo atribuible a la cantidad, tipo y tamaño de sólidos presentes en el fluido dado. En un fluido newtoniano, la viscosidad plástica es numéricamente idéntica a la viscosidad aparente, lo cual no se cumple para el caso en estudio.

4.4 Análisis de la influencia de la temperatura en las propiedades reológicas de los geles de hidroxietilcelulosa formulados

Se sometieron a estudio 3 geles de los formulados: gel 0,5% HEC, gel 0,8% HEC y gel 1% HEC, con el fin de analizar el efecto de la temperatura en sus propiedades. Las temperaturas fueron 30, 40 y 50 °C, de manera de no sobrepasar el punto de ebullición del etanol (78 °C) y del agua (100 °C) a presión atmosférica.

En la figura 4.20, para el gel 0,5%HEC sin alcohol, se muestra que la temperatura provoca un cambio en el comportamiento pseudoplástico, evidenciado por la disminución del esfuerzo de corte con el cizallamiento; siendo más pronunciado este efecto a la temperatura de 50 °C. El esfuerzo de corte a alto cizallamiento (1.022 seg^{-1}) a 27 °C fue de 248,8 dinas/cm², disminuyendo a 198 dinas/cm² al aumentar en solo tres grados la temperatura (30 °C); posteriormente se obtuvo un decremento considerable de 111 unidades (137,1 dinas/cm²) a la temperatura de 50 °C.

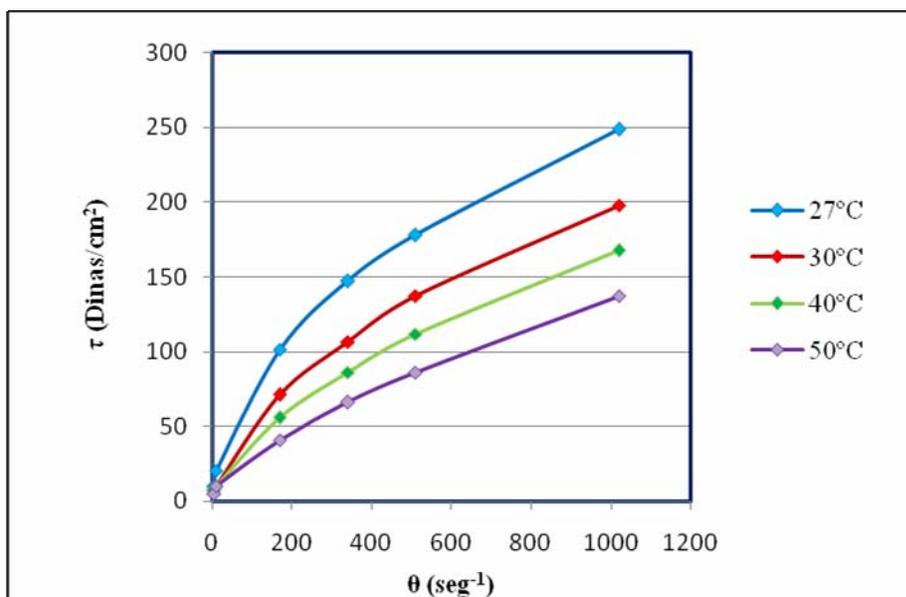


Figura 4.20. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC, sin alcohol, a diferentes temperaturas.

También se estudió la influencia de la temperatura en los sistemas con alcohol, a diferentes concentraciones del polímero 0,5, 0,8 y 1 %HEC. En las figuras 4.21 a 4.31 se muestra igual tendencia que con el gel sin alcohol: la temperatura provoca una disminución del comportamiento pseudoplástico del gel, especialmente a la temperatura de 50 °C y con 40 % de etanol, donde la variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento tiende a ser casi lineal, característico de un fluido newtoniano.

