



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA EN EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN DE RECURSOS NATURALES -
PRODUCCION

ESTUDIO REOLÓGICO DE EMULSIONES DE AGUA Y ACEITE CRUDO
PESADO DE CAMPOS MARINOS EN MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
OSWALDO DAVID LÓPEZ HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. T. IVAN GUERRERO SARABIA
FACULTAD DE INGENIERÍA U.N.A.M.

MÉXICO, D. F. ENERO 2017
CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Samaniego Verduzco Fernando

Secretario: Dr. López Ramírez Simón

Vocal: Dr. Guerrero Sarabia Teodoro Iván

1 er. Suplente: Dr. Ramírez Jaramillo Edgar

2 d o. Suplente: M. en I. Santamaría Guevara Noel Ernesto

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: México, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Teodoro Iván Guerrero Sarabia

FIRMA

Para Carlos y Sofía que son el principal motivo de esta etapa de mi vida.

La enorme alegría que me dan y la felicidad de estar con ustedes son la energía necesaria para mejorar día con día y luchar por un nuevo objetivo...

Para Karina por acompañarme y apoyar mis decisiones, por regalarme dos seres maravillosos y por tu paciencia. Te amo.

Agradecimientos

Agradezco al Gran Arquitecto Del Universo la oportunidad y facilidades para encontrar en mi camino a las personas correctas, que permitieron mi mejora académica y profesional.

Al Dr. Iván Guerrero Sarabia por su amistad, orientación, dedicación, esmero y preocupación en el desarrollo de este trabajo de investigación. Por recordarme que todo tiene un fundamento.

Al Dr. Simón López Ramírez por su amistad, apoyo, orientación y paciencia en el desarrollo de los experimentos. Por su disposición y pláticas que me permiten ver desde otra perspectiva.

A la Unidad de Servicios para la Industria Petrolera, de la facultad de Química, por apoyar el proyecto y facilitar sus laboratorios e instalaciones. A todos sus miembros que permitieron llevar a cabo el trabajo experimental.

Al Grupo de Investigación en Ingeniería Multifásica y Aseguramiento de Flujo por la oportunidad de seguir investigando y aprendiendo; a todos mis compañeros que formamos el grupo, por su amistad y apoyo.

A mis sinodales y profesores, Dr. Fernando Samaniego Verduzco, Dr. Edgar Ramírez Jaramillo y M. en I. Noel Santamaría Guevara, por su conocimiento y experiencia transmitida en las aulas.

Al Activo de Producción Cantarell, el Ing. Miguel Ángel Lozada y PEP por la oportunidad de seguirme preparando para afrontar los nuevos retos de la industria petrolera nacional.

A mi alma mater, la UNAM, y la Facultad de Ingeniería, por abrirme una vez más las puertas a esta honrosa institución, como estudiante y académico.

A mis padres Juana Hernández y Víctor López, porque la formación recibida en su hogar me ha permitido ser una persona trabajadora, acertada y perseverante en mis objetivos e ideales.

A mis hermanos Orlando y Víctor por la admiración que les tengo.

Al Dr. Édgar Rangel Germán.

RESUMEN

La caracterización reológica de las emulsiones de agua en aceite es un tema relevante para el aseguramiento del flujo en los sistemas de producción petroleros. Esto se debe a que la viscosidad aparente de estas emulsiones puede incrementarse sustancialmente en comparación a la del aceite puro. En el caso de los aceites pesados o extrapesados, la viscosidad de las emulsiones puede alcanzar valores de hasta 10^6 cp. Así, las emulsiones ocasionan daño en el yacimiento, fallas en los equipos de bombeo electro-centrífugo de los pozos, y dificultan las operaciones de deshidratación, bombeo y transporte en la superficie.

En México, el estudio de las emulsiones de agua y aceite pesado ha generado un creciente interés en los últimos años para la industria petrolera, particularmente en los yacimientos que producen aceites pesados y extrapesados. Esto se atribuye a que la mayoría de los grandes campos costa afuera de aceite pesado alcanzaron su etapa de madurez, y actualmente producen cantidades importantes de agua del yacimiento (cortes de agua de 20 a 60%). En estas condiciones, es común que se presenten problemas operativos por la formación de emulsiones. Cabe agregar que el interés es aún mayor pues se espera que los nuevos campos marinos descubiertos de aceite pesado y extrapesado comenzarán a producir agua en el corto plazo.

Tomando en cuenta la importancia del tema para la industria, esta tesis tiene como objetivo: *Investigar el comportamiento reológico de emulsiones de agua y aceite, para*

muestras de crudos pesados de campos marinos en México, desde el punto de vista experimental.

Se presenta una revisión de los conceptos y definiciones principales referentes al estudio de las emulsiones; Un resumen de algunos trabajos experimentales reportados en la literatura relacionados con su formación, estabilidad, y reología. Asimismo, se incluye una breve discusión de las correlaciones existentes para calcular la viscosidad relativa.

Para tal fin, se recolectaron muestras de crudos pesados de tres campos marinos de México, se generaron emulsiones con ellos, y se investigó experimentalmente su comportamiento reológico de éstas. Los experimentos se realizaron a diferentes fracciones volumétricas de agua, temperaturas, y velocidades de corte. Adicionalmente, se investigó el efecto de un agente tenso-activo en la reducción de la viscosidad de las emulsiones. En el trabajo se describen los detalles de la metodología experimental y del equipo de laboratorio utilizados, y se presenta una discusión de los resultados de las pruebas efectuadas.

Con base en los datos reológicos obtenidos, se desarrollaron correlaciones para estimar la viscosidad de las emulsiones generadas con cada uno de los aceites analizados. De manera complementaria, se propusieron correlaciones para calcular la viscosidad de las muestras de aceite en función de la velocidad de corte y la temperatura. Finalmente, se presentan y discuten los resultados de la evaluación estadística de las correlaciones propuestas.

Contenido

| | |
|--|-----|
| Resumen | i |
| Lista de figuras | iii |
| Lista de tablas | ix |
| Capítulo 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Objetivo general | 2 |
| 1.2 Objetivos específicos | 3 |
| 1.3 Contenido de la tesis | 3 |
| Capítulo 2. Revisión del estado del arte sobre emulsiones agua-aceite | 5 |
| 2.1 Antecedentes | 5 |
| 2.1.1 Factores que afectan la viscosidad de las emulsiones | 8 |
| 2.1.2 Agentes tensoactivos y emulsiones | 12 |
| 2.2 Estudios experimentales | 14 |
| 2.2.1 Estudios reológicos | 14 |
| 2.2.2 Estudios sobre la formación y estabilidad de las emulsiones | 18 |
| 2.2.3 Estudios sobre el punto de inversión de fases | 19 |
| 2.3 Métodos de predicción de la viscosidad de las emulsiones | 21 |
| Capítulo 3. Pruebas experimentales | 25 |
| 3.1 Muestras de aceite crudo pesado analizadas | 25 |
| 3.2 Equipo de laboratorio | 27 |
| 3.2.1 Reómetro | 27 |
| 3.2.2 Mezclador | 29 |
| 3.2.3 Sistema para el tratamiento de agua | 29 |
| 3.2.4 Densímetro | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.3 Metodología experimental | 31 |
| 3.3.1 Pruebas preliminares | 31 |
| 3.3.2 Selección de agentes tensoactivos | 35 |
| 3.3.3 Medición de la fracción de agua emulsionada | 38 |
| 3.4 Resultados | 39 |
| 3.4.1 Sistema A | 40 |
| 3.4.1.1 Caracterización reológica del aceite crudo | 40 |
| 3.4.1.2 Caracterización reológica de las emulsiones | 41 |
| 3.4.1.3 Punto de inversión de fase | 42 |
| 3.4.1.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada | 43 |
| 3.4.1.5 Efecto del agente tensoactivo sobre las emulsiones | 44 |
| 3.4.2 Sistema T | 45 |
| 3.4.2.1 Caracterización reológica del aceite crudo | 45 |
| 3.4.2.2 Caracterización reológica de las emulsiones | 46 |
| 3.4.2.3 Punto de inversión de fase | 47 |
| 3.4.2.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada | 49 |
| 3.4.2.5 Efecto del agente tensoactivo sobre las emulsiones | 49 |
| 3.4.3 Sistema U | 50 |
| 3.4.3.1 Caracterización reológica del aceite crudo | 50 |
| 3.4.3.2 Caracterización reológica de las emulsiones | 51 |
| 3.4.3.3 Punto de inversión de fase | 52 |
| 3.4.3.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada | 53 |
| 3.4.3.5 Efecto del agente tensoactivo sobre las emulsiones | 54 |

Capítulo 4. Ajuste de datos experimentales para estimar la viscosidad de emulsiones

| | |
|---|----|
| 4.1 Procesado de datos experimentales | 56 |
| 4.1.1 Datos procesados para las emulsiones agua-aceite pesado "A" | 57 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1.2 Datos procesados para las emulsiones agua-aceite pesado “T” | 59 |
| 4.1.3 Datos procesados para las emulsiones agua-aceite pesado “U” | 61 |
| 4.2 Evaluación de los modelos de regresión | 63 |
| 4.2.1 Criterios de evaluación | 64 |
| 4.2.2 Resultados de la evaluación | 66 |
| 4.3 Ajuste de datos experimentales | 67 |
| 4.3.1 Viscosidad de aceites “A”, “T”, y “U” | 67 |
| a) Aceite pesado “A” | 67 |
| b) Aceite pesado “T” | 68 |
| c) Aceite pesado “U” | 68 |
| 4.3.2 Viscosidad de las emulsiones | 68 |
| Capítulo 5. Evaluación | 70 |
| 5.1 Resultados para el aceite pesado “A” | 70 |
| 5.1.1 Correlación para la viscosidad del aceite pesado “A” | 70 |
| 5.1.2 Correlación para la viscosidad de las emulsiones | 72 |
| a) Evaluación considerando únicamente datos experimentales | 73 |
| b) Evaluación considerando valores calculados de la viscosidad del aceite “A” | 74 |
| 5.2 Resultados para el aceite pesado “T” | 76 |
| 5.2.1 Correlación para la viscosidad del aceite pesado “T” | 76 |
| 5.2.2 Correlación para la viscosidad de las emulsiones | 77 |
| a) Evaluación considerando únicamente datos experimentales | 78 |
| b) Evaluación considerando valores calculados de la viscosidad del aceite “T” | 79 |
| 5.3 Resultados para el aceite pesado “U” | 81 |
| 5.3.1 Correlación para la viscosidad del aceite pesado “U” | 81 |
| 5.3.2 Correlación para la viscosidad de las emulsiones | 82 |
| a) Evaluación considerando únicamente datos experimentales | 83 |
| b) Evaluación considerando valores calculados de la viscosidad del aceite “U” | 84 |

| | |
|---|----|
| Conclusiones y recomendaciones | 86 |
| Nomenclatura | 89 |
| Referencias bibliográficas | 91 |
| Anexo A. Datos técnicos | 95 |
| Anexo B. Datos reológicos experimentales | 99 |

Lista de figuras

| | | |
|---------------------|--|----|
| Figura 2.1. | Tipos de emulsiones para sistemas de aceite y agua: (a) agua en aceite; (b) aceite en agua; (c) agua en aceite en agua; y (d) aceite en agua en aceite | 6 |
| Figura 2.2. | Viscosidad de una emulsión en función de la fracción volumétrica de agua | 8 |
| Figura 2.3. | Representación esquemática en el arreglo de las moléculas de tensoactivo alrededor de la concentración micelar crítica (CMC) | 13 |
| Figura 3.1. | Reómetro Anton-Parr MCR-301 | 27 |
| Figura 3.2. | Geometría de cilindros concéntricos CC27/CX 12781 | 28 |
| Figura 3.3. | Geometría de platos paralelos PP50 | 28 |
| Figura 3.4. | Mezclador IKA T25 | 29 |
| Figura 3.5. | Elementos de dispersión del mezclador IKA T25 | 29 |
| Figura 3.6. | Sistema para el tratamiento del agua | 30 |
| Figura 3.7. | Densímetro | 30 |
| Figura 3.8. | Comportamiento reológico del aceite crudo de prueba APPRA Constituciones a 25°C | 31 |
| Figura 3.9. | Comportamiento reológico – emulsión agua y aceite de referencia a una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} | 34 |
| Figura 3.10. | Comportamiento reológico – emulsión agua y aceite de referencia a una velocidad de corte de 50 s^{-1} | 34 |
| Figura 3.11. | Comportamiento reológico – emulsión agua y aceite de referencia a una velocidad de corte de 100 s^{-1} | 35 |
| Figura 3.12. | Viscosidad de la emulsión: 50% agua-50% aceite de referencia | 37 |
| Figura 3.13. | Viscosidad de la emulsión 60% agua- 40% aceite de referencia | 37 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 3.14. | Viscosidad de la emulsión 70% agua- 30% aceite de referencia | 38 |
| Figura 3.15. | Emulsión débil en reposo y medición del agua separada ... | 39 |
| Figura 3.16. | Comportamiento reológico del aceite pesado “A”, a diferentes temperaturas | 40 |
| Figura 3.17. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C | 42 |
| Figura 3.18. | Efecto de la fracción volumétrica de agua sobre la viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes temperaturas y una velocidad de corte = 0.01 s ⁻¹ | 43 |
| Figura 3.19. | Comparación entre los valores de viscosidad para emulsiones con el aceite pesado “A”, sin y con agente tensoactivo Q-233, para diferentes valores de fracción volumétrica de agua, una velocidad de corte de 0.01 s ⁻¹ y una temperatura de 30°C | 45 |
| Figura 3.20. | Comportamiento reológico del aceite pesado “T”, a diferentes temperaturas | 46 |
| Figura 3.21. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C | 47 |
| Figura 3.22. | Efecto de la fracción volumétrica de agua sobre la viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes temperaturas y una velocidad de corte = 0.01 s ⁻¹ | 48 |
| Figura 3.23. | Comparación entre los valores de viscosidad para emulsiones con el aceite pesado “T”, sin y con agente tensoactivo Q-233, para diferentes valores de fracción volumétrica de agua, una velocidad de corte de 0.01 s ⁻¹ y una temperatura de 30°C | 50 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 3.24. | Comportamiento reológico del aceite pesado “U”, a diferentes temperaturas | 51 |
| Figura 3.25. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C | 52 |
| Figura 3.26. | Efecto de la fracción volumétrica de agua sobre la viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, A diferentes temperaturas y una velocidad de corte = 0.01 s ⁻¹ | 53 |
| Figura 3.27. | Comparación entre los valores de viscosidad para emulsiones con el aceite pesado “U”, sin y con agente tensoactivo Q-233, para diferentes valores de fracción volumétrica de agua, una velocidad de corte de 0.01 s ⁻¹ y una temperatura de 30°C | 55 |
| Figura 4.1. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 30°C | 57 |
| Figura 4.2. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 40°C | 58 |
| Figura 4.3. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 50°C | 58 |
| Figura 4.4. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 60°C | 59 |
| Figura 4.5. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a 30°C | 59 |
| Figura 4.6. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a 40°C | 60 |
| Figura 4.7. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a 50°C | 60 |
| Figura 4.8. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a 60°C | 61 |
| Figura 4.9. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a 30°C | 61 |

| | | |
|---------------------|---|----|
| Figura 4.10. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a 40°C | 62 |
| Figura 4.11. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a 50°C | 62 |
| Figura 4.12. | Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a 60°C | 63 |
| Figura 5.1. | Viscosidad calculada vs viscosidad medida para el aceite pesado “A” | 72 |
| Figura 5.2. | Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “A”, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite | 74 |
| Figura 5.3. | Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “A”, considerando valores calculados de la viscosidad del aceite | 75 |
| Figura 5.4. | Viscosidad calculada vs viscosidad medida para el aceite pesado “T” | 77 |
| Figura 5.5. | Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “T”, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite | 79 |
| Figura 5.6. | Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “T”, considerando valores calculados de la viscosidad del aceite | 80 |
| Figura 5.7. | Viscosidad calculada vs viscosidad medida para el aceite pesado “U” | 82 |
| Figura 5.8. | Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “U”, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite | 84 |
| Figura 5.9. | Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “U”, considerando valores calculados de la viscosidad del aceite | 85 |
| Figura B.1. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos | |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| | de agua y 30 °C | 99 |
| Figura B.2. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 40 °C | 100 |
| Figura B.3. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 50 °C | 100 |
| Figura B.4. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C | 101 |
| Figura B.5. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 30 °C | 101 |
| Figura B.6. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 40 °C | 102 |
| Figura B.7. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 50 °C | 102 |
| Figura B.8. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C | 103 |
| Figura B.9. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 30 °C | 103 |
| Figura B.10. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 40 °C | 104 |
| Figura B.11. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 50 °C | 104 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| Figura B.12. | Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C | 105 |
|---------------------|--|-----|

Lista de tablas

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabla 2.1 | Correlaciones para calcular la viscosidad de emulsiones de agua y aceite | 22 |
| Tabla 3.1 | Características de las muestras de aceite crudo analizadas ... | 26 |
| Tabla 3.2 | Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada, para emulsiones inestables con el aceite pesado “A”, a 25 °C | 44 |
| Tabla 3.3 | Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada, para emulsiones inestables con el aceite pesado “T”, a 25 °C | 49 |
| Tabla 3.4 | Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada, para emulsiones inestables con el aceite pesado “U”, a 25 °C | 54 |
| Tabla 4.1 | Relaciones funcionales consideradas en el desarrollo del modelo de regresión | 64 |
| Tabla 4.2 | Evaluación de modelos para calcular la viscosidad de las emulsiones | 66 |
| Tabla 4.3 | Constantes de la correlación para calcular la viscosidad de emulsiones | 69 |
| Tabla 5.1 | Evaluación de la correlación para la viscosidad del aceite pesado “A” | 71 |
| Tabla 5.2 | Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite pesado “A” | 73 |
| Tabla 5.3 | Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando valores calculados de viscosidad del aceite pesado “A” | 75 |
| Tabla 5.4 | Evaluación de la correlación para la viscosidad del aceite pesado “T” | 77 |

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabla 5.5 | Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite pesado “T” | 78 |
| Tabla 5.6 | Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando valores calculados de viscosidad del aceite pesado “T” | 79 |
| Tabla 5.7 | Evaluación de la correlación para la viscosidad del aceite pesado “U” | 82 |
| Tabla 5.8 | Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite pesado “U” | 83 |
| Tabla 5.9 | Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando valores calculados de viscosidad del aceite pesado “U” | 85 |
| Tabla A.1 | Ficha técnica del reómetro Anton Paar MCR-301 | 95 |
| Tabla A.2 | Características del mezclador IKA T25 | 96 |
| Tabla A.3 | Características del agua des-ionizada ultrapura (tipo I) | 96 |
| Tabla A.4 | Características del aceite crudo de referencia | 97 |
| Tabla A.5 | Agentes tensoactivos | 98 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El petróleo crudo es uno de los recursos naturales más importantes para México. Su explotación y transformación permiten satisfacer las necesidades energéticas de los sectores productivos del país, contribuyendo al crecimiento económico de la nación. Ahora bien, actualmente la industria petrolera enfrenta retos importantes para sostener la producción de hidrocarburos debido a que los campos más importantes de petróleo convencional han alcanzado su etapa de declinación.