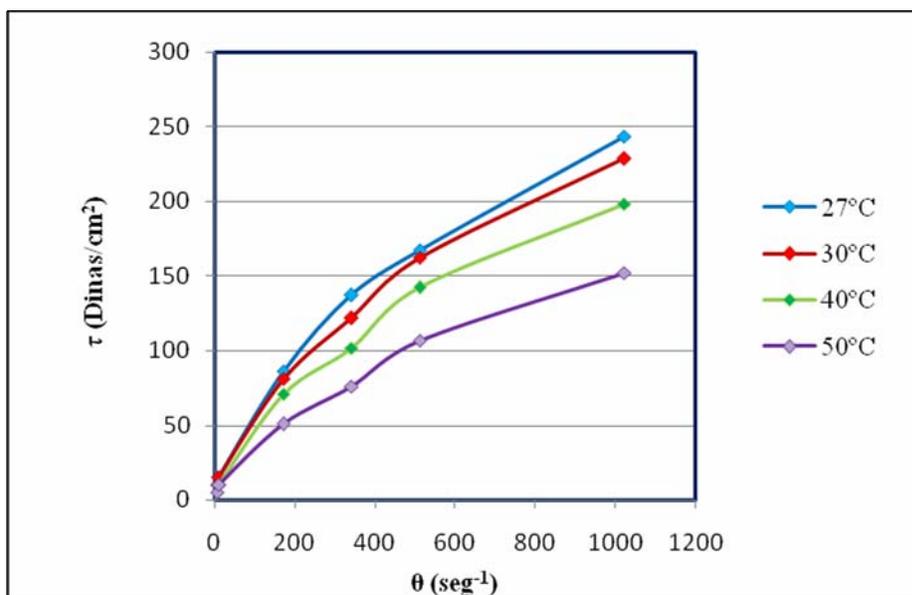


Figura 4.21. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 20 % de etanol, a diferentes temperaturas.

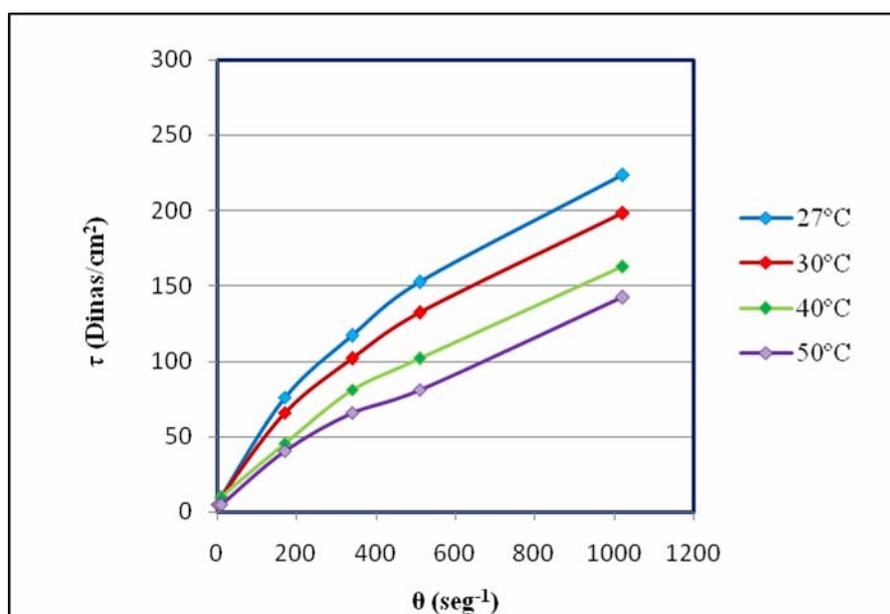


Figura 4.22. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 30 % de etanol, a diferentes temperaturas.

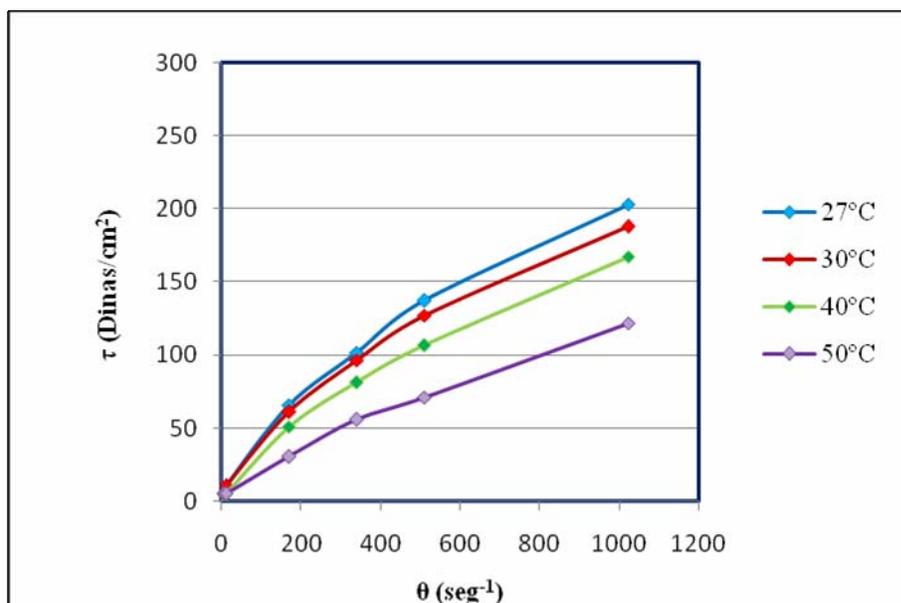


Figura 4.23. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 40% de etanol, a diferentes temperaturas.

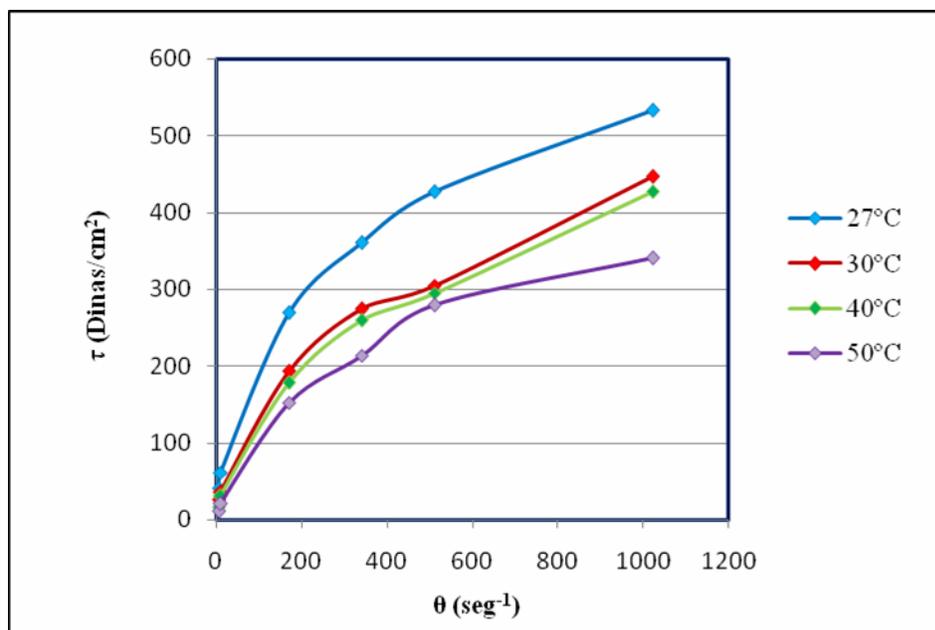


Figura 4.24. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC, sin alcohol, a diferentes temperaturas.