De esta manera, en los últimos años Petróleos Mexicanos (PEMEX) ha orientado sus proyectos de inversión hacia la exploración y explotación de los recursos no convencionales, particularmente los yacimientos de aceite pesado y extrapesado. En este sentido, cabe subrayar que el 62.2% de las reservas probadas de petróleo crudo (estimadas en 9,711 MMb; SENER, 2016) corresponden a aceite pesado. En lo que respecta a la producción nacional diaria, el 55.6% es de este tipo.

Una de las problemáticas inherentes a la explotación de los aceites pesados y extrapesados radica en que estos presentan un comportamiento reológico complejo. Dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, su viscosidad puede alcanzar valores de hasta 10^5 cp. Aún más, la viscosidad puede incrementarse en uno o más órdenes de magnitud cuando el aceite forma emulsiones con el agua del yacimiento. Por lo tanto, el transporte de este tipo de fluidos complejos en pozos y

ductos demanda el uso de tecnologías no convencionales orientadas a reducir la viscosidad.

En años recientes, el estudio de las emulsiones de agua y aceite pesado ha despertado un creciente interés en la industria petrolera en México. Esto se debe a que la mayoría de los grandes campos costa afuera de aceite pesado alcanzaron su etapa de madurez, y actualmente producen cantidades importantes de agua de formación (cortes de agua de 20 a 60%). En tales condiciones, es común que se formen emulsiones en el sistema integral de producción, causando daño en los yacimientos, fallas en los equipos de bombeo electro-centrífugo de los pozos, y problemas operativos en la deshidratación, bombeo y transporte en la superficie. El interés es aún mayor pues se espera que los nuevos campos descubiertos de aceite pesado y extrapesado eventualmente comenzarán a producir agua en el corto plazo.

Por lo tanto, en el trabajo presente se investigará el comportamiento reológico de emulsiones de agua y aceite pesado de tres campos costa afuera de México. Con base en los resultados experimentales obtenidos, se desarrollarán correlaciones para estimar la viscosidad de las emulsiones generadas con cada uno de los aceites analizados.

1.1 OBJETIVO GENERAL

El trabajo presente está orientado a la investigación experimental del comportamiento reológico de emulsiones de agua y aceite, para muestras de crudo de tres campos marinos de México, productores de aceite pesado, y tiene como objetivo:

“Investigar el comportamiento reológico de las emulsiones de agua y aceite, para muestras de crudos pesados de campos marinos en México”.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del proyecto son:

1. Realizar una revisión del estado del arte relacionado con los conceptos fundamentales en relación a la formación, estabilidad, inversión de fases, y reología de emulsiones de agua y aceite. Asimismo, revisar correlaciones para predecir la viscosidad de estas emulsiones.
2. Realizar pruebas experimentales para caracterizar el comportamiento reológico de muestras de aceites pesados de tres campos costa afuera en México.
3. Estudiar experimentalmente el efecto del corte de agua, la velocidad de corte, la temperatura, y el uso de surfactantes, en el comportamiento reológico de emulsiones generadas con los aceites pesados recolectados.
4. Identificar el punto de inversión de fases de las emulsiones analizadas.
5. Cuantificar las fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada.
6. Desarrollar modelos de ajuste para predecir la viscosidad de emulsiones para los crudos seleccionados, con base en los datos experimentales obtenidos.

1.3 CONTENIDO DE LA TESIS

Los conceptos y definiciones principales en el estudio de las emulsiones de agua y aceite se abordan en el capítulo 2. Se describen los factores que afectan la viscosidad de éstas emulsiones. Se presenta un resumen de algunos estudios experimentales sobre su formación, estabilidad y reología. Se mencionan diferentes tipos de agentes tensoactivos para la generación de las mismas. Finalmente, se presenta un resumen de las correlaciones para predecir la viscosidad.

En el capítulo 3 se describe la metodología experimental y el equipo de laboratorio utilizado para caracterizar el comportamiento reológico de las emulsiones formadas con muestras de aceite crudo pesado de tres campos marinos de México. Se presentan y discuten los resultados experimentales obtenidos. Los datos técnicos de

los equipos utilizados se indican en el anexo A. Por otra parte, los resultados experimentales recolectados se incluyen en el anexo B.

Las correlaciones desarrolladas para calcular la viscosidad relativa de las emulsiones formadas con los aceites pesados analizados se presentan en el capítulo 4. Se indican las relaciones funcionales consideradas en el desarrollo de las correlaciones, y se evalúan con la finalidad de identificar la mejor en cada caso.

En el capítulo 5 se discute la evaluación estadística de las correlaciones seleccionadas para predecir la viscosidad relativa de las emulsiones formadas con los aceites en estudio. Asimismo, se presenta la correlación propuesta para calcular la viscosidad de cada aceite en función de la velocidad de corte y la temperatura.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta tesis.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE EMULSIONES AGUA-ACEITE

Se analizan y discuten los principales estudios experimentales sobre la formación, estabilidad y reología de emulsiones de agua y aceite. Se describen los factores que afectan la viscosidad de una emulsión. Se mencionan diferentes tipos de agentes tensoactivos para la generación de emulsiones. Se presenta un resumen de trabajos experimentales orientados al estudio de la emulsiones. Finalmente, se presenta un resumen de las diversas correlaciones que existen en literatura para predecir la viscosidad de emulsiones agua - aceite.

2.1 ANTECEDENTES

Una emulsión es una dispersión homogénea de gotas de un líquido dentro de otro líquido inmiscible. La fase que se presenta en forma de gotas se denomina fase dispersa o interna; por otra parte, aquella en la cual las gotas están suspendidas es la fase continua o externa. Tanto el medio de dispersión y la fase dispersa tienen una superficie de frontera que las delimita; la forma del medio de dispersión es cóncava, mientras que la de la fase dispersa es convexa (Berkman y Egloff, 1941).

En el caso de la industria petrolera, las emulsiones de interés están conformadas por aceite y agua de los yacimientos. Dependiendo de los agentes emulsionantes y el porcentaje en volumen de cada una de las fases, estas emulsiones pueden ser de agua en aceite (W/O), aceite en agua (O/W), o dobles (agua en aceite en agua, W/O/W; o aceite en agua en aceite, O/W/O), como se muestra en la **Figura 2.1**. Cabe destacar que la fracción volumétrica de las fases que marca el cambio de una emulsión W/O a O/W, o viceversa, se denomina punto de inversión de fases.

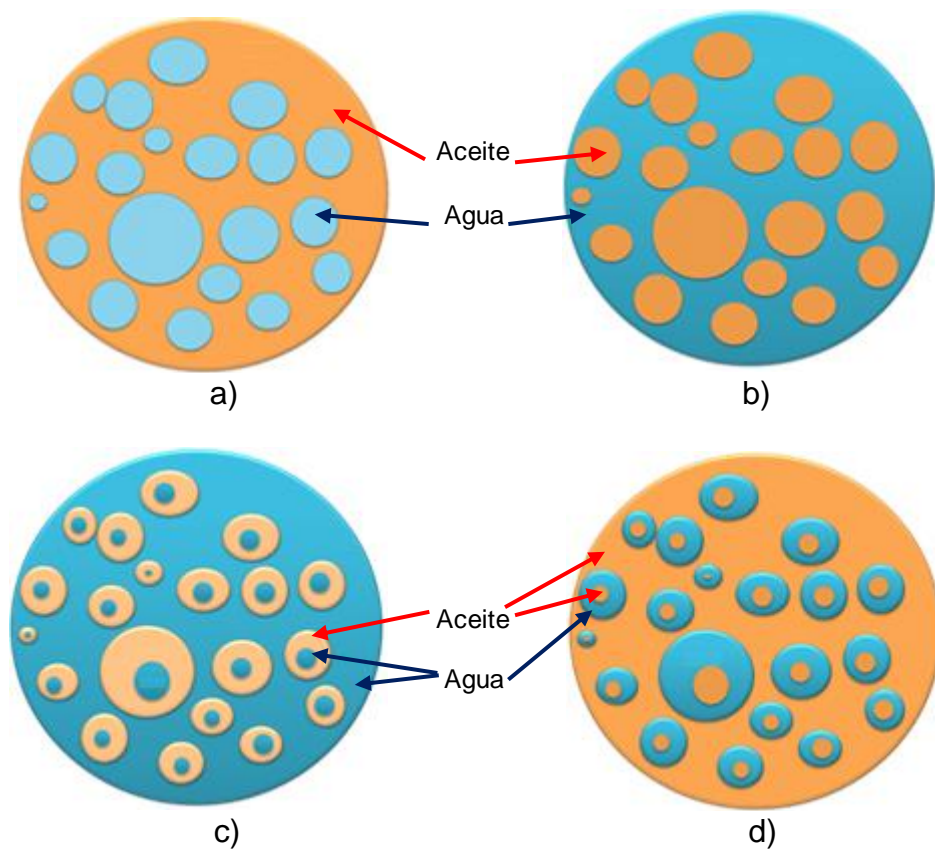


Figura. 2.1 Tipos de emulsiones para sistemas de aceite y agua (Pascuali, 2009): (a) agua en aceite; (b) aceite en agua; (c) agua en aceite en agua; y (d) aceite en agua en aceite.

En el sistema integral de producción pueden formarse emulsiones estables de aceite crudo y agua por diversos factores; por ejemplo, en el yacimiento por efecto de la adición de fluidos de perforación o productos químicos de terminación o estimulación; debido a caídas de presión súbitas a través del estrangulador; o como resultado del mezclado turbulento de los fluidos en los equipos de bombeo electro-centrífugo en el fondo de los pozos, y en las bombas en las instalaciones superficiales. Estas emulsiones son principalmente del tipo agua en aceite.

El estudio teórico-experimental de las emulsiones es importante debido a que éstas pueden tener un comportamiento reológico complejo, con repercusiones importantes en el transporte de los fluidos producidos desde el yacimiento hasta las instalaciones superficiales (Ronningsen, 1995). Por ejemplo, para calcular los perfiles de presión en ductos y estimar los requerimientos de energía de los equipos de bombeo, es necesario saber si se forman emulsiones y, de ser así, determinar su viscosidad aparente.

Como puede observarse en la **Figura 2.2**, al aumentar la fracción volumétrica de agua, la viscosidad aparente de la emulsión (W/O) puede incrementarse sustancialmente hasta alcanzar un valor máximo en el punto de inversión de fases. Si la fracción volumétrica de agua continúa aumentando, la viscosidad del sistema (O/W) se reduce súbitamente hasta alcanzar valores cercanos a la del agua. Cabe agregar que el comportamiento reológico de las emulsiones puede ser newtoniano o no-newtoniano, dependiendo de la temperatura, la composición y el esfuerzo cortante.

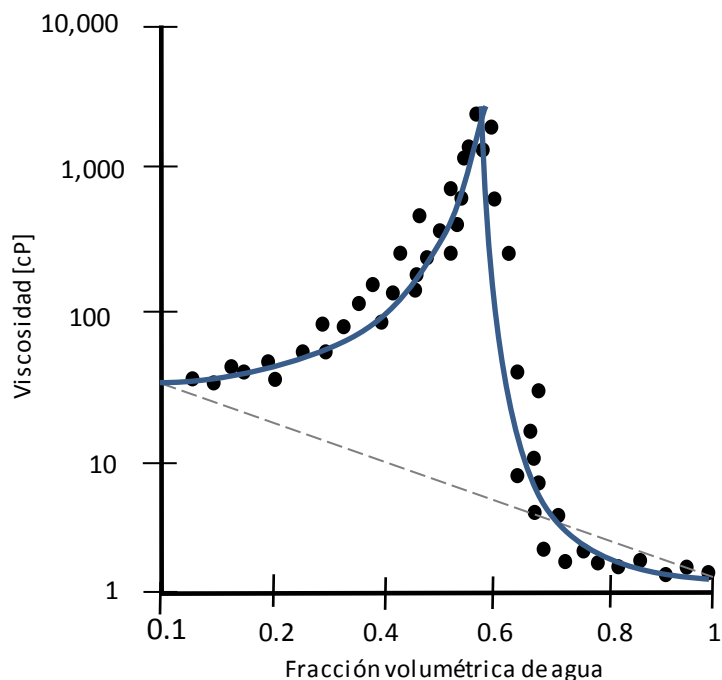


Figura 2.2 Viscosidad de una emulsión en función de la fracción volumétrica de agua

2.1.1 Factores que afectan la viscosidad de las emulsiones

En los trabajos de investigación en relación a las emulsiones de agua en aceite se encontró que la viscosidad depende principalmente de los factores siguientes (Kumar, 1985; Ronningsen, 1995; Sefton, 2010; Ashrafizadeh y Kamran, 2010): fracción volumétrica de la fase dispersa, viscosidad de la fase continua, viscosidad de la fase dispersa, velocidad de corte (si es no newtoniano), temperatura, naturaleza y concentración de los agentes emulsionantes, tamaño promedio y distribución de la gota, presencia de sólidos (orgánicos y/o inorgánicos) contenidos en la fase dispersa, densidad de los componentes, edad de la emulsión, tensión interfacial y pH del agua.

Si bien todos los elementos anteriormente mencionados afectan la viscosidad de una emulsión, la fracción volumétrica de agua y la temperatura son los más importantes. Así, la viscosidad de la emulsión se reduce conforme aumenta la temperatura, debido principalmente a la reducción de la viscosidad del aceite.

Con respecto al efecto del tamaño promedio de la gota, la viscosidad de las emulsiones se incrementa conforme las gotas se hacen más pequeñas. Ahora bien, Schramm (1992) y Ronningsen (1995), refieren que se ha mostrado que el efecto de este parámetro es pequeño a concentraciones inferiores al 40% de la fase dispersa.

A medida que la concentración de la fase dispersa se incrementa, también el número y tamaño de las gotas se incrementa, ocasionando una resistencia de flujo hacia los espacios libres, por lo que cada vez el movimiento hacia esos espacios es menor (Kumar,1985). La distribución del tamaño de la gota tiene un papel importante cuando la fracción en volumen de la fase dispersa es alta. Cuando la concentración es baja, su efecto es pequeño (Schramm, 1992). Mientras más pequeño y uniforme sea el tamaño de la gota, mayor será la viscosidad (Ronningsen, 1995).

En cuanto a la viscosidad del agua, no afecta la viscosidad del sistema debido a que es prácticamente constante. Por lo tanto, la del aceite es la que tiene un mayor impacto en la viscosidad de la emulsión. Así, como se describe en secciones posteriores, en los modelos de predicción generalmente se considera que esta última es proporcional a la del aceite. En este contexto se define una viscosidad relativa, μ_r , como:

$$\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_o} , \dots\dots\dots (2.1)$$

donde μ_a es la viscosidad aparente de la emulsión y μ_o es la viscosidad del aceite.

Como se mencionó, uno de los factores más importantes que afectan la viscosidad de una emulsión es la fracción volumétrica del agua. Cuando su concentración se incrementa, las emulsiones comienzan a presentar un comportamiento cada vez más parecido a un fluido no newtoniano. Algunos autores reportan que las emulsiones de agua en aceite crudo con una fracción volumétrica de agua mayor al 10%, en general exhiben una dependencia no lineal de la viscosidad relativa con respecto al porcentaje en volumen de agua (Ronningsen, 1995).

La velocidad de corte influye fuertemente en la viscosidad de la emulsión cuando su comportamiento es no newtoniano. En intervalos relativamente bajos de la fase

dispersa (menor a 40%), las emulsiones muestran un comportamiento newtoniano, y en consecuencia la viscosidad no depende de la velocidad de corte. En porcentajes mayores de la fase dispersa (mayor a 40%), las emulsiones presentan un comportamiento no newtoniano, y su viscosidad aparente disminuye significativamente con el incremento de la velocidad de corte (Schramm, 1992).

El contenido de sólidos influye en la viscosidad debido a que posee tamaño y forma diferente a las gotas esféricas. El incremento de sólidos en una emulsión aumenta la viscosidad. La viscosidad de la emulsión tiende a incrementarse con el esfuerzo de corte, mostrando un comportamiento dilatante. Este comportamiento es más notorio cuando se incrementa la fracción volumétrica de sólidos (Schramm, 1992).

Otro aspecto importante a considerar en el estudio de las emulsiones es su estabilidad, la cual depende de las propiedades físicas propias de su composición y de la forma en que se formaron (Kumar,1985). En este sentido, puede mencionarse que la tensión interfacial entre el aceite y el agua proporciona estabilidad a la emulsión. En general las emulsiones W/O o O/W son termodinámicamente inestables, por lo que las gotas de agua y aceite tienden a separarse. Para formar una emulsión estable es necesario un emulsionante o agente surfactante que reduzca la tensión interfacial y promueva la formación de gotas pequeñas. Los emulsionantes permiten formar una barrera visco-elástica evitando la coalescencia de las gotas. La película interfacial rígida sobre la superficie de la fase dispersa inhibe el proceso de coalescencia. Esta película interfacial está formada por algunas especies que actúan en esta superficie, tales como sólidos finos (Al-Yaari, 2015).

A medida que la temperatura de una emulsión se incrementa, la película que el emulsionante forma alrededor de la fase dispersa disminuye hasta que se rompe. Por otro lado, cuando la concentración de la fase dispersa aumenta, la película que forma el agente emulsionante se adelgaza, y puede romperse fácilmente con el incremento de la velocidad de corte y la temperatura (Kumar, 1985).

De acuerdo a Ashrafizadeh y Kamran (2010), la concentración de surfactante es un factor que influye también en las emulsiones. Al estudiar el efecto en las emulsiones

O/W, se ha observado que el incremento en su concentración provoca un incremento en la viscosidad de la emulsión, pero de forma simultánea se incrementa significativamente la estabilidad. El incremento en la concentración de surfactante aumenta el conjunto de barreras entre las dos fases y da una mejor distribución de las gotas dispersas en la fase continua.

El incremento en la velocidad y tiempo de mezclado en la formación de las emulsiones genera un incremento ligero de la viscosidad, y tiene un efecto estabilizador. Por otro lado, la calidad de las emulsiones disminuye a bajas velocidades y tiempos cortos de mezclado. Una mayor velocidad y tiempo de mezclado producen gotas de tamaño pequeño, lo cual incrementa el área interfacial y la interacción partícula a partícula, lo cual finalmente aumenta la estabilidad de la emulsión.

El contenido de sal en el agua empleada para formar una emulsión afecta la viscosidad y la estabilidad. Para una emulsión O/W formada con un agente surfactante, Ashrafizadeh y Kamran (2010) mencionan que la viscosidad aumenta al incrementarse la concentración de sal. Al mismo tiempo los iones actúan como barreras entre las gotas de aceite y las gotas de agua. De esta manera, el incremento de la salinidad en la fase acuosa resulta en una mejor estabilidad de la emulsión.

Ashrafizadeh y Kamran (2010) también mencionan que el incremento del pH tiene un efecto despreciable en la viscosidad de la emulsión, pero que incrementa significativamente su estabilidad. El incremento del pH del agua en las emulsiones O/W, de 6 a 9, incrementa el valor absoluto del potencial z de las gotas, el cual resulta en la formación de emulsiones con mayor estabilidad. Esto se atribuye a que las moléculas de surfactante se agrupan mejor cuando se tienen valores de pH altos.