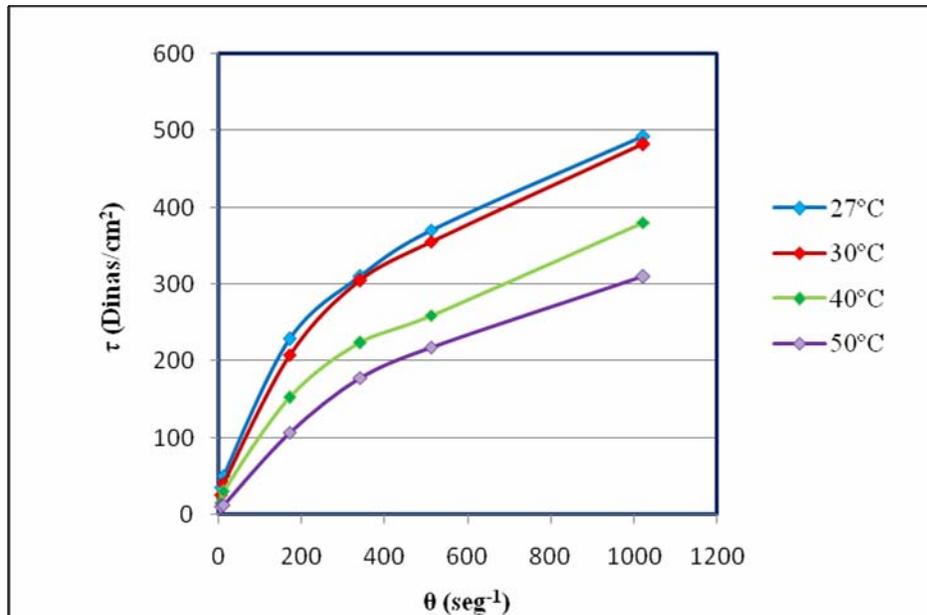


Figura 4.25. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC y 20 % de etanol, a diferentes temperaturas.

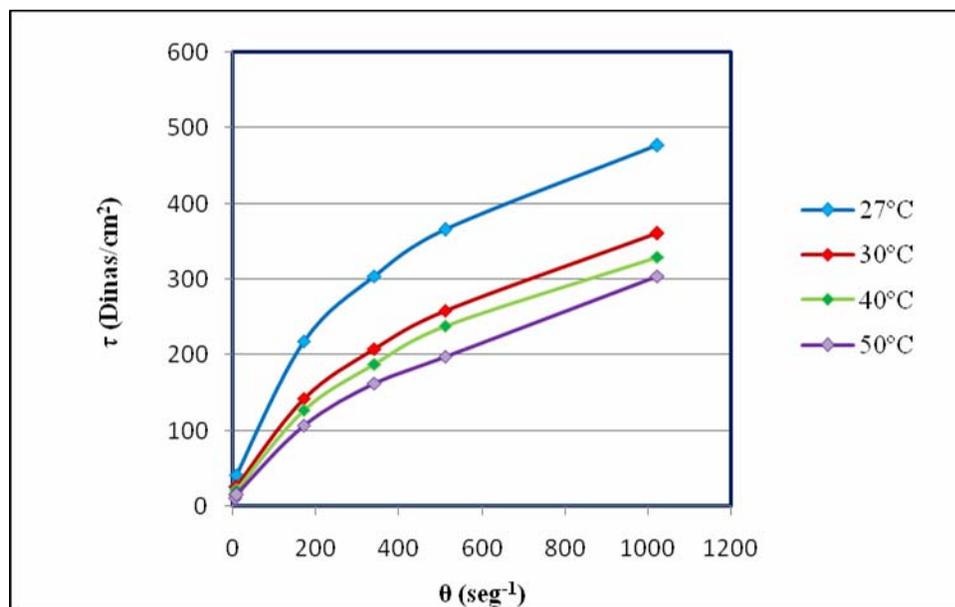


Figura 4.26. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC y 30 % de etanol, a diferentes temperaturas.

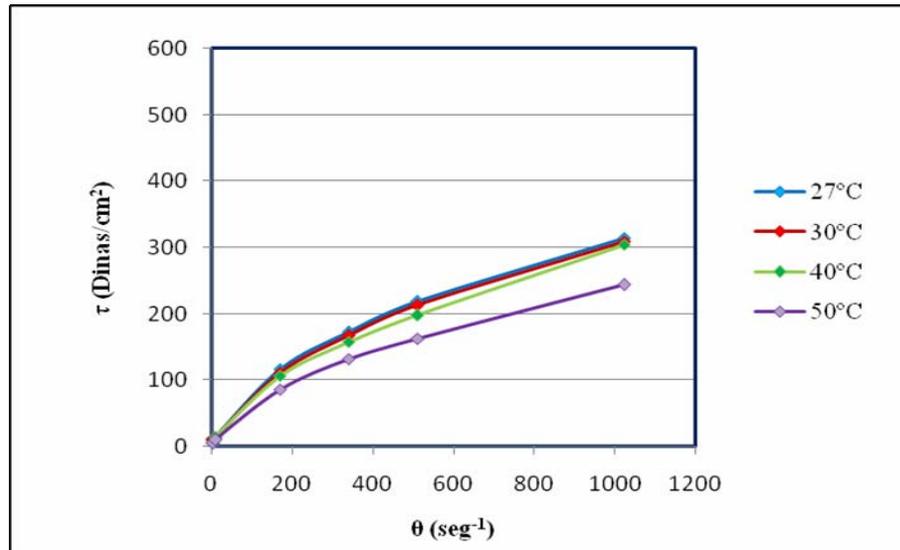


Figura 4.27. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,8%HEC y 40 % de etanol, a diferentes temperaturas.