2.1.2 Agentes tensoactivos y emulsiones

El transporte de aceites pesados en ductos es complicado debido a la alta viscosidad que puede exhibir este tipo de fluidos. Una forma de transporte consiste en reducir su viscosidad mediante la generación de emulsiones estables de agua y aceite con agentes surfactantes diseñados para tal efecto. Así, el surfactante genera una monocapa en la interfase agua-aceite que evita el crecimiento de la gota y la separación de las fases.

Las características de las emulsiones generadas dependerán de las propiedades de la cabeza hidrofílica polar y la cola hidrófoba no polar del tensoactivo (surfactante). Cabe mencionar que la presencia de partículas hidrofílicas naturales en el aceite crudo, tales como arcilla y sílice, pueden causar la inestabilidad de la emulsión.

Un parámetro importante en la formación de emulsiones con tensoactivos es la concentración micelar crítica (CMC), la cual es la concentración del tensoactivo en la que se alcanza la mínima tensión superficial; es también la concentración de tensoactivo por debajo de la cual las micelas se forman espontáneamente. La CMC es un parámetro característico para cada agente tensoactivo. Para valores inferiores a esta concentración, todo el tensoactivo presente en solución se encuentra en forma de monómeros ubicados en la interfase, mientras que a valores más altos, algunas moléculas de tensoactivo se encuentran en forma micelar (Jiménez, Medina, y Gracida, 2010). Una representación esquemática en el arreglo de las moléculas de tensoactivo alrededor de la concentración micelar crítica (CMC), se muestra en la **Figura 2.3**.

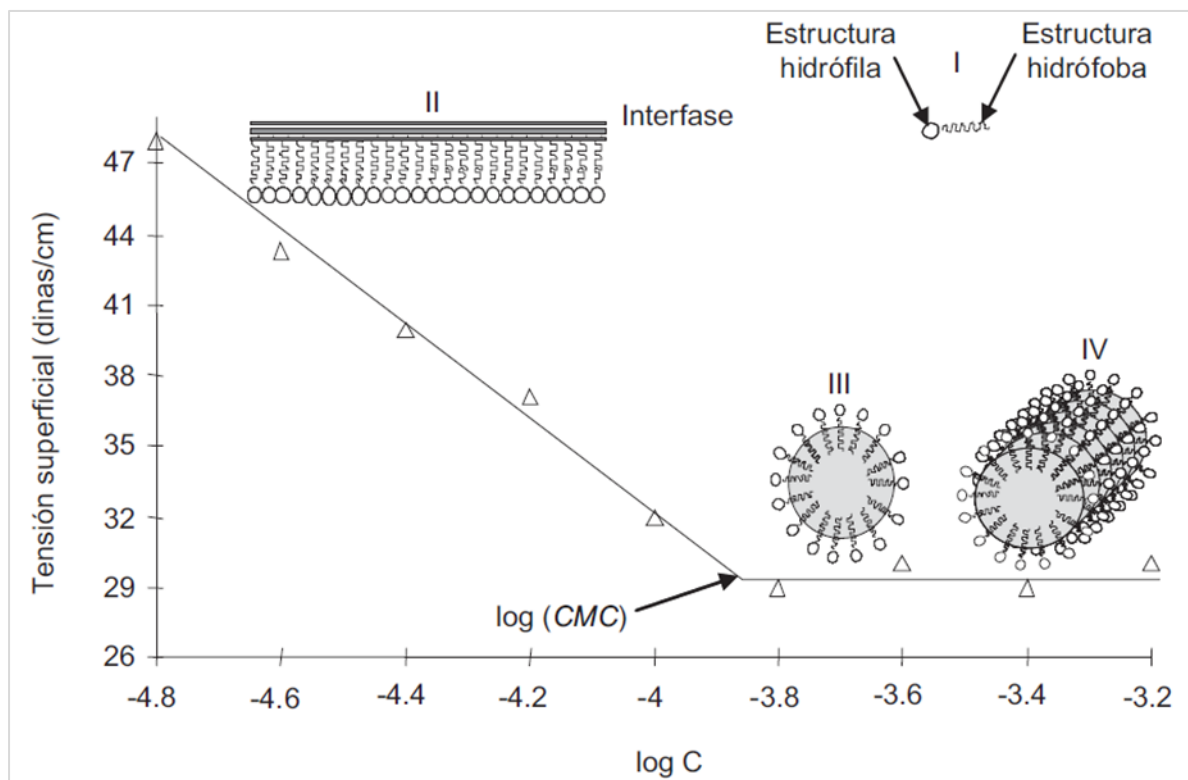


Figura 2.3 Representación esquemática en el arreglo de las moléculas de tensoactivo alrededor de la concentración micelar crítica (CMC): I) Molécula de tensoactivo; II) por debajo de la CMC, todo el tensoactivo se encuentra en forma de monómeros; III) por arriba de la CMC, el tensoactivo se encuentra formando micelas; IV) a concentraciones mucho mayores a la CMC se forman superestructuras como arreglos cilíndricos de micelas (Jiménez, Medina, y Gracida, 2010).

Según su estructura hidrofílica, los tensoactivos químicos pueden dividirse en iónicos y no iónicos. Los tensoactivos iónicos se caracterizan por presentar en su estructura hidrofílica grupos funcionales con cargas eléctricas negativas (aniónicos), o positivas (catiónicos), mientras que los no iónicos no presentan carga (Jiménez, Medina, y Gracida, 2010).

En los tensoactivos no iónicos se encuentra la subfamilia de los alcoholes grasos etoxilados. La mayoría de estos alcoholes grasos carecen de propiedades tensoactivas debido a su insolubilidad en agua, por lo que se hacen reaccionar con polioxietileno; esto les confiere el carácter hidrofílico deseado. Estas sustancias pueden ser líquidas o sólidas, duras a temperatura ambiente dependiendo del grado de etoxilación.

Los alcoholes grasos etoxilados se usan como emulsionantes O/W y W/O. Normalmente se usan mezclas de varios de ellos, ya que esto aumenta su capacidad para estabilizar las emulsiones.

2.2 ESTUDIOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presenta un resumen de los trabajos experimentales realizados por diversos autores relacionados con la caracterización de emulsiones de agua y aceite. Como se describe a continuación, algunos de ellos están orientados al estudio de la estabilidad, a la caracterización reológica y desarrollo de modelos predictivos de la viscosidad, a la determinación del punto de inversión de fases, o al uso de agentes tenso-activos para reducir la viscosidad.

2.2.1 Estudios reológicos

En 1985, Kumar y Vasan estudiaron el comportamiento reológico de emulsiones de agua en aceite crudo. Determinaron que los sistemas analizados presentaban un comportamiento reológico pseudo-plástico. Sin embargo, a temperaturas superiores a 65°C observaron que seguían un comportamiento newtoniano, y lo atribuyeron a inestabilidad de la emulsión y la separación de las fases. Propusieron un modelo de ley de potencias para describir el comportamiento no newtoniano, y desarrollaron una correlación para la dependencia de la viscosidad con respecto a la concentración de las fases.

Pilehvari et al. (1988), estudiaron el comportamiento de emulsiones generadas con cuatro diferentes tipos de aceite crudo, con viscosidades de 2,000 a 500,000 cp. Las emulsiones se formaron con concentraciones de 60 a 72.5% de aceite, y un agente tensoactivo. Determinaron que el comportamiento del esfuerzo y la velocidad de corte dependen fuertemente del tamaño de la gota de aceite. Por una parte, el comportamiento no newtoniano de la viscosidad aparente se incrementa cuando disminuye el tamaño de la gota. La mayoría de las emulsiones mostraron una fuerte dependencia de la velocidad de corte cuando ésta era menor a 50 s⁻¹, y un

comportamiento newtoniano a velocidades cercanas a 1000 s^{-1} . Los autores concluyeron que el modelo de ley de potencias no era suficiente para describir el comportamiento reológico de las emulsiones analizadas. Asimismo, que el tamaño de la gota es el factor dominante en el comportamiento de las emulsiones.

En 1995, Ronningsen desarrolló una correlación para estimar la viscosidad aparente de emulsiones de agua en aceite. Para tal efecto, utilizó ocho muestras de aceite crudo de seis campos del Mar del Norte. Las muestras incluían aceites moderadamente biodegradables (aromáticos/nafténicos), aceites cerosos y aceites ligeramente parafínicos. Las emulsiones se prepararon sintéticamente para simular el agua de formación característica de los campos. La solución se mantuvo con un pH neutro. Los experimentos se realizaron a diferentes temperaturas, fracciones volumétricas de agua, y velocidades de corte. Todos los aceites formaron emulsiones estables agua-aceite a $35 \text{ }^\circ\text{C}$, sin necesidad de agregar agentes emulsionantes. A temperaturas superiores a los 40°C algunas de las emulsiones fueron inestables. La correlación empírica propuesta por el autor depende de la temperatura y la fracción volumétrica de agua.

Pierre et al. (2004), estudiaron experimentalmente el comportamiento reológico y la estructura del aceite crudo cuando incorporaban asfaltenos y resinas, que son los dos componentes más polares del aceite. Su estudio se realizó a niveles macroscópico y microscópico. Los resultados obtenidos mostraron que la viscosidad depende en mayor medida de los asfaltenos. Asimismo, que las resinas permiten reducir el efecto de los asfaltenos sobre la viscosidad.

Por otra parte, Farah et al. (2005), investigaron el comportamiento reológico de emulsiones con seis muestras de aceite crudo de campos en Brasil, con densidad de 15 a 40° API, desde aromáticos pesados hasta parafínicos ligeros. Los autores refieren que las emulsiones con aceites de una densidad mayor de 38° API fueron más difíciles de estabilizar. Las emulsiones se realizaron a fracciones volumétricas de 10 a 60% de una solución salina con 50 kg de sodio por m^3 , a presión atmosférica. Los experimentos se realizaron a diferentes velocidades de corte y temperaturas. La correlación propuesta para la viscosidad cinemática de la emulsiones es función de la temperatura, la fracción volumétrica de agua y la temperatura de formación de ceras.

Dan y Jing (2006), desarrollaron un modelo teórico para la predicción de la viscosidad de emulsiones agua-aceite no-newtonianas. Validaron su modelo con datos experimentales de siete muestras de aceite crudo, una de la cuales corresponde a un aceite pesado con 534 cp a 60°C, y las otras seis corresponden al tipo aceite ceroso con viscosidades de 46.3 a 137.6 cp, a una temperatura de 30°C. El modelo propuesto depende de la velocidad de corte, y la fracción volumétrica de agua mínima y máxima de las emulsiones.

Debido a la alta viscosidad que poseen algunos aceites crudos, se ha investigado el uso de surfactantes para generar emulsiones de aceite en agua (O/W) y disminuir la viscosidad, mejorando su transporte en tuberías. Por ejemplo, Ashrafizadeh y Kamran (2010) generaron emulsiones de aceite en agua con un surfactante, y observaron que la viscosidad aparente de las emulsiones analizadas se redujo de manera significativa en comparación con la del aceite original. En los experimentos utilizaron una muestra de aceite iraní y una mezcla de diésel con bitumen para simular un aceite extrapesado. El surfactante utilizado para generar las emulsiones de aceite en agua fue Triton X-100. Los autores determinaron que las emulsiones formadas eran del tipo aceite en agua a concentraciones menores al 60% en volumen de aceite; a valores mayores las emulsiones fueron de agua en aceite. Los autores encontraron que la viscosidad de las emulsiones crece y la estabilidad aumenta con el incremento de la concentración del tenso-activo, la velocidad de mezclado, la concentración de sal y el pH de la fase acuosa.

En 2010, Sefton y Sinton estudiaron emulsiones agua-aceite para muestras de bitumen de la región de Athabasca en Alberta, Canadá. Las muestras tenían una densidad de 8° API. Las emulsiones se formaron con agua a 10, 20, 30 y 40% en volumen. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo a temperaturas de 70 a 88°C, y velocidades de corte de 0.6 a 6.4 s⁻¹. Los autores evaluaron algunos modelos y correlaciones de predicción de viscosidad, y desarrollaron una nueva correlación a partir de la relación funcional propuesta por Ronningsen (1995).

Hasan et al. (2010), estudiaron y evaluaron experimentalmente tres formas de reducir la viscosidad del aceite crudo pesado, las cuales fueron: dilución con aceite ligero;

mezclado de aceite crudo con etanol, alcohol y agua; y por medio de una emulsión de agua en aceite crudo al 20% en agua, con surfactante. Sus experimentos cubrieron un amplio rango de temperaturas y concluyeron que la mezcla de aceite crudo pesado con aceite crudo ligero es el método que mayor disminución de viscosidad proporciona, en segundo lugar está la mezcla de aceite crudo con etanol, alcohol y agua; y en tercer lugar la emulsión de 20% agua en aceite crudo con surfactante.

Martínez et al. (2011) revisaron y documentaron distintas tecnologías y métodos utilizados para el transporte de aceite crudo pesado y extrapesado en instalaciones superficiales. Los métodos que describen se enfocan a la reducción de viscosidad de los aceites crudos pesados y extrapesados por medio de dilución con hidrocarburos ligeros líquidos, o con emulsiones aceite en agua y tensoactivos. También documentaron el calentamiento del aceite crudo y tuberías para aquellos ambientes con temperatura inferior a 0°C. Revisaron tecnologías para reducción de fricción en tuberías, teniéndose: reductores del punto de fluidez, mejoradores de flujo, flujo anular con el aceite en la fase central, y mejora del aceite crudo por medios sintéticos.

En 2014, Sandoval et al. estudiaron el comportamiento de emulsiones de agua en aceite crudo a condiciones de yacimiento con un equipo desarrollado en Ecopetrol. Las emulsiones se formaron con aceite crudo vivo pesado y extrapesado, a diversas concentraciones de la fase dispersa, con un valor máximo de la fracción volumétrica de agua de 26%. Estudiaron el comportamiento reológico de las emulsiones a diferentes velocidades de corte, una temperatura de 60° C y con diferentes presiones, hasta 24.2 MPa. Sus resultados les permitieron concluir que las emulsiones generadas a las condiciones de estudio presentaban un comportamiento newtoniano, así como un comportamiento logarítmico de la viscosidad con respecto a la presión y contenido de agua.

2.2.2 Estudios sobre la formación y estabilidad de las emulsiones

Liu et al. (2006), estudiaron experimentalmente el comportamiento de nano emulsiones con un agente estabilizador. Encontraron que los mecanismos principales para desestabilizar las emulsiones fueron la maduración de Ostwald y la floculación. La floculación tiene un papel mayor cuando la concentración de surfactante es baja. También encontraron que las emulsiones tenían valores negativos de potencial zeta, el cual depende fuertemente del pH de los sistemas.

Maia et al. (2012) analizaron la relación entre la estabilidad de las emulsiones agua en aceite y su comportamiento elástico, considerando también el añejamiento de las mismas y la concentración de asfaltenos. En los experimentos utilizaron una muestra de aceite de un campo en Brasil, de 28.3 °API. Prepararon seis emulsiones: una con el aceite original, y cinco más sintéticas a diferentes concentraciones de los asfaltenos extraídos de la muestra de aceite. Se utilizó una solución acuosa a 50 g/l de NaCl. La fracción volumétrica de agua fue de 40%. Luego de los experimentos realizados, los autores concluyeron que la estabilidad de una emulsión depende de su comportamiento elástico. Las emulsiones que poseen un alto contenido de asfaltenos presentan un módulo de elasticidad mayor y, por lo tanto, mayor estabilidad. Mientras mayor sea la interacción asfaltenos-disolvente, su módulo elástico será menor.

En 2012, Abdurahman et al. Investigaron experimentalmente la formación de emulsiones aceite en agua con dos muestras de aceite crudo pesado de Malasia. Las emulsiones se formaron con surfactante Triton X-100, hasta porcentajes de 68% y 72% de aceite crudo en la emulsión, ya que en estos porcentajes se encontró el punto de inversión de fase. Los autores determinaron que la viscosidad del aceite crudo disminuye cuando se emulsiona con agua y surfactante; de igual forma la viscosidad disminuye cuando el contenido de aceite en la emulsión se reduce, la velocidad de mezclado disminuye y cuando hay un decremento de la salinidad en la fase acuosa. Por otro lado también concluyeron que la estabilidad de las emulsiones aceite en agua de las muestras disminuye cuando el contenido de aceite se incrementa más allá del punto de inversión de fase. Después de ese punto la emulsión se convierte a agua en aceite y su estabilidad se incrementa en proporción al incremento de aceite. La

estabilidad de las emulsiones aceite en agua también se incrementa en proporción al incremento de surfactante, concentración de sal, velocidad y duración de mezclado, pH de la fase acuosa y temperatura de homogeneización.

Kundu et al. (2013), estudiaron experimentalmente la estabilidad de macro emulsiones de aceite (diésel) en agua estabilizadas con un surfactante aniónico. Sus experimentos les permitieron determinar la temperatura de inversión de fase (PIT) para las emulsiones formadas, por medio de su conductividad. También estudiaron el efecto de distintas sales orgánicas sobre el PIT de las emulsiones y la estabilidad de cada una de ellas, utilizando la conductividad, potencial zeta y la turbidez de las emulsiones.

2.2.3 Estudios sobre el punto de inversión de fases

En cuanto al punto de inversión de fases, Ersoy et al. (2009), Zhang et al. (2013), Kumar et al. (2015), Ghloum et al. (2015), entre otros, realizaron investigaciones experimentales para determinar en qué valor de la fracción volumétrica del agua ocurre. La identificación de este punto es importante porque en tal condición las emulsiones alcanzan los valores máximos de viscosidad. En algunos casos puede ser mayor en uno o varios órdenes de magnitud con respecto a la del aceite.

De esta manera, Mira et al. (2003) estudiaron experimentalmente el efecto de la agitación en emulsiones de agua y aceite (keroseno) con surfactante. Los resultados que obtuvieron fue que tanto a bajos como altos niveles de agitación, la inversión catastrófica de emulsiones (ruptura de la emulsión al adicionar agua) ocurre a un menor valor de la fracción volumétrica de agua, que con niveles medios de agitación. También encontraron que después de la inversión de fase, al agregar un pequeño volumen de la fase dispersa, se presentan emulsiones múltiples.

Fortuny et al. (2006), investigaron experimentalmente los efectos del pH, salinidad y contenido de agua en el proceso de rompimiento de emulsiones con microondas. Estudiaron el contenido de agua dentro de las emulsiones después de ser expuestas a microondas. Sus resultados muestran que la mayor eficiencia en el rompimiento de emulsiones con microondas se presenta cuando el porcentaje de agua en la emulsión

es alto (45%) y pH neutro. Sin embargo esto cambia cuando el pH y el contenido de sal son altos, ya que favorecen la estabilidad de la emulsión. El incremento del contenido de sal ocasiona una reducción en la energía de las microondas, requerida para calentar el sistema, ocasionando resultados pobres al romper la emulsión.

Alboudwarej et al. (2007) investigaron el punto de inversión de fases en emulsiones generadas con dos muestras de aceite pesado de Sudamérica. Recombinaron el aceite con gas para representar las condiciones originales del fluido en el yacimiento. Generaron emulsiones de agua en aceite con gas disuelto, así como de agua en aceite a condiciones de tanque (sin gas). Con base en las pruebas de laboratorio realizadas, para los sistemas con aceite muerto encontraron que el punto de inversión se presentó a valores de 60 y 65% en volumen de la fase dispersa (agua). Para el caso del fluido de yacimiento, los autores reportaron que el punto de inversión fue de aproximadamente 55%. Con base en los datos experimentales de viscosidad de las emulsiones analizadas, compararon las predicciones de cuatro modelos de un parámetro existentes en literatura. Al comparar contra datos medidos, determinaron que el error promedio de los valores calculados con los cuatro modelos puede ser hasta del 200%. Finalmente, la información experimental recabada se utilizó para evaluar el desempeño de un equipo de bombeo electro-centrífugo.

Ling et al. (2014) estudiaron la distribución del tamaño de gota de emulsiones agua en aceite, y su evolución al incrementar la concentración de agua hasta el punto de inversión de fase. En las pruebas utilizaron un campo de pulsos generado con un equipo nuclear de resonancia magnética (NMR). Identificaron un incremento exponencial en el tamaño promedio de la gota de agua al ir agregando gotas por debajo del punto de inversión, lo cual es acorde al mecanismo de coalescencia; sin embargo al utilizar surfactantes y formar emulsiones de agua con un hidrocarburo líquido, no se observó algún cambio en el tamaño promedio de la gota al acercarse al punto de inversión de fase. Por otro lado, también estudiaron los resultados del equipo para identificar la presencia de micro emulsiones, las cuales fueron distintas para cada muestra, pero en todos los casos fueron del tipo W/O/W, los datos no mostraron la existencia de emulsiones O/W/O.

Carneiro et al. (2015) usaron un equipo NMR para investigar la separación de fases de emulsiones de agua y aceite crudo, con desulsionantes. Utilizaron un campo bidimensional (2D) de baja frecuencia emitido por el NMR, el cual separa las fases agua y aceite sin necesidad de pruebas físicas. Los autores pudieron comprender visualmente la separación de las emulsiones, cuantificar el volumen de agua y estimar el tamaño de la gota.

Otro experimento realizado con un equipo nuclear de resonancia magnética (NMR), fue el realizado por Vermeir et al. (2016), para analizar el efecto del intercambio molecular en el tamaño de la gota de agua de emulsiones W/O/W. Los autores utilizaron el equipo NMR para generar un campo de pulsos en alta y baja resolución con lo cual midieron la difusión del agua. El resultado de sus experimentos les permitió evaluar la precisión de esta tecnología en la determinación del tamaño de gota en emulsiones W/O/W, e identificar las variables que influyen para obtener una mayor precisión.

2.3 MÉTODOS DE PREDICCIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LAS EMULSIONES

El desarrollo de métodos para predecir la viscosidad de las emulsiones de agua y aceite continúa siendo un tema abierto a la investigación. Los primeros trabajos en este sentido se publicaron desde principios del siglo veinte. Por ejemplo, con base en fundamentos teóricos, en 1933 Richardson propuso una relación exponencial entre la viscosidad relativa, μ_r , y la fracción volumétrica del agua, ϕ (en Ronningsen, 1995):

$$\mu_r = e^{k\phi}, \dots\dots\dots (2.2)$$

donde k es una constante que depende del sistema analizado. Esta ecuación la modifíco posteriormente Broughton y Squires (1938), incorporando un segundo factor de corrección, A :

$$\mu_r = Ae^{k\phi}, \dots\dots\dots (2.3)$$

La ecuación anterior puede expresarse como:

$$\ln \mu_r = \ln A + k\phi, \dots\dots\dots (2.4)$$

la cual muestra que el logaritmo de la viscosidad relativa es una función lineal de la fracción volumétrica del agua. Esta relación fue el punto de partida para el desarrollo de correlaciones en los años siguientes. Sin embargo, con el paso del tiempo se incorporaron otras variables, como por ejemplo la temperatura, y otras formas funcionales más complejas. En la **Tabla 2.1** se presenta un resumen de diversos modelos y correlaciones para predecir la viscosidad de emulsiones de agua y aceite.

Tabla 2.1 Correlaciones para calcular la viscosidad de emulsiones de agua y aceite.

| Autor | Correlaciones para calcular la viscosidad de la emulsión |
|-----------------------|---|
| Einstein (1906, 1911) | $\mu_r = 1 + 2.5 \Phi$ donde Φ es la fracción volumétrica de agua |
| Hatschek (1911) | $\mu_r = \frac{1}{1 - \Phi^{\frac{1}{3}}}$ donde Φ es la fracción volumétrica de agua |
| Sibree (1930) | $\mu_r = \frac{1}{1 - (h\Phi)^{\frac{1}{3}}}$ donde Φ es la fracción volumétrica de agua y h es un factor de hidratación que toma en cuenta la película de adsorción, la cual incrementa el tamaño efectivo de cada gota |
| Taylor (1932) | $\mu_r = 1 + \left(\frac{\mu_c + 2.5\mu_d}{\mu_c + \mu_d} \right) \Phi$ donde Φ es la fracción volumétrica de agua, μ_c y μ_d la viscosidad de la fase continua y dispersa respectivamente |
| Guth y Simha (1936) | $\mu_r = 1 + 2.5\Phi + 14.1\Phi^2$ donde Φ es la fracción volumétrica de agua |
| Eilers (1941) | $\mu_r = \left[1 + \left(\frac{1.25\Phi}{1 - k\Phi} \right) \right]^2$ donde k es una constante empírica que el autor manejo en 1.35 |

Tabla 2.1 Correlaciones para calcular la viscosidad de emulsiones de agua y aceite (continuación).

| Autor | Correlaciones para calcular la viscosidad de la emulsión |
|----------------------------|---|
| Vand(1948) | $\mu_r = \exp\left(\frac{2.5\Phi}{1 - c\Phi}\right)$ <p>donde c es un factor de acumulación que toma en cuenta la interacción entre las gotas del volumen relativo del incremento de la fase dispersa</p> |
| Mooney (1950) | $\mu_r = \exp\left(\frac{2.5\Phi_1}{1 - C\Phi_1 - \lambda_{21}\Phi_2}\right) * \exp\left(\frac{2.5\Phi_2}{1 - C\Phi_2 - \lambda_{12}\Phi_1}\right)$ <p>donde Φ_1 y Φ_2 son la fracción de volumen de partículas de tamaño 1 y 2 respectivamente, λ_{12} es el factor de acumulación constante debido al efecto de las partículas de tamaño 1 en las partículas de tamaño 2, y λ_{21} es el factor de acumulación constante debido al efecto de las partículas de tamaño 2 en las partículas de tamaño 1</p> |
| Roscoe-Brinkman (1952) | $\mu_r = \frac{1}{(1 - \Phi)^{2.5}}$ <p>donde Φ es la fase dispersa</p> |
| Krieger y Dougherty (1959) | $\mu_r = \left[1 - \left(\frac{\Phi}{\Phi_m}\right)\right]^{-[\mu]\Phi_m}$ <p>donde Φ_m es la concentración máxima de la fase dispersa y $[\mu]$ es igual a $(\mu_d/\mu_c) - 1$, la cual es la viscosidad intrínseca.</p> |
| Yaron y Gal-Or (1972) | $\mu_r = 1 + \Phi \left(\frac{5.5(4\Phi^{\frac{7}{3}} + 10 - \left(\frac{84}{11}\right)\Phi^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{4}{k}\right)(1 - \Phi^{\frac{7}{3}}))}{10\left(1 - \Phi^{\frac{10}{3}}\right) - 25\Phi(1 - \Phi^{\frac{4}{3}}) + \left(\frac{10}{k}\right)(1 - \Phi)\left(1 - \Phi^{\frac{7}{3}}\right)} \right)$ <p>donde Φ es la fracción volumétrica de agua y k es una constante</p> |
| Barnea y Mizrahi (1975) | $\mu_r = \left(\frac{\frac{2}{3} \exp\left[\frac{5\Phi}{3(1-\Phi)}\left(\frac{0.4+k}{1+k}\right)\right] + k}{\exp\left[\frac{5\Phi}{3(1-\Phi)}\left(\frac{0.4+k}{1+k}\right)\right] + k} \right) \exp\left[\frac{5\Phi}{3(1-\Phi)}\left(\frac{0.4+k}{1+k}\right)\right]$ <p>donde Φ es la fracción volumétrica de agua y k es una constante</p> |

Tabla 2.1 Correlaciones para calcular la viscosidad de emulsiones de agua y aceite (continuación).

| Autor | Correlaciones para calcular la viscosidad de la emulsión |
|----------------------------|---|
| Choi y Schowalter (1975) | $\mu_r = 1 + \Phi \left(\frac{2[(5k+2) - 5(k-1)]\Phi^{\frac{7}{3}}}{4(k+1) - 5(5k+2)\Phi + 42k\Phi^{\frac{5}{3}} - 5(5k-2)\Phi^{\frac{7}{3}} + 4(k-1)\Phi^{\frac{10}{3}}} \right)$ <p>donde Φ es la fracción volumétrica de agua y k es una constante</p> |
| Kumar, Watt y Vasan (1985) | $\mu_a = \mu_{a\ 50\%} \cdot \left(\frac{\Phi_d}{\Phi_c} \right)^m$ <p>donde $\mu_{a\ 50\%}$ es la viscosidad aparente a una concentración del 50%. m es la pendiente en una gráfica log-log de μ_a vs. $\left(\frac{\Phi_d}{\Phi_c} \right)$. Φ_d y Φ_c son la fracción volumétrica de la fase dispersa y continua respectivamente</p> |
| Pal (1988) | $\Phi_m^{1/2} \left(1 - \mu_r^{-1/[\mu]\Phi_m} \right) = k_1 + k_2 \log(N_{Re,p}) + k_3 \log(N_{Re,p})^2$ <p>donde k_1, k_2, k_3 son constantes, $N_{(Re,p)} = ((\rho c \gamma r^2) / \mu_c)$ es el número de Reynolds de la partícula, y γ es la velocidad de corte</p> |
| Pal y Rhodes (1989) | $\mu_r = [1 - k_0 k_f (\gamma) \Phi]^{-2.5}$ <p>Donde k_0 es un factor de hidratación y k_f es un factor de floculación</p> |
| Ronningsen (1995) | $\ln(\mu_r) = k_1 + k_2 T + k_3 \Phi + k_4 T \Phi$ <p>donde k_1, k_2, k_3 y k_4 son constantes empíricas obtenidas para las muestras de aceite experimentales y T es la temperatura en °C</p> |
| Phan-Thien y Pham (1997) | $\mu_r^{2/5} \left(\frac{2\mu_r + 5k}{2 + 5k} \right)^{3/5} = \left(\frac{1}{1 - \Phi} \right)$ <p>donde k es una constante empírica</p> |
| Pal (2001) | $\mu_r \left[\frac{2\mu_r + 5k}{2 + 5k} \right]^{1.5} = \left(1 - \frac{\Phi}{\Phi_m} \right)^{-2.5}$ <p>donde Φ_m es la máxima concentración de la fase dispersa</p> |

CAPÍTULO 3

PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este capítulo se abordan los detalles del trabajo experimental realizado para caracterizar el comportamiento reológico de las emulsiones de agua y aceite crudo pesado de tres campos marinos en México. Se refieren las características de las muestras de aceite consideradas en el estudio. Se describe el equipo de laboratorio utilizado, así como la metodología experimental propuesta. Se presentan y discuten los resultados experimentales obtenidos para cada muestra de aceite.

3.1 MUESTRAS DE ACEITE CRUDO PESADO ANALIZADAS

De acuerdo a los objetivos del estudio presente, se realizaron pruebas experimentales para estudiar el comportamiento reológico de las emulsiones de agua y aceite crudo pesado de campos marinos en México. Para tal efecto, y con el soporte de ingenieros de Petróleos Mexicanos – Exploración y Producción (PEP), se recolectaron muestras de aceite pesado a boca de pozo de tres campos costa afuera.

En la **Tabla 3.1** se indica la densidad relativa de las muestras de aceite obtenidas, identificadas en lo subsecuente como A, T y U, así como algunos datos característicos adicionales. Con respecto a la fase acuosa para generar las emulsiones, se utilizó agua des-ionizada filtrada.

Tabla 3.1 Características de las muestras de aceite crudo analizadas.

| Características | Campo | | |
|--|--------|--------|--------|
| | A* | T | U |
| Densidad [°API] | 8.6 | 10.4 | 10.6 |
| Profundidad del yacimiento [kg/cm ²] | 232.9 | 186 | 219.8 |
| Temperatura del yacimiento [°C] | 119 | 110 | 109 |
| Número ácido [mgKOH/g] | 0.3648 | 0.0963 | 0.6233 |
| Asfaltenos % | 5.11 | 6.73 | 6.69 |
| Resinas % | 36.59 | 19.67 | 9.25 |
| Aromáticos % | 18.67 | 40.08 | 55.23 |
| Saturados % | 39.63 | 33.52 | 28.83 |

* La muestra presenta alto contenido de CO₂ y H₂S.

Las pruebas experimentales consideradas en el estudio fueron:

1. Formación de emulsiones agua en aceite y aceite en agua.
2. Medición de las fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada.
3. Caracterización reológica del aceite puro y de las emulsiones generadas, en función del corte de agua, la temperatura y la velocidad de corte.
4. Estudio del efecto de tenso-activos sobre la viscosidad aparente de emulsiones.

Cabe destacar que los experimentos mencionados se realizaron en la Unidad de Servicios para la Ingeniería Petrolera (USIP), de la Facultad de Química de la UNAM. A continuación se describe el equipo de laboratorio utilizado.

3.2 EQUIPO DE LABORATORIO

3.2.1. Reómetro

Las pruebas reológicas se llevaron a cabo en un reómetro Anton Paar MCR-301 (**Figura 3.1**). El equipo cuenta con dos tipos de geometría: cilindros concéntricos CC27/CX 12781 (**Figura 3.2**) y platos paralelos PP50 (**Figura 3.3**). La ficha técnica del reómetro puede consultarse en el anexo A.



Figura 3.1 Reómetro Anton-Parr MCR-301.

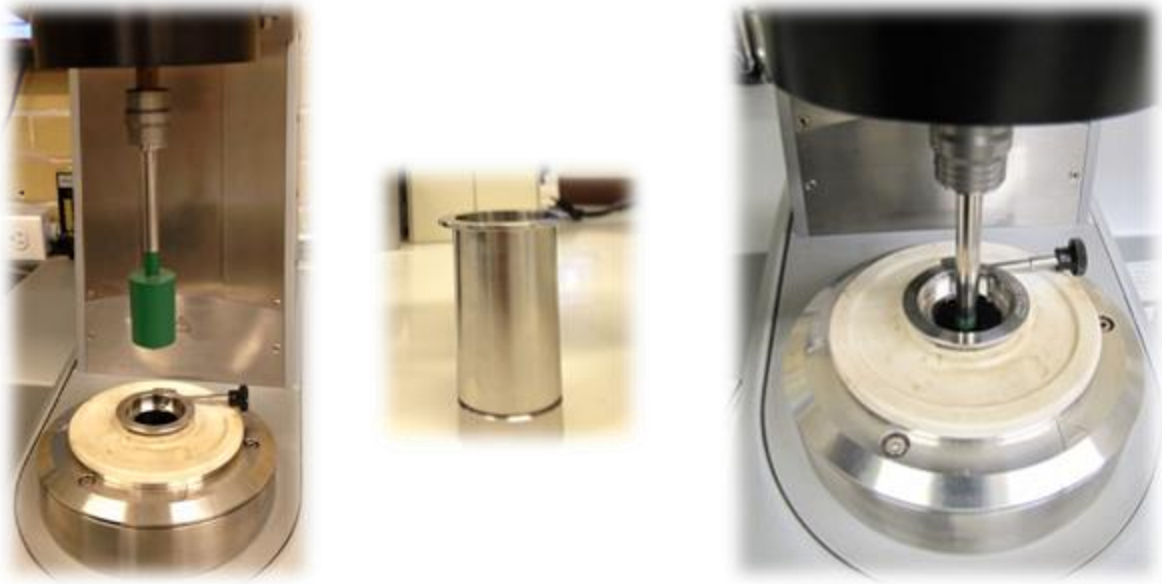


Figura 3.2 Geometría de cilindros concéntricos CC27/CX 12781.

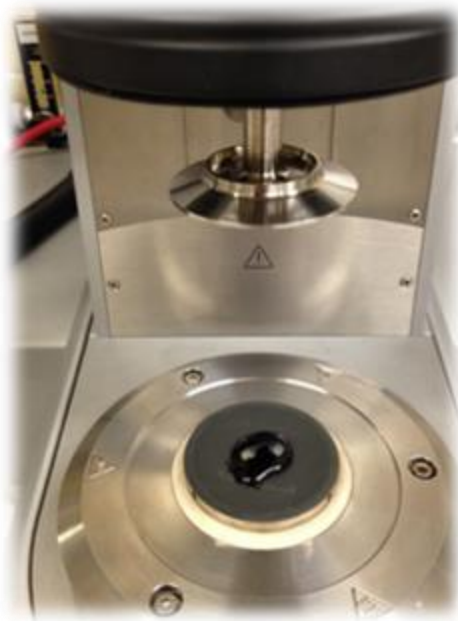


Figura 3.3 Geometría de platos paralelos PP50.

3.2.2 Mezclador

Para la generación y homogeneización de las emulsiones se utilizó un mezclador IKA T25 digital ULTRA TURRAX Código H203 (**Figura 3.4**). Los elementos de dispersión se muestran en la **Figura 3.5**. Los datos técnicos del mezclador se presentan en el anexo A.



Figura 3.4 Mezclador IKA T25.



Figura 3.5 Elementos de dispersión del mezclador IKA T25.

3.2.3 Sistema para el tratamiento del agua

Para generar las emulsiones se utilizó agua des-ionizada ultrapura tipo I. El tratamiento del agua se realizó en un sistema de purificación Milli-Q® Advantage A10 (**Figura 3.6**), marca Merck Millipore ®. Las especificaciones del agua tratada con este sistema se indican en el anexo A.



Figura 3.6 Sistema para el tratamiento del agua

3.2.4 Densímetro

Para cuantificar la densidad del aceite a las condiciones atmosféricas de presión y temperatura, se utilizó un densímetro convencional (**Figura 3.7**).



Figura 3.7 Densímetro

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.3.1 Pruebas preliminares

Con la finalidad de desarrollar una metodología para estudiar el comportamiento reológico de las emulsiones de agua y aceite crudo pesado, se realizaron pruebas preliminares con un aceite de referencia de 13.5 °API (ver especificaciones en el anexo A).

Como primer paso, se verificó la operación del reómetro Anton-Paar con crudos de alta viscosidad. En la **Figura 3.8** se muestra uno de los reogramas generados para el aceite de referencia, a una temperatura de 25 °C y presión atmosférica. Se observa que el aceite tiene un comportamiento no-newtoniano, similar al de un fluido pseudoplástico. De acuerdo a información del personal de la USIP, se determinó que los valores de viscosidad determinados y el comportamiento observado en la figura corresponden a lo esperado para el fluido analizado.