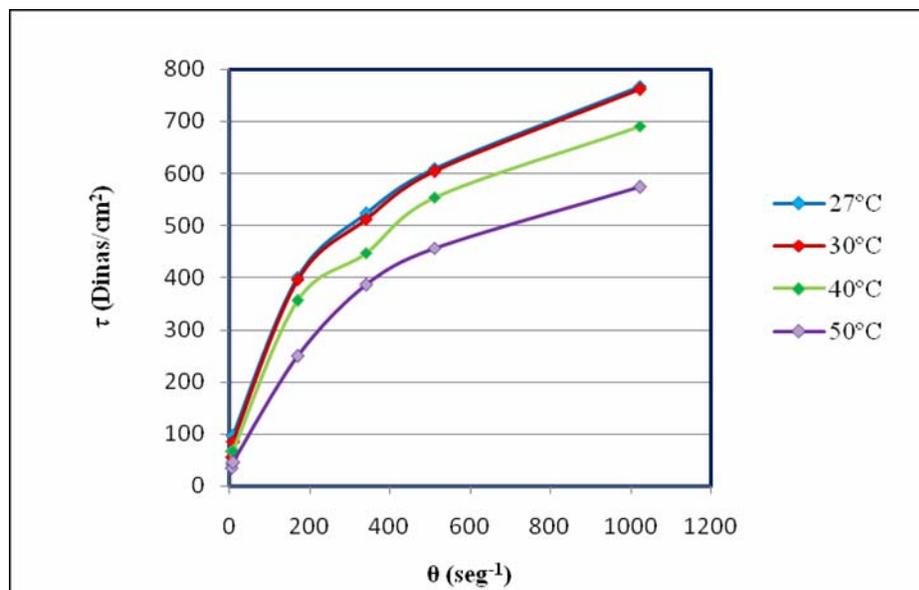


Figura 4.28. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 1%HEC, sin alcohol, a diferentes temperaturas.

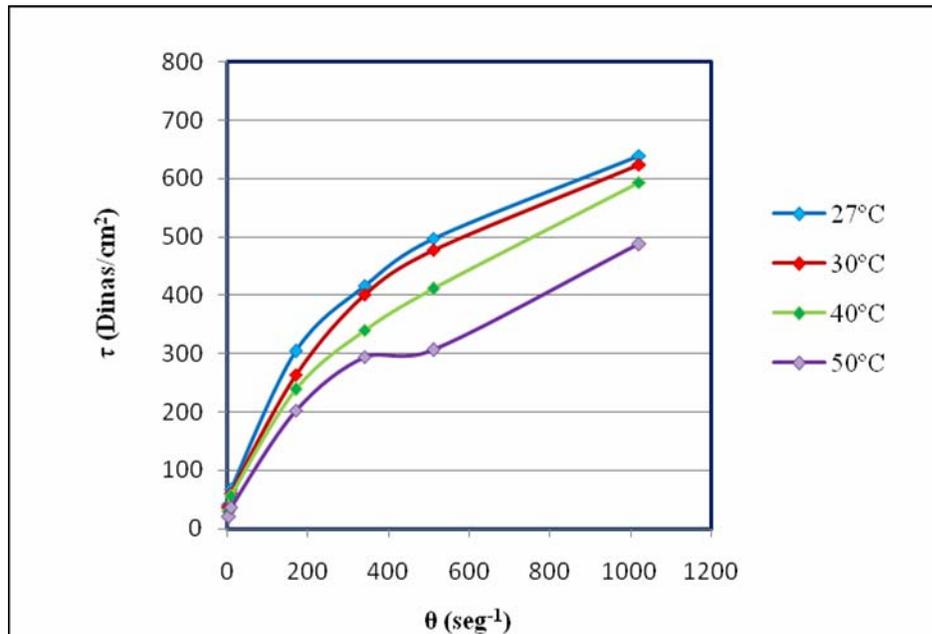


Figura 4.29. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 1%HEC y 20 % de etanol, a diferentes temperaturas.

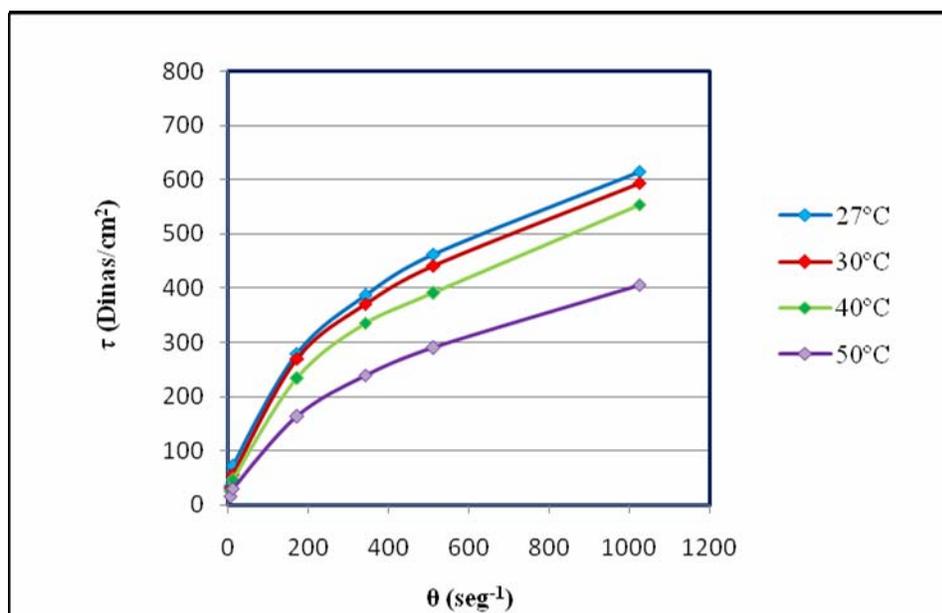


Figura 4.30. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 0,5%HEC y 30 % de etanol, a diferentes temperaturas.

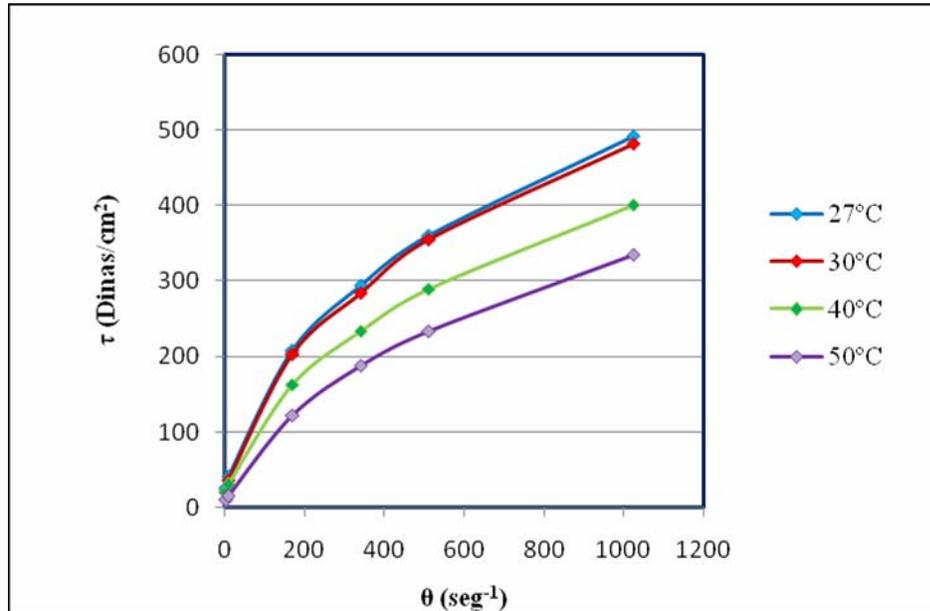


Figura 4.31. Variación del esfuerzo de corte con el cizallamiento para el gel 1%HEC y 40 % de etanol, a diferentes temperaturas.