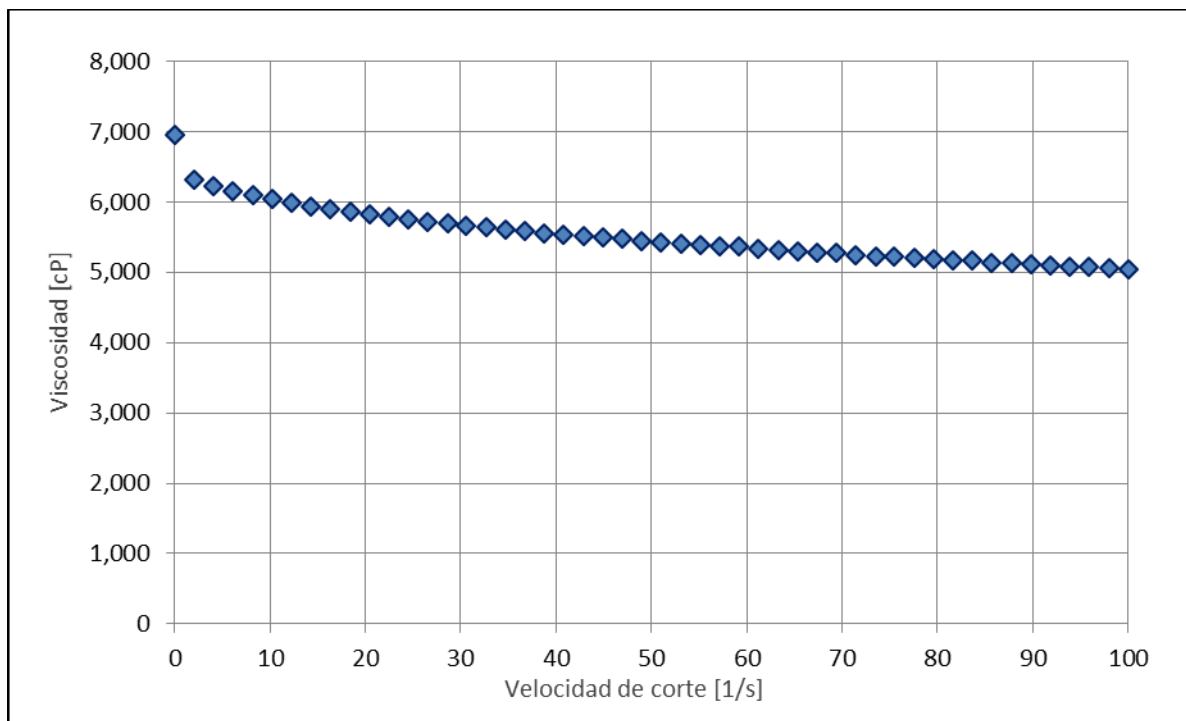


Figura 3.8 Comportamiento reológico del aceite crudo de prueba APPRA Constituciones a 25°C

Es importante destacar que la geometría de cilindros concéntricos utilizada para estudiar la reología del crudo de referencia tuvo que cambiarse eventualmente por una de platos paralelos PP50, en el caso de los aceites pesados considerados en el estudio presente. Esto se debió a que la viscosidad de estos fue hasta un orden de magnitud mayor, lo cual generó anomalías en las mediciones. Por lo tanto, antes de realizar la caracterización reológica de los crudos pesados, se verificó que los valores de viscosidad del aceite de referencia fueran consistentes con los obtenidos con ambas geometrías.

Como segundo paso de la metodología experimental se investigó el procedimiento para generar emulsiones estables de agua y aceite. Para tal efecto, se usó agua des-ionizada tipo I y el aceite de referencia, a relaciones volumétricas de 10 a 90%, a incrementos de 10%. El mezclado de los fluidos se realizó inicialmente en un equipo IKA EUROSTAR 60, el cual permite una velocidad máxima de 2,500 rpm. En cada uno de los casos considerados, se estudiaron la velocidad y el tiempo de mezclado requeridos para que se formaran las emulsiones. Una vez que se identificó que éstas se habían formado, se dejaron en reposo para determinar si las fases se separaban y en cuánto tiempo ocurría esto.

Para las emulsiones formadas con fracciones volumétricas de agua en el rango de 10 a 60%, las pruebas realizadas mostraron que la velocidad de mezclado y el tiempo requerido de agitación se incrementaban proporcionalmente al incremento del volumen de agua. Los tiempos de mezclado fueron de 40 a 60 minutos, a una velocidad de 2,500 rpm.

Posteriormente al periodo de mezclado, se determinó que todas las emulsiones formadas en el rango referido fueran estables. En particular, resultaron sumamente estables en el rango de 10 a 30% de agua, durando más de 20 días sin que se presentara la separación de las fases. En el rango de 40 a 60%, se formaron emulsiones estables con tiempos de separación de varias horas. Conforme el porcentaje se aproximaba a 60% algunas emulsiones llegaron a presentar separación de fases, en alrededor de cuatro horas.

Por otra parte, a porcentajes mayores de 60% en volumen de agua, se requirió de una a tres horas de mezclado y 2,500 rpm para formar algunas emulsiones. Cuando llegaron a

formarse resultaron altamente inestables, de tal manera que las fases se separaban en menos de diez minutos.

A partir de los resultados obtenidos, surgió la necesidad de un dispersor que operara a un número mayor de revoluciones por minuto. Se adquirió el equipo IKA T25 digital ULTRA TURRAX Código H203, con una velocidad máxima de 23,000 rpm. De esta manera, la velocidad de mezclado varió entre 5,000 rpm y 15,000 rpm, logrando reducir el tiempo de formación de las emulsiones (más estables), con porcentajes volumétricos de agua del orden de 60% o mayores, a una hora.

Como tercera etapa se investigó el rango conveniente de velocidad de corte, para llevar a cabo las pruebas reológicas con las emulsiones generadas a diferentes relaciones volumétricas de agua. Las pruebas se realizaron a 25 °C con el reómetro Anton-Paar con geometría de cilindros concéntricos. Durante las mediciones se monitoreó el punto de inversión de fases.

Como ejemplo de los resultados obtenidos, en las **Figuras 3.9, 3.10 y 3.11**, se muestra la curva de viscosidad aparente contra la fracción volumétrica de agua a velocidades de corte de 0.01, 50 y 100 s^{-1} , respectivamente. Primeramente, en la Figura 3.9 se observa que el punto de inversión de fases ocurre aproximadamente al 60% en volumen de agua. A valores mayores, la emulsión cambia a aceite en agua (O/W), lo cual puede verificarse por el abatimiento abrupto de la viscosidad. Por otra parte, cuando la velocidad de corte es de 50 s^{-1} , el punto de inversión se presenta a una fracción volumétrica de agua de 50%. A velocidades de corte mayores no se identificaron cambios notables en el punto de inversión. Por lo tanto, con base en estos y otros resultados obtenidos, se determinó la conveniencia de utilizar valores máximos de velocidad de corte de 100 s^{-1} .

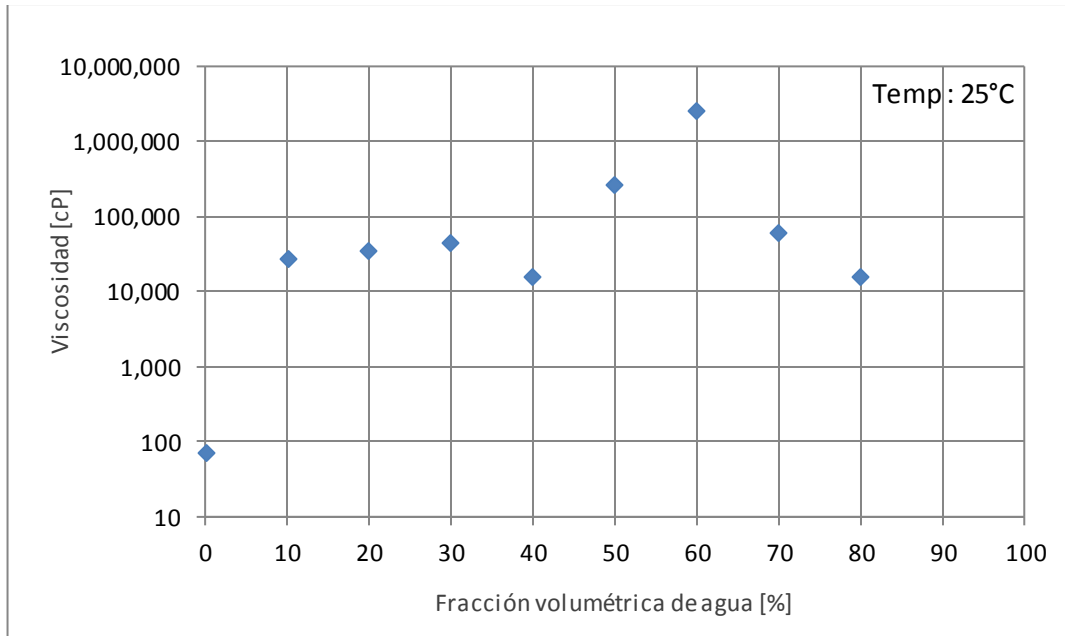


Figura 3.9 Comportamiento reológico - emulsión agua y aceite de referencia a una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} .

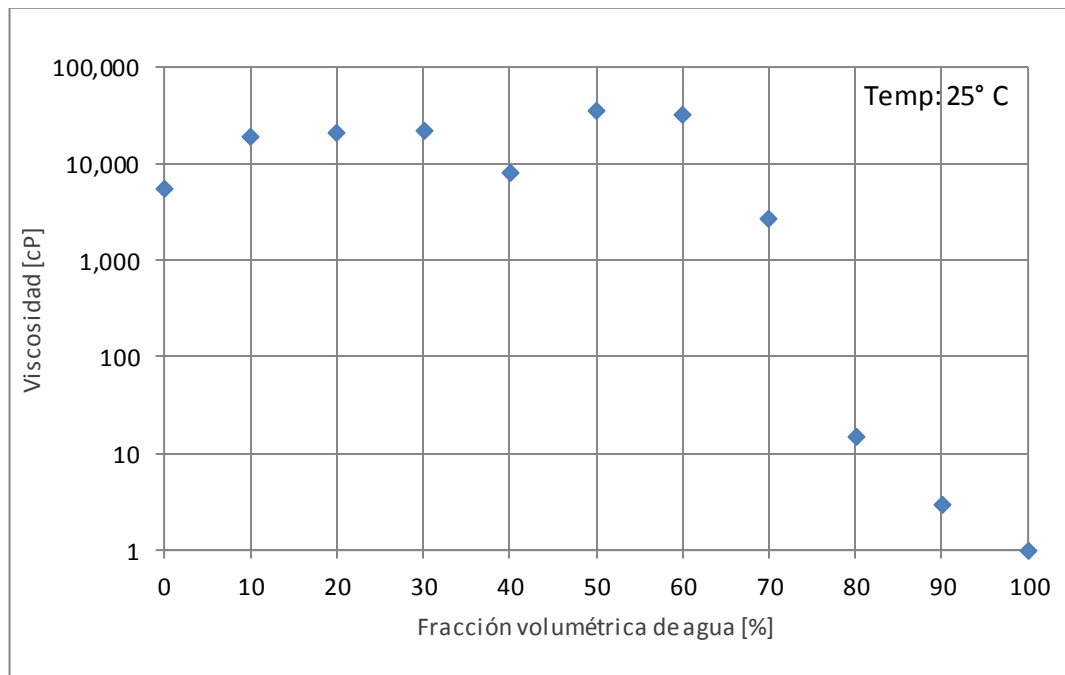


Figura 3.10 Comportamiento reológico - emulsión agua y aceite de referencia a una velocidad de corte de 50 s^{-1} .

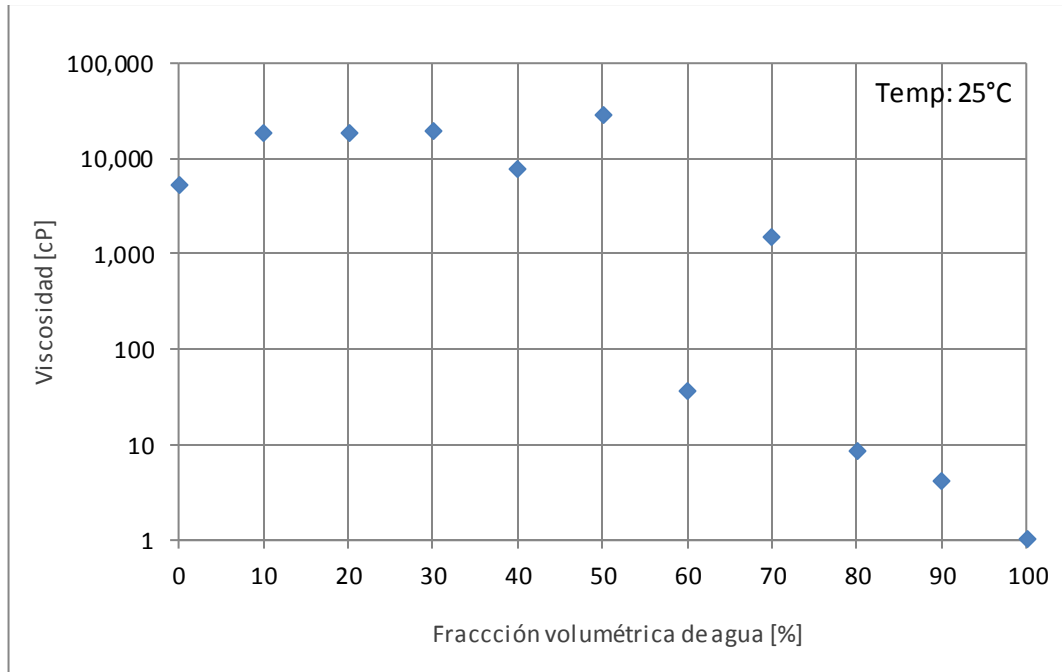


Figura 3.11 Comportamiento reológico - emulsión agua y aceite de referencia a una velocidad de corte de 100 s^{-1} .

3.3.2. Selección de agentes tensoactivos

Para formar emulsiones agua – aceite estables se probaron tres agentes tensoactivos no iónicos (referidos como Q-232, Q-233 y Q-234), pertenecientes a los alcoholes grasos etoxilados. Se realizaron pruebas para cada uno de ellos, con el aceite de referencia y agua des-ionizada, a fracciones de 50, 60 y 70% en volumen de agua.

Con el uso de los tensoactivos fue posible disminuir la velocidad y el tiempo de mezclado para generar las emulsiones. La velocidad de agitación fue en promedio de 5,000 rpm, con un tiempo máximo de 30 minutos. Como dato comparativo, sin el uso de agentes tensoactivos en algunos casos se requirió una velocidad de agitación de 15,000 rpm durante una hora.

Las emulsiones generadas fueron estables con hasta 60% en volumen de agua. Al 70%, las fases se separaron después de una hora en reposo. Cabe señalar que en ningún

caso la separación fue instantánea como llegó a ocurrir con las emulsiones sin el uso de tensoactivos.

En cuanto al efecto de los tensoactivos sobre la reducción de la viscosidad, los resultados experimentales obtenidos se muestran en las **Figuras 3.12, 3.13 y 3.14**, a fracciones volumétricas de agua de 50, 60 y 70%, respectivamente. En cada caso se muestran los valores de viscosidad del aceite de referencia y de las emulsiones generadas sin y con tensoactivos, contra la velocidad de corte. La viscosidad del aceite de referencia disminuyó de 6,000 a 5,000 cp en el rango de velocidades de corte de 0.01 a 100 s⁻¹.

De acuerdo a las Figuras 3.12 a 3.14, en general se observa que la viscosidad de las emulsiones de agua en aceite sin tensoactivos es hasta un orden de magnitud mayor que la del aceite puro, siempre que no ocurra la inversión de las fases. Por otra parte, se ve que la viscosidad de las emulsiones con el uso de los tensoactivos se reduce en todos los casos, en comparación con la del aceite de referencia. Ahora bien, el tensoactivo Q-233 es el que reduce la viscosidad de las emulsiones de manera más importante para los tres valores analizados de fracción volumétrica de agua, hasta en dos órdenes de magnitud, a valores de entre 100 y 30 cp.

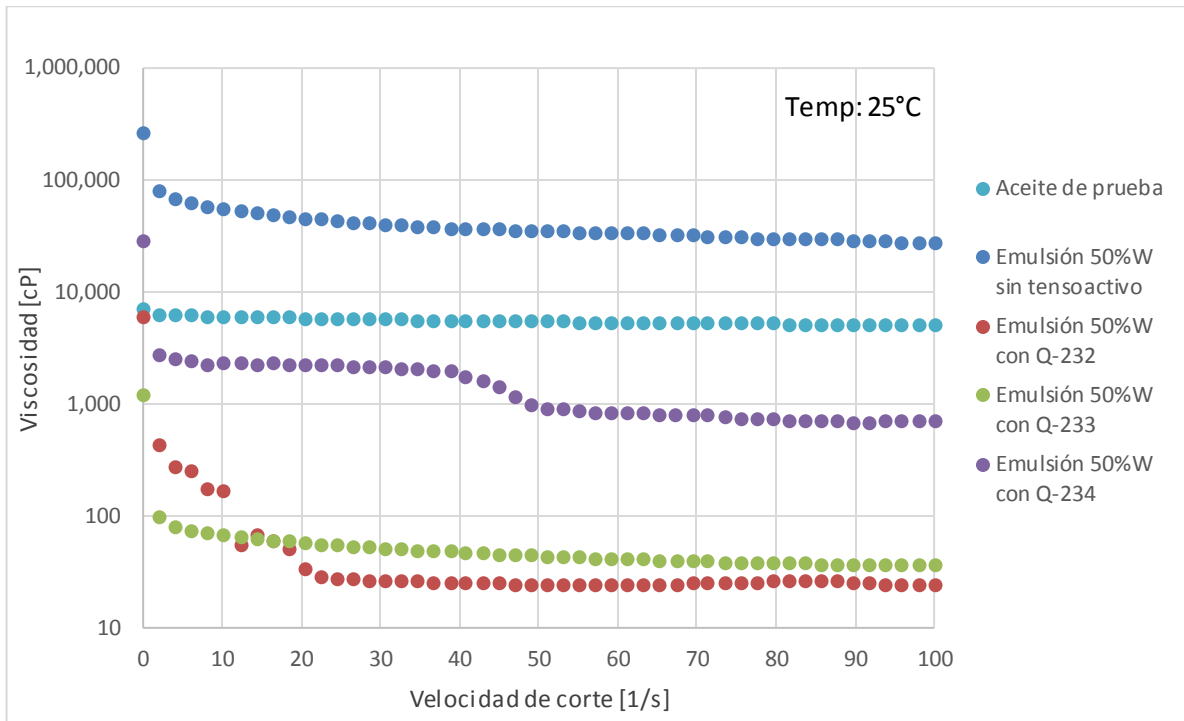


Figura 3.12 Viscosidad de la emulsión: 50% agua- 50% aceite de referencia

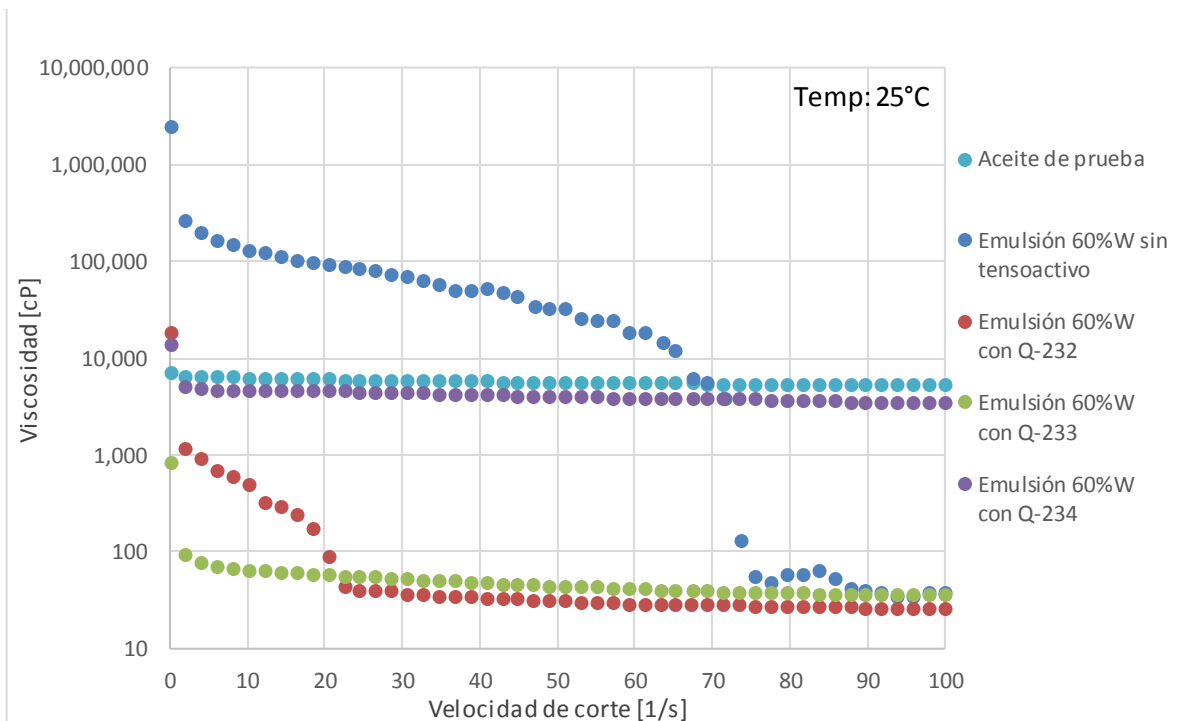


Figura 3.13 Viscosidad de la emulsión: 60% agua- 40% aceite de referencia.