4.4.1 Influencia de la temperatura en los perfiles de viscosidad de los geles

Al someter los geles a un aumento de temperatura también fue posible estudiar la influencia de ésta en la viscosidad del fluido a bajo cizallamiento. En este caso se estudiaron los geles con alcohol y los geles sin alcohol, encontrando para ambos los mismos resultados, reportados en el anexo A. Es evidente que la viscosidad tiende a disminuir con el aumento de temperatura y el fluido pierde propiedades pseudoplásticas, teniendo como consecuencia que al alcanzar los 50 °C su comportamiento se vuelve newtoniano, tal comportamiento se acentúa aún mas en los geles con 40% de etanol (anexo A).

4.5 Conclusiones

1. Los geles formulados con el polímero hidroxietilcelulosa a concentraciones desde 0,5 hasta 1,2 g HEC/100 g de solución presentaron un comportamiento pseudoplástico, por debajo de esta concentración el fluido se comportó como newtoniano.
2. La adición de alcohol a los geles formulados con hidroxietilcelulosa logró la disminución de los valores de esfuerzo de corte, de viscosidad y de las propiedades reológicas, teniendo como consecuencia un cambio en el comportamiento reológico del fluido de pseudoplástico a newtoniano a una concentración de 40% volumen de etanol, independientemente de la concentración del polímero.
3. Un aumento de la temperatura de 27°C a 50°C disminuyó la viscosidad de los geles de concentración 0,5; 0,8 y 1% HEC, así como el esfuerzo de corte; manteniéndose el comportamiento pseudoplástico.
4. Los valores de las propiedades reológicas para los geles de hidroxietilcelulosa son típico de fluidos pseudoplásticos, el punto cedente de estos fluidos es mayor que la viscosidad plástica y la variación de la viscosidad con el tiempo indicó tixotropía.
5. La adición del densificante carbonato de calcio no tuvo efecto sobre el comportamiento del fluido, manteniéndose como un fluido pseudoplástico; sólo se logró un incremento en los valores de viscosidad, esfuerzo de corte y parámetros reológicos, características deseadas en la formulación de lodos de perforación.

4.6 Recomendaciones

1. Estudiar el efecto de otros alcoholes en la reología de geles, tales como isopropanol y butanol.
2. Analizar el efecto del tiempo de reposo en la resistencia gel y otros parámetros reológicos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Paraqueima, A. **“Evaluación de Gomas Xánticas e Inhibidores Químicos Nacionales, para la formulación dl fluido de perforación Base Agua FLO-PRO”**, Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela (2009).
2. González, C. **“Evaluación preliminar de un fluido Sellante para la perforación de formaciones naturalmente fracturadas”**, Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela (2008)
3. Bompart, M. **“Estudio Reológico y de Factibilidad técnica de exclusión de fluidos espaciadores utilizados en la cementación de Pozos”**, Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona, Venezuela (1999).
4. Paruta, E. **“Emulsiones Geles. Influencia de la formulación y fracción de fase dispersada sobre sus propiedades reológicas y estabilidad”**, Tesis de Grado. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (2008).
5. Montesi, A. Peña, A. Hirasaki, G. Pascuali, M. **“Viscoelastic behavior of polymer thickened water inoil emulsions”**, Chemical Engineering Department, Rice University.
6. Watson, D y Mackley, M. **“The rheology of aqueous emulsions prepared by direct emulsification and phase inversion from a high viscosity alkyd resin”** Department of Chemical Engineering, University of Cambridge, Pembroke Street, Cambridge (2002)

7. Laurencio, H y Delgado, Y. **“Propiedades Reológicas de Emulsiones de Petróleo pesado en agua”**, Revista Chilena de Ingeniería, vol. 16 N° 1: pp. 244-249 (2008). Disponible en: [http:// www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v16n1/ART14.pdf](http://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v16n1/ART14.pdf)

8. **“Producción de Hidroxietilcelulosa”**. Proyecto P140, Universidad de Granada, España. Disponible en: <http://www.urg.es>

9. Abaco Vital. Club de Perfumería y Cosmética, **“Fichero de Datos Técnicos de Materias Primas”**. Disponible en: <http://www.abacovital.com>

10. Schweigger, E. **“Manual de Pinturas y recubrimientos plásticos”**. Ediciones Diaz de Santos, España (2005). Disponible en: <http://www.books.google.co.ve/>

11. CORQUIVEN C.A, **“Hoja de Seguridad (MSDS/Material Safety Data Sheets). Hidroxietilcelulosa (Natrasol/Tylose)”**. Valencia, Venezuela (2006).