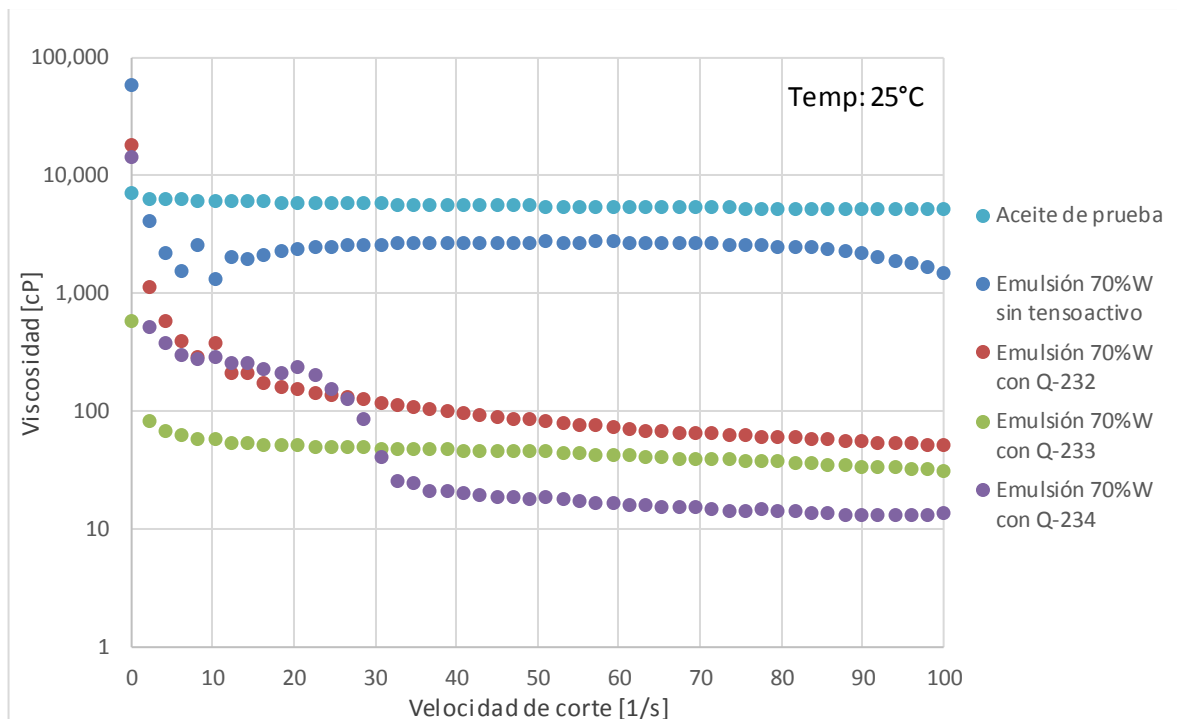


Figura 3.14 Viscosidad de la emulsión: 70% agua- 30% aceite de referencia.

3.3.3 Medición de la fracción de agua emulsionada

El paso siguiente en el desarrollo de la metodología experimental consistió en la medición de las fracciones volumétricas de agua emulsionada y de agua libre. Para efectos del presente estudio, y con base en resultados experimentales preliminares con los aceites crudos analizados, las emulsiones formadas se clasificaron de acuerdo a su estabilidad en: estables, medias y débiles. Se consideró como emulsiones estables aquellas que no presentaron separación de fases en periodos prolongados de tiempo (de varias horas e incluso días). Se identificó que este tipo de emulsiones ocurre a bajas fracciones volumétricas de agua.

Las emulsiones medias son aquellas que presentaron separación de fases después de 10 minutos. Se presentaron a porcentajes de agua cercanos al punto de inversión.

Finalmente, las emulsiones débiles son aquellas que presentan separación de fases a los pocos minutos o segundos de formarse. En los sistemas de estudio, este tipo de emulsiones se presentó con fracciones volumétricas de agua mayores a la del punto de inversión. Las emulsiones fueron dejadas en reposo por 24 horas para cuantificar las fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada (**Figura 3.15**).



Figura 3.15 Emulsión débil en reposo y medición del agua separada.

3.4 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos para la caracterización reológica de emulsiones generadas con muestras de aceites pesados de campos marinos en México. En todas las pruebas se utilizó agua des-ionizada tipo I. Las mediciones se llevaron a cabo en el reómetro Anton-Parr con una geometría de platos paralelos PP50.

3.4.1 Sistema A

3.4.1.1 Caracterización reológica del aceite crudo

En la **Figura 3.16** se muestran los datos experimentales de viscosidad contra velocidad de corte a diferentes temperaturas, obtenidos para el aceite pesado “A”. En general, se observa que este aceite presenta un comportamiento reológico no-newtoniano de tipo pseudo-plástico. Se ve que los efectos más importantes del incremento de la temperatura sobre la reducción de la viscosidad ocurren a bajas velocidades de corte: por ejemplo, la viscosidad se reduce un orden de magnitud (de 142,000 a 10,200 cp) al incrementar la temperatura de 30 a 60 °C, a una velocidad de corte de 20 s⁻¹. Es interesante notar que conforme la velocidad de corte se aproxima a cero, la viscosidad puede alcanzar valores cercanos a 1,000,000 cp a 25 °C. Este comportamiento es un claro indicativo de la problemática de transportar este tipo de aceite en ductos, o de arrancar los equipos de bombeo electro-centrífugo en los pozos que lo producen.

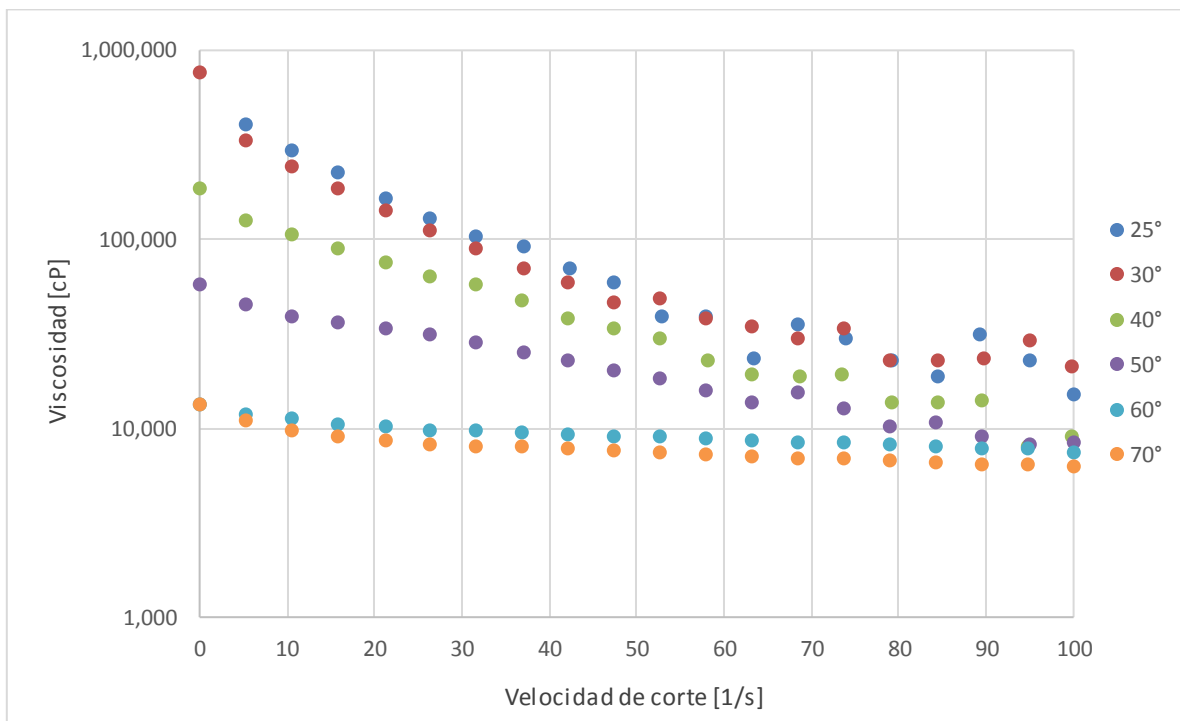


Figura 3.16 Comportamiento reológico del aceite pesado “A”, a diferentes temperaturas.

3.4.1.2 Caracterización reológica de las emulsiones

Se prepararon emulsiones con el aceite pesado "A" a diferentes concentraciones de agua. En la preparación no se utilizaron agentes tensoactivos. Las emulsiones con porcentajes de hasta 30% de agua fueron estables, durando semanas sin separación de fases. La velocidad de mezclado fue 15,000 rpm durante 30 min. Para generar las emulsiones con porcentajes de 30 a 47% fue necesario incrementar la velocidad de agitación a 20,000 rpm, y el tiempo de mezclado a 45 o 60 minutos. La mayoría de las emulsiones resultantes fueron estables por aproximadamente 4 horas. A porcentajes mayores de agua, las emulsiones no se formaron o fueron débiles, presentando separación de fases en alrededor de un minuto.

A las emulsiones estables se les realizó su caracterización reológica, abarcando un rango de velocidades de corte de 0.01 a 100 s⁻¹, a temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C. En la **Figura 3.17** se muestran los resultados correspondientes a 60 °C. Se observa que la viscosidad de las emulsiones se incrementa con la fracción volumétrica de agua. Por ejemplo, la viscosidad de la emulsión al 5% es el doble de la viscosidad del aceite puro. Este efecto se reduce conforme continúa aumentando la fracción de agua. Así, la viscosidad de la emulsión no aumenta de manera significativa si la fracción de agua se incrementa de 20 a 30%. Los resultados a otras temperaturas fueron similares, y se presentan en el anexo B.

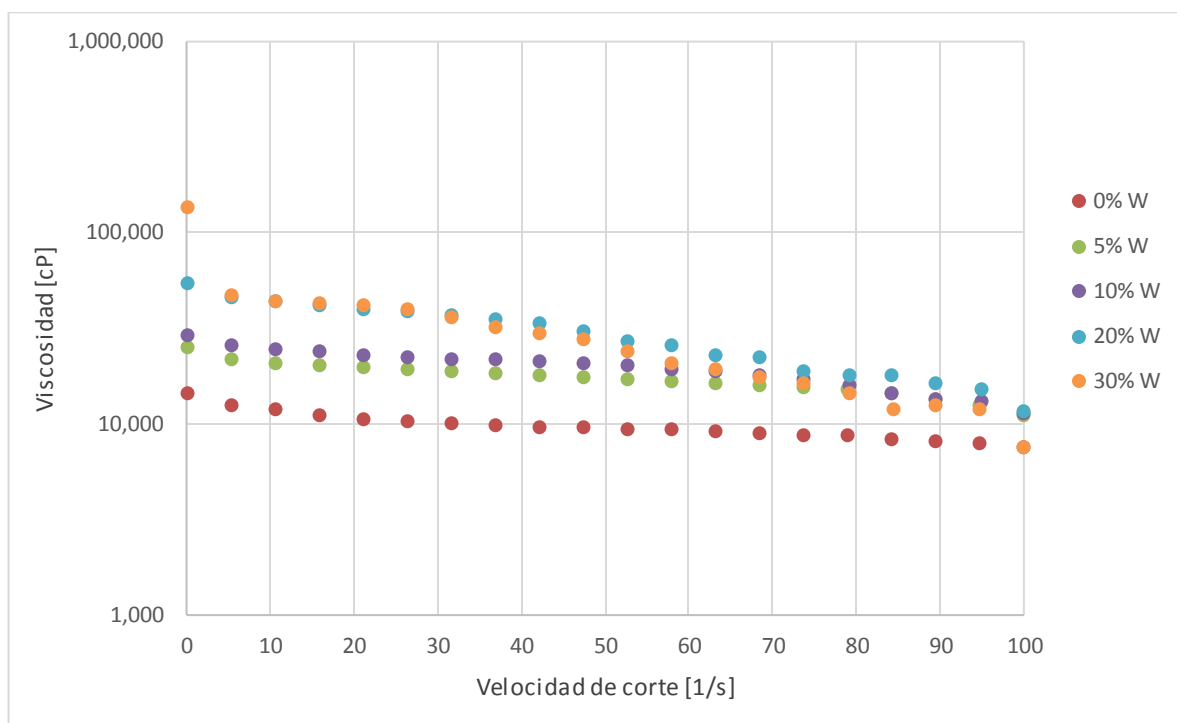


Figura 3.17 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C.

3.4.1.3 Punto de inversión de fase

En la **Figura 3.18** se muestra el comportamiento de la viscosidad en función de la fracción volumétrica de agua, a diferentes temperaturas. Las curvas mostradas corresponden a una velocidad de corte constante de 0.01 s^{-1} . Se observa que la viscosidad del aceite puro (0% de agua) disminuye en un rango de dos órdenes de magnitud (de 10^6 a 10^3 cp), con el incremento de la temperatura de 30 a 60 °C. De acuerdo a los resultados mostrados, el punto de inversión de fases se alcanza a fracciones volumétricas de agua de aproximadamente 47%.

Para los sistemas de agua en aceite, se ve que la viscosidad de las emulsiones en el punto de inversión se incrementa casi un orden de magnitud con respecto a la del aceite puro, a una misma temperatura. A fracciones volumétricas de agua mayores de 47% (emulsiones de aceite en agua), la mayoría de las emulsiones no se formó, y aquellas

que lograron formarse fueron débiles por lo que no se pudo realizar su caracterización reológica.

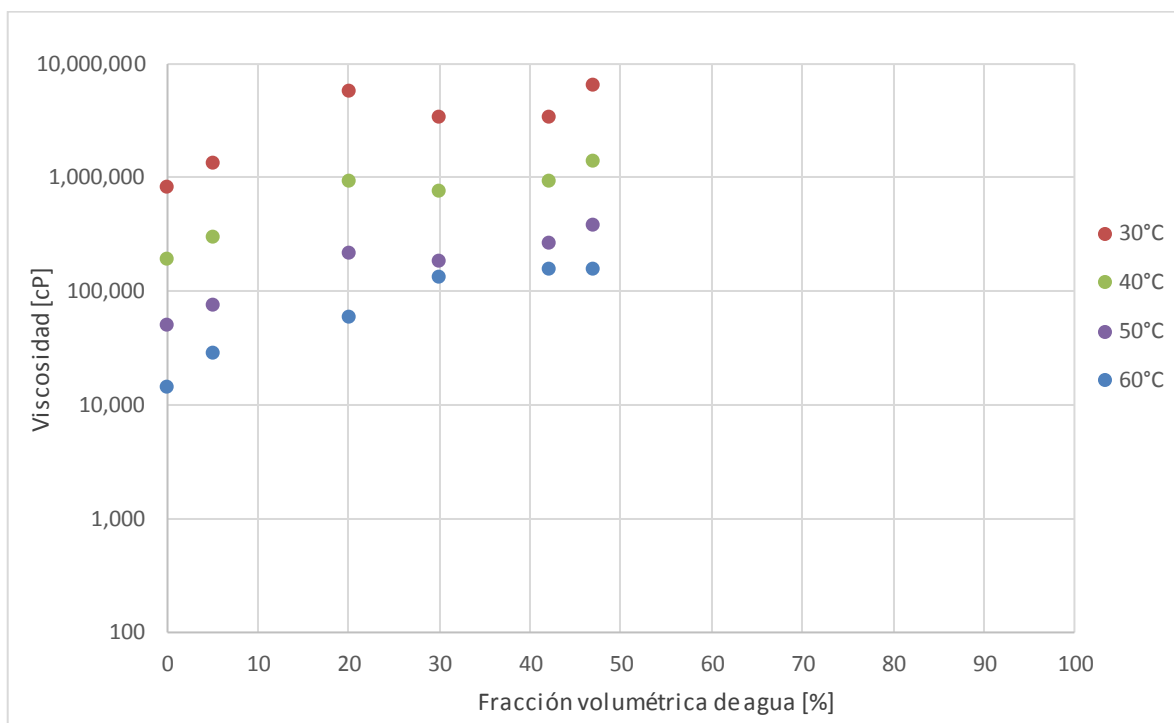


Figura 3.18 Efecto de la fracción volumétrica de agua sobre la viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes temperaturas y una velocidad de corte = 0.01 s^{-1} .

3.4.1.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada

Las emulsiones inestables identificadas durante las pruebas experimentales se dejaron en reposo durante 24 horas a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Posteriormente se midieron los volúmenes de agua libre y de agua emulsionada. Los resultados obtenidos se indican en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada, para emulsiones inestables con el aceite pesado “A”, a 25 °C

| Emulsión original (inestable) | Agua libre y agua emulsionada | | Emulsión resultante (estable) |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| % vol. de agua/ vol. total | % vol. de agua libre/vol. total | % vol. de agua emulsionada/vol. total | % vol. de agua emulsionada/vol. emulsión estable |
| 45 | 17 | 28 | 33.7 |
| 60 | 44.3 | 15.7 | 28.2 |
| 70 | 45.7 | 24.3 | 44.7 |

3.4.1.5 Efecto del agente tensoactivo sobre las emulsiones

Se estudió el efecto del agente tensoactivo Q-233 sobre la formación y comportamiento reológico de emulsiones con el aceite pesado “A”. Éstas se prepararon a una concentración de 0.2% en peso de tensoactivo, y 20, 40, 50 y 80% en volumen de agua. En el rango de 50 a 80% no pudieron realizarse otras mediciones debido a la consistencia acuosa y la separación de las fases durante la caracterización reológica.