12. Salager, J.L. **“Emulsiones. Propiedades y Formulación”**, Cuaderno FIRP 231, Módulo de enseñanza de fenómenos interfaciales, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (1993).

13. Briceño, Ma. I. **“Reología. Conceptos básicos”**, Cuaderno FIRP 526, Módulo de enseñanza de fenómenos interfaciales. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (2004).

14. Kelco Oil Field Group, **“Reología. Boletín Técnico”**. Disponible en: <http://www.Kofg.com>

15. Briceño, Ma. I. **“Introducción a la Reometría”**, Cuaderno FIRP 527, Módulo de enseñanza de fenómenos interfaciales, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela (2004).

16. **“Introducción a la reología”**, Anexo 1. Disponible en <http://www.unizar.es>

17. Prieto, Alí, **“Tecnología aplicada a los fluidos de perforación”**, Febrero 1997

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO:**

TÍTULO	“Estudio del comportamiento reológico de geles de hidroxietilcelulosa”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Gil Mendez, Addharelys Del Valle	CVLAC: 18114314 E MAIL: addha_gil@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Gel

Hidroxietilcelulosa

Reología

Viscosidad

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ÀREA	SUBÀREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

En este trabajo se estudió el comportamiento reológico de geles de hidroxietilcelulosa. Con el viscosímetro Fann 35A se midió el esfuerzo de corte para un rango de cizallamiento de 5 a 1.022 seg^{-1} , y los parámetros reológicos punto cedente, viscosidad plástica, resistencia gel; con el viscosímetro Brookfield L-V se obtuvieron valores de viscosidad a bajo cizallamiento (0,6 a 13,2 seg^{-1}). Se prepararon geles con distintas concentraciones de polímero HEC (0,5, 0,8, 1 y 1,2 % g HEC/100 g solución) y tres concentraciones de etanol (20, 30 y 40 % v/v) para estudiar la influencia de este alcohol en el comportamiento reológico de los geles. Adicionalmente, se realizaron otros ensayos donde se evaluó el efecto de un densificante (carbonato de calcio) y de la temperatura en los geles con y sin alcohol. Los resultados demostraron que los geles sin alcohol presentaron un comportamiento reológico tipo pseudoplástico y que la adición de 40 % v/v de etanol produjo un cambio en la reología a un fluido de tipo newtoniano. La tendencia de los valores de los parámetros reológicos para los geles estudiados fue característica de un fluido pseudoplástico (punto cedente mayor que la viscosidad plástica). Un aumento de temperatura (de 27 a 50°C) produjo una disminución sustancial de la viscosidad del gel y a 50 °C la tendencia fue lineal, comportándose como un fluido newtoniano. La adición del densificante carbonato de calcio incrementó el carácter pseudoplástico del gel, desarrollando altos valores de viscosidad, esfuerzo de corte y parámetros reológicos.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Marfisi, Shirley	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	10.301.828			
	E_MAIL	shirleymarfisi@yahoo.com			
	E_MAIL				
Salas, Yraima	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	8.478.649			
	E_MAIL	Yrasal57@yahoo.es			
	E_MAIL				
Cova, Alexis	ROL	CA	AS	TU	JU
	CVLAC:	11.905.328			
	E_MAIL	alexiscovab@gmail.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	04	16
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**ARCHIVO (S):**

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Comportamiento reologico.doc	Documento en word

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1
2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente. Núcleo Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**DERECHOS**

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado: "Los trabajos de grado son propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario"

Gil, Addharelys

AUTOR

Marfisi, Shirley

TUTOR

Salas, Yraima

JURADO

Cova, Alexis

JURADO

Salas, Yraima

POR LA SUBCOMISION DE TESIS