En los casos analizados el tiempo y la velocidad de mezclado para formar las emulsiones se redujeron en comparación a cuando no se utilizó ningún producto químico. Con el uso del agente Q-233 todas las emulsiones lograron formarse con facilidad, presentando una consistencia acuosa. Incluso se generaron emulsiones estables al 50% en volumen de agua, lo cual no fue posible sin el uso del surfactante.

La caracterización reológica de las emulsiones se realizó a una temperatura de 30°C. En la **Figura 3.19** se presentan los resultados obtenidos en términos de la viscosidad de las emulsiones y la fracción volumétrica de agua, a una velocidad de corte de 0.01 s⁻¹. Para efectos comparativos, también se muestran los valores de viscosidad de las emulsiones generadas sin tensoactivos, a la misma temperatura. Como puede observarse, la viscosidad de las emulsiones se reduce con el uso del tensoactivo. Esta reducción se incrementa conforme aumenta el porcentaje de agua. Es importante resaltar que en

todos los casos la viscosidad de las emulsiones generadas con el tensoactivo fue inferior a la viscosidad del aceite puro.

En las pruebas experimentales no se logró identificar claramente el punto de inversión de fases para las emulsiones con tensoactivo. La Figura 3.19 indica que éste debe presentarse entre el 50 y 80% en volumen de agua.

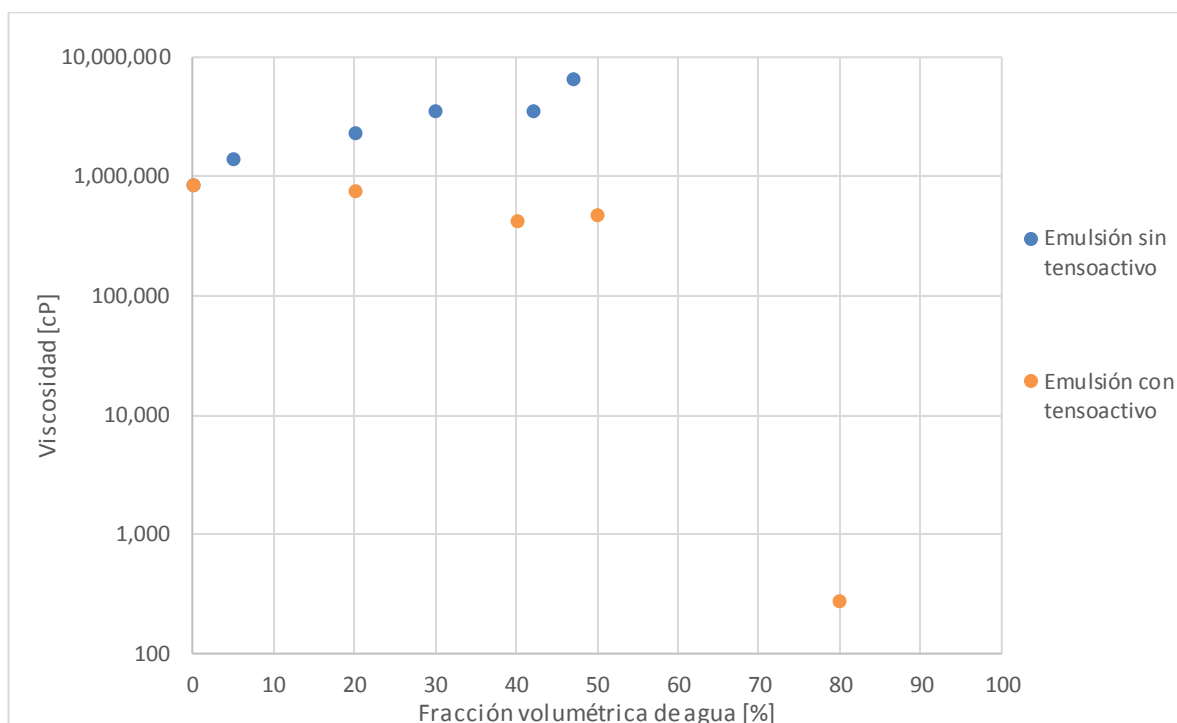


Figura 3.19 Comparación entre los valores de viscosidad para emulsiones con el aceite pesado “A”, sin y con agente tensoactivo Q-233, para diferentes valores de fracción volumétrica de agua, una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} y una temperatura de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.2 Sistema T

3.4.2.1 Caracterización reológica del aceite crudo

Los resultados experimentales de viscosidad contra velocidad de corte a diferentes temperaturas obtenidos para el aceite pesado “T” se muestran en la **Figura 3.20**. De acuerdo a la figura, el aceite presenta un comportamiento reológico no-newtoniano de

tipo pseudo-plástico. Ahora bien, tiende a ser newtoniano a altas temperaturas (60 °C), con un valor de viscosidad de alrededor de 5,000 cp. Como en el caso del aceite “A”, se observa que los efectos más importantes del incremento de la temperatura sobre la reducción de la viscosidad ocurren a bajas velocidades de corte. En este rango, la viscosidad del aceite es del orden de 100,000 cp a 30 °C.

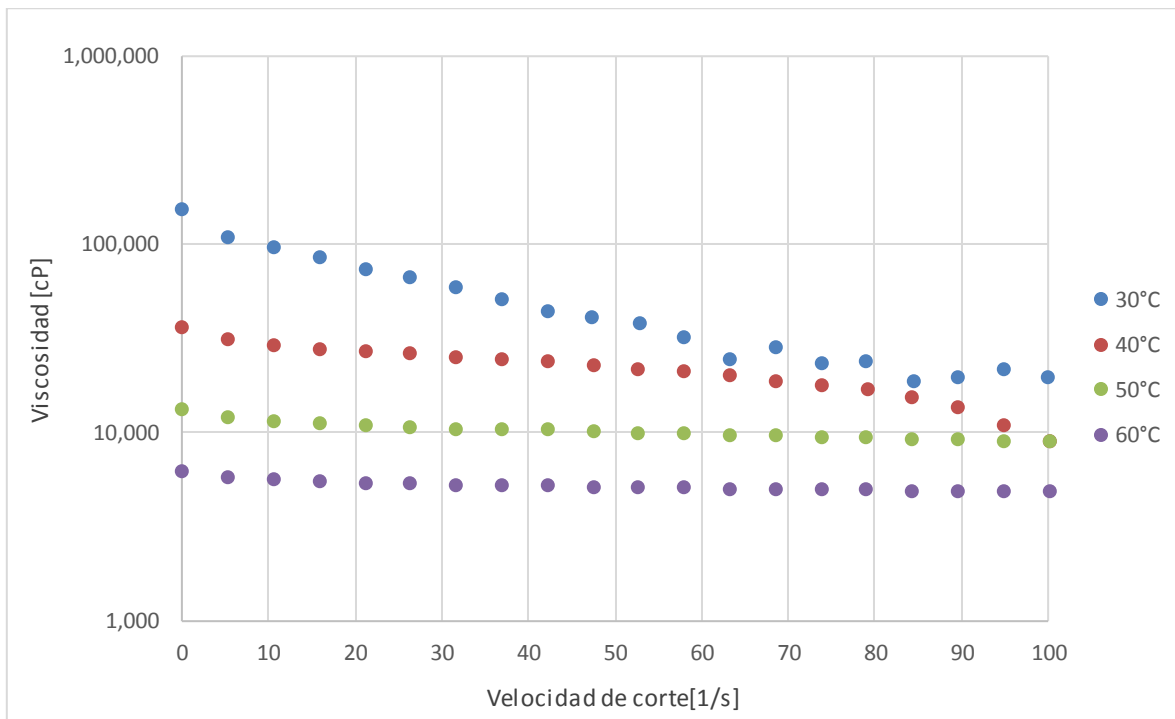


Figura 3.20 Comportamiento reológico del aceite pesado “T”, a diferentes temperaturas.

3.4.2.2 Caracterización reológica de las emulsiones

Se llevó a cabo la preparación de emulsiones de agua y aceite pesado “T”, a diferentes concentraciones de agua. La velocidad y tiempo de agitación fueron 15,000 rpm y una hora, respectivamente. Las emulsiones con un porcentaje en volumen de agua menor de 30% resultaron estables. A porcentajes mayores, las emulsiones fueron inestables, presentando separación de fases a los pocos minutos de dejarse en reposo.

En la **Figura 3.21** se presenta el comportamiento reológico de las emulsiones estables generadas, a fracciones volumétricas de agua de 10, 20, 25 y 30% y una temperatura de 60 °C. Asimismo, se muestran los datos correspondientes al aceite puro (0% W). Como puede observarse, en general la viscosidad aumenta con el incremento del contenido de agua. Por ejemplo, la viscosidad de la emulsión al 10% de agua es el doble de la del aceite puro (~5,000 cp), a una misma velocidad de corte. Resultados similares fueron obtenidos a otras temperaturas, y se presentan en el anexo B.

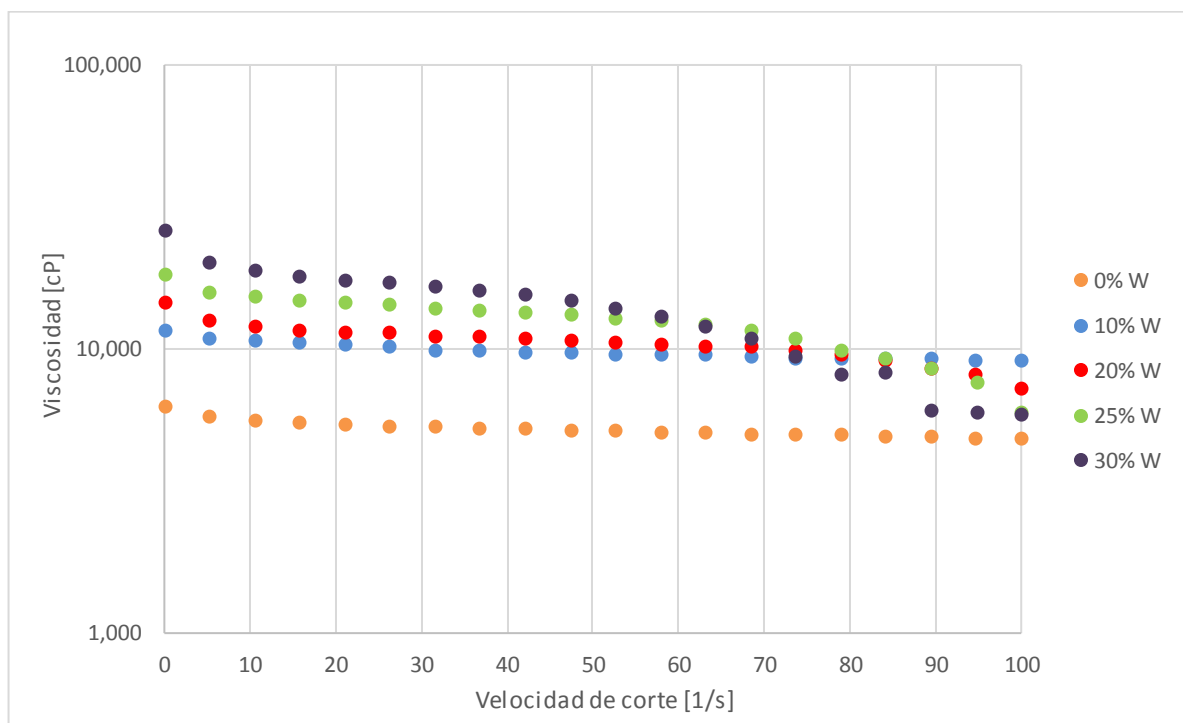


Figura 3.21 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado "T", a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C

3.4.2.3 Punto de inversión de fase

En la **Figura 3.22** se presentan los datos experimentales de viscosidad de las emulsiones generadas a diferentes fracciones volumétricas de agua, para temperaturas de 30, 40, 50 y 60 °C. El análisis de los resultados experimentales mostrados indica que el punto

de inversión de fases se encuentra aproximadamente a una fracción volumétrica del 30% de agua. Cabe mencionar que no fue posible obtener mediciones en el rango intermedio de 30 a 80% debido a la inestabilidad de las emulsiones, las cuales manifestaron separación de fases de manera prácticamente instantánea. Con respecto a los sistemas a porcentajes mayores de 80% de agua, las mediciones se realizaron en el reómetro con una geometría de cilindros concéntricos debido a su condición acuosa.

Manteniendo la temperatura constante, en la Figura 3.22 puede verse que la viscosidad de las emulsiones se incrementa casi en un orden de magnitud con el incremento del porcentaje de agua de 0 a 30%. Por ejemplo, a 30 °C, la viscosidad se incrementa de 153,000 a 925,000 cp.

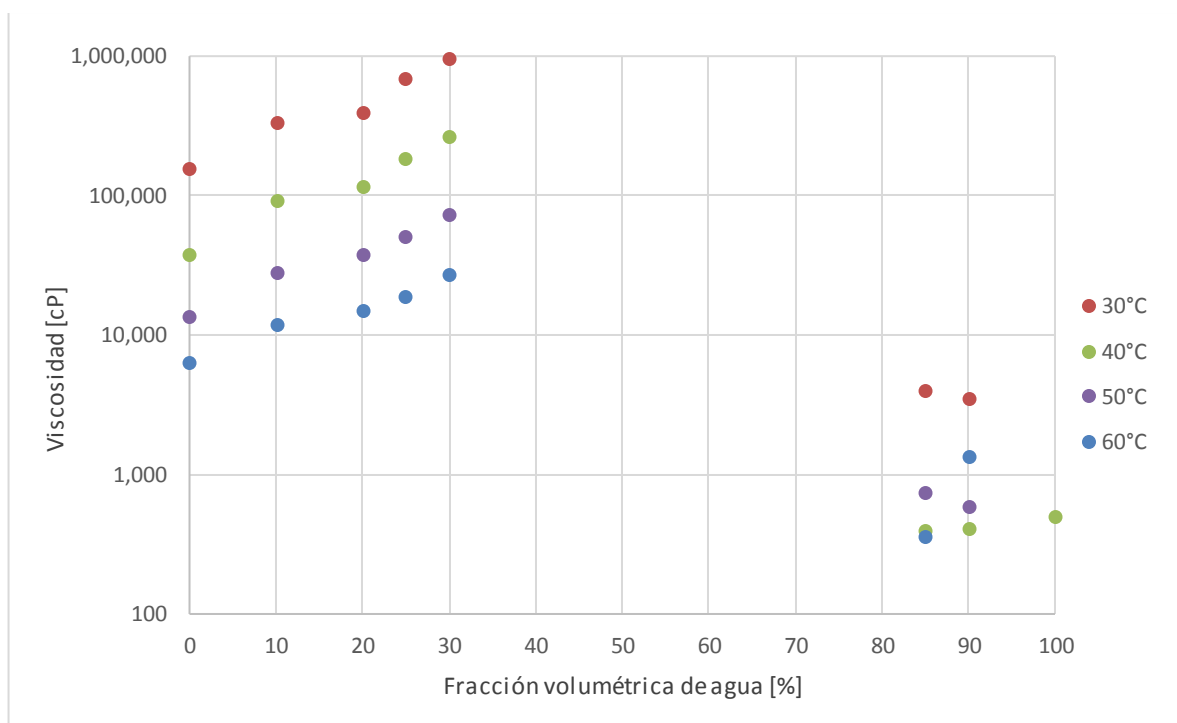


Figura 3.22 Efecto de la fracción volumétrica de agua sobre la viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes temperaturas y una velocidad de corte = 0.01 s^{-1}

3.4.2.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada

Las emulsiones que resultaron inestables durante el desarrollo de las pruebas experimentales se mantuvieron en reposo por 24 horas. Posteriormente, se determinaron las fracciones de agua emulsionada y de agua libre. Los resultados se indican en la **Tabla 3.3**. Es importante destacar que las emulsiones resultantes luego de separar el agua libre fueron muy estables.

Tabla 3.3 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada, para emulsiones inestables con el aceite pesado "T", a 25 °C

| Emulsión original (inestable) | Agua libre y agua emulsionada | | Emulsión resultante (estable) |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| | % vol. de agua libre/vol. total | % vol. de agua emulsionada/vol. total | % vol. de agua emulsionada/vol. emulsión estable |
| 35 | 20.4 | 14.6 | 18.4 |
| 40 | 17.1 | 22.9 | 27.6 |
| 60 | 36.3 | 23.8 | 37.3 |
| 70 | 55.0 | 15 | 33.3 |

3.4.2.5 Efecto del agente tensoactivo sobre las emulsiones

Se prepararon emulsiones con el aceite "T" y el agente tensoactivo Q-233 para estudiar su efecto sobre la viscosidad. En la **Figura 3.23** se muestran los datos de viscosidad medidos para las emulsiones sin y con agente tensoactivo, a diferentes fracciones volumétricas de agua. Las pruebas se realizaron a 30 °C y con una velocidad de corte de 0.01 s⁻¹. Con el uso del agente Q-233 fue posible generar emulsiones medias a 40%, 50% y 60% en volumen de agua.

De acuerdo a la Figura 3.23, se observa que los valores de viscosidad de las emulsiones generadas en el rango de 0 a 30% en volumen de agua, sin y con agente tensoactivo, en ambos casos son mayores que el correspondiente al aceite puro (153,000 cp). No

obstante, los valores de viscosidad de las emulsiones con Q-233 son menores (aproximadamente en un 50%) a aquellos obtenidos con las emulsiones sin tensoactivo.

En la Figura 3.23 puede observarse que los sistemas formados con Q-233 presentan un punto de inversión al 30% en volumen de agua, como en el caso las emulsiones sin el uso de tensoactivo.

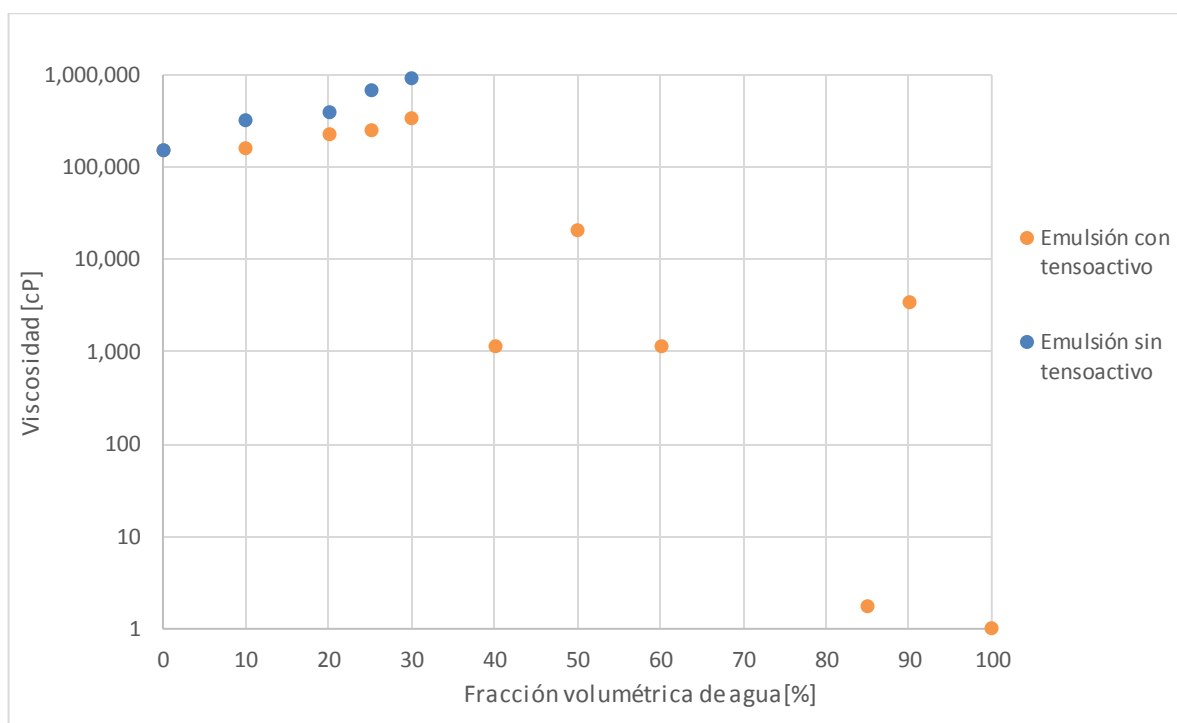


Figura 3.23 Comparación entre los valores de viscosidad para emulsiones con el aceite pesado “T”, sin y con agente tensoactivo Q-233, para diferentes valores de fracción volumétrica de agua, una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} y una temperatura de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.3 Sistema U

3.4.3.1 Caracterización reológica del aceite crudo

Los resultados obtenidos de la caracterización reológica del aceite pesado “U” a diferentes temperaturas se presentan en la **Figura 3.24**. Como puede observarse, el

aceite presenta un comportamiento reológico prácticamente newtoniano a 50 °C, con un valor promedio de viscosidad de 3100 cp. Conforme disminuye la temperatura, su comportamiento se hace cada vez más no-newtoniano (pseudo-plástico). De esta manera, su viscosidad a 30 °C disminuye de 73,000 a 16,200 cp con el incremento de la velocidad de corte de 0.01 a 100 s⁻¹.

En la Figura 3.24 se observa que el efecto de la reducción de la viscosidad con el incremento de la temperatura de 30 a 40 °C disminuye conforme aumenta la velocidad de corte. Por otra parte, se ve que a temperaturas mayores la viscosidad disminuye aproximadamente a la mitad por cada 10 °C de incremento.

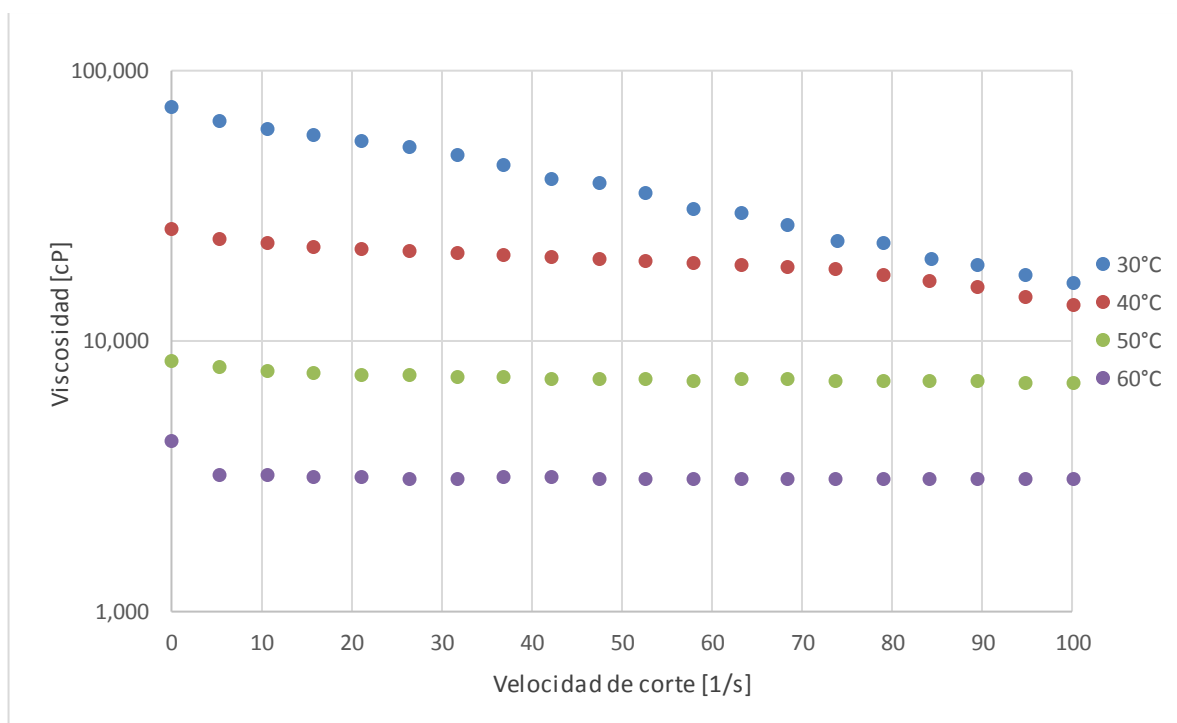


Figura 3.24 Comportamiento reológico del aceite pesado “U”, a diferentes temperaturas.

3.4.3.2 Caracterización reológica de las emulsiones

Se realizaron pruebas experimentales para determinar el comportamiento reológico de emulsiones formadas con el aceite pesado “U” (sin utilizar tensoactivos), a diferentes

porcentajes de agua y temperaturas. El tiempo promedio de mezclado fue de una hora, a 15,000 rpm. Las emulsiones formadas con hasta el 50% en volumen de agua resultaron estables. A porcentajes mayores, presentaron separación de fases. Los resultados obtenidos a 60 °C se muestran en la **Figura 3.25**. Los datos registrados a otras temperaturas se presentan en el anexo B.

De acuerdo a la Figura 3.25, se ve que las emulsiones formadas con porcentajes volumétricos de agua de hasta 30% tienden a presentar un comportamiento newtoniano a 60 °C. A porcentajes mayores de agua, se observa un comportamiento no newtoniano.

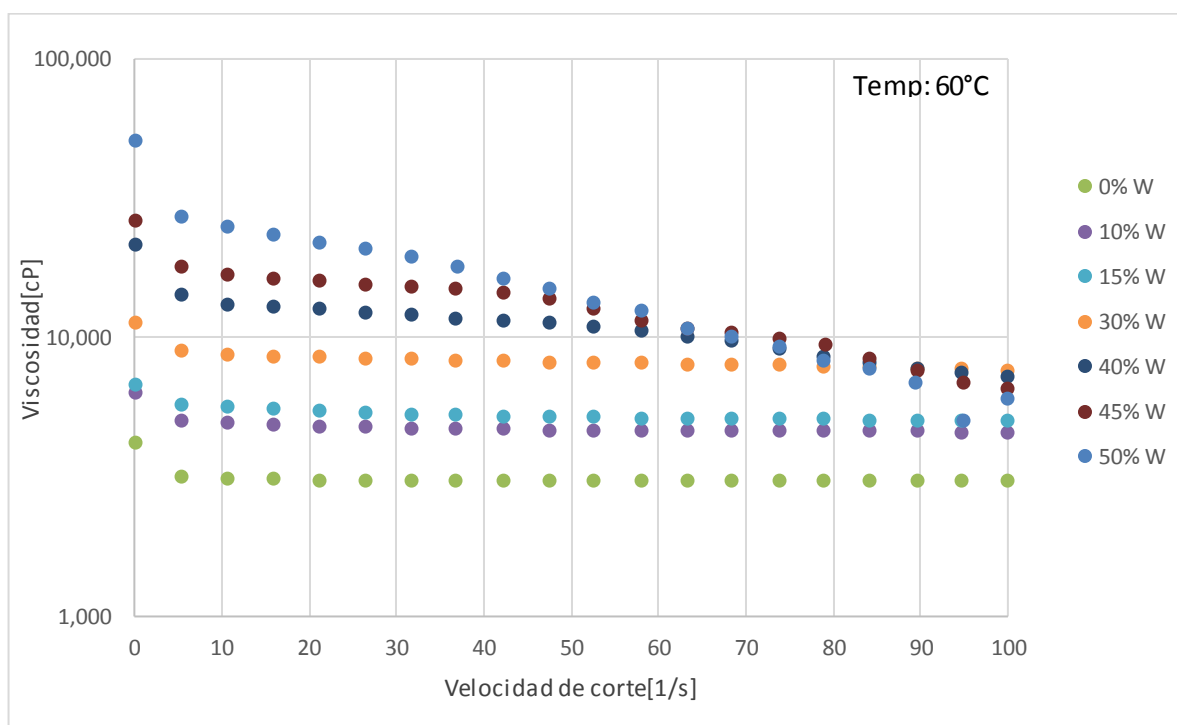


Figura 3.25 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C.

3.4.3.3 Punto de inversión de fase

La **Figura 3.26** muestra el comportamiento de la viscosidad de las emulsiones en función del porcentaje agua, a diferentes temperaturas y una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} . De acuerdo a los resultados mostrados, en el rango de temperaturas de 30 a 60 °C, el punto

de inversión de fases ocurre a aproximadamente el 50% en volumen de agua. Manteniendo constante la temperatura, se observa que la viscosidad se incrementa un orden de magnitud con el incremento de la fracción volumétrica de agua de cero a 50%. Por ejemplo, a 30 °C la viscosidad aumenta de 73,200 a 674,000 cp.

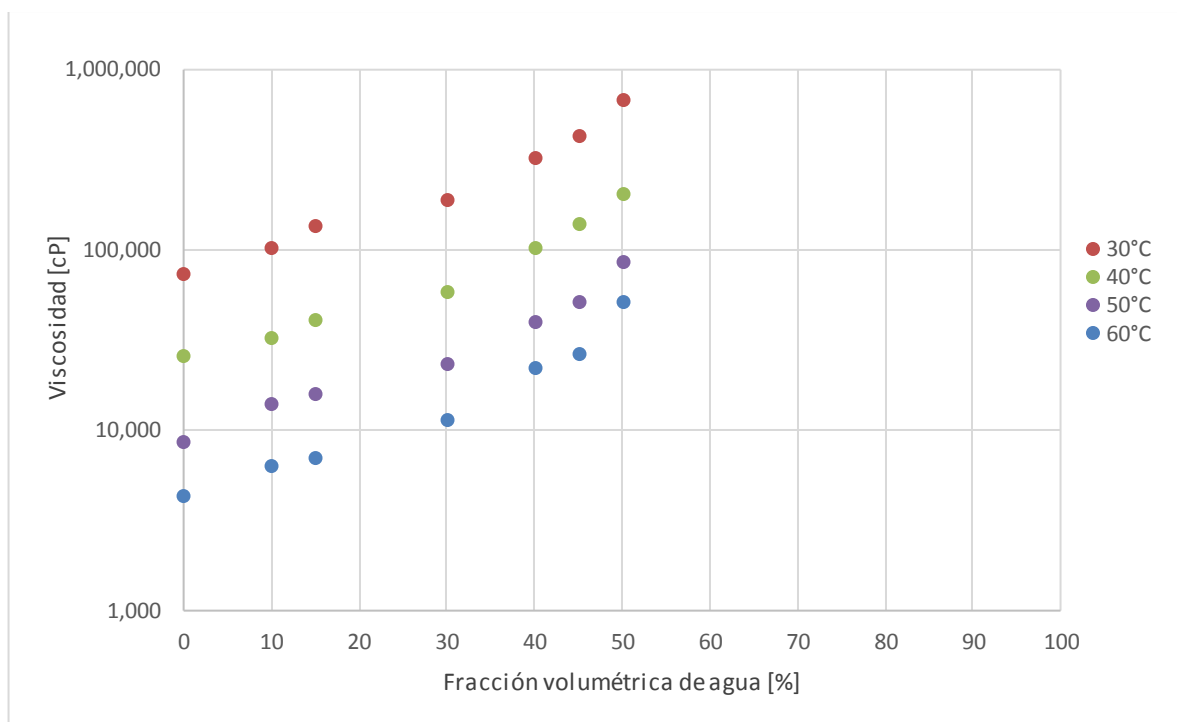


Figura 3.26 Efecto de la fracción volumétrica de agua sobre la viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes temperaturas y una velocidad de corte = 0.01 s⁻¹.

3.4.3.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada

En la **Tabla 3.4** se indican las fracciones de agua emulsionada y de agua libre que se determinaron a partir de las emulsiones que resultaron inestables (fracciones volumétricas de agua mayores de 50%).

Tabla 3.4 Fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada, para emulsiones inestables con el aceite pesado “U”, a 25 °C

| Emulsión original (inestable) | Agua libre y agua emulsionada | | Emulsión resultante (estable) |
|----------------------------------|------------------------------------|---|----------------------------------|
| | % vol. de agua libre/vol. total | % vol. de agua emulsionada/vol. total | |
| 60 | 47.5 | 12.5 | 23.8 |
| 85 | 75.7 | 9.3 | 38.2 |
| 90 | 71.4 | 18.6 | 65.0 |

3.4.3.5 Efecto del agente tensoactivo sobre las emulsiones

Se prepararon emulsiones con el aceite pesado “U”, con y sin el agente tensoactivo Q-233, a diferentes fracciones volumétricas de agua y 30 °C. En la **Figura 3.27** se comparan las curvas de viscosidad obtenidas a una velocidad de corte de 0.01 s⁻¹. Con base en los resultados experimentales, es interesante mencionar que el punto de inversión de fases para las emulsiones con Q-233 se presentó a una menor fracción volumétrica de agua que en el caso sin tensoactivo. Así, el punto de inversión se redujo a un valor de 40% en volumen de agua con el uso del agente Q-233. Sin el uso del tensoactivo fue de 50%.

Ahora bien, a diferencia de los casos correspondientes a los aceites “A” y “T”, en la Figura 3.27 se ve que el tensoactivo Q-233 no tiene un efecto significativo sobre la reducción de la viscosidad de las emulsiones generadas con el aceite “U”. Esto puede atribuirse a diferencias composicionales entre los diferentes tipos de aceite analizados. Por lo tanto, es recomendable en trabajos futuros probar el uso de otros tensoactivos para reducir la viscosidad de este aceite.

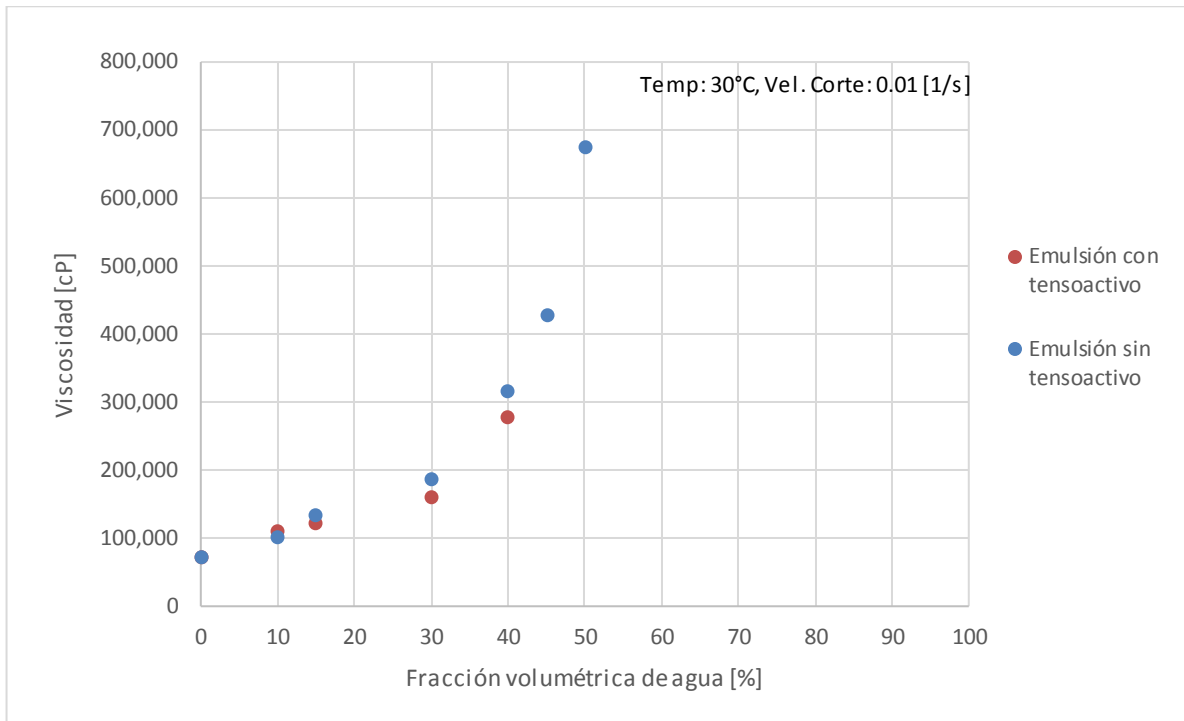


Figura 3.27 Comparación entre los valores de viscosidad para emulsiones con el aceite pesado “U”, sin y con agente tensoactivo Q-233, para diferentes valores de fracción volumétrica de agua, una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} y una temperatura de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

CAPÍTULO 4

AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES PARA ESTIMAR LA VISCOSIDAD DE EMULSIONES

En este capítulo se presenta un conjunto de correlaciones para estimar la viscosidad de emulsiones de agua en aceite, para los aceites pesados “A”, “T” y “U” de campos costa afuera de México. Primeramente, se describe el procesado de los datos experimentales de viscosidad utilizados. Se proponen y evalúan diferentes relaciones funcionales para desarrollar las correlaciones. Se describe el criterio de evaluación utilizado y se discuten los resultados de la misma.

4.1 PROCESADO DE DATOS EXPERIMENTALES

Los datos reológicos obtenidos de las pruebas experimentales descritas en el capítulo tres fueron procesados a efecto de utilizarlos en el desarrollo de correlaciones para estimar la viscosidad de emulsiones. Se realizaron 94 pruebas con los aceites pesados “A”, “T” y “U”, obteniéndose un total de 445 datos de viscosidad en función de la velocidad de corte, la temperatura y la fracción volumétrica de agua. El procesado referido consistió en el filtrado y suavizado de los datos.

En cuanto al filtrado, primeramente se seleccionaron las series de datos de las emulsiones de agua en aceite identificadas como estables, y que presentaban un incremento de la viscosidad con la fracción volumétrica de agua. En segundo lugar, se

eliminaron aquellos puntos fuera de las curvas de tendencia. Posteriormente, los datos seleccionados fueron suavizados mediante una técnica de promedio móvil con una ventana de tres puntos.

A continuación se presentan gráficamente los datos procesados que fueron utilizados en el desarrollo de correlaciones para predecir la viscosidad de las emulsiones con los aceites pesados “A”, “T” y “U”.

4.1.1 Datos procesados para las emulsiones agua- aceite pesado “A”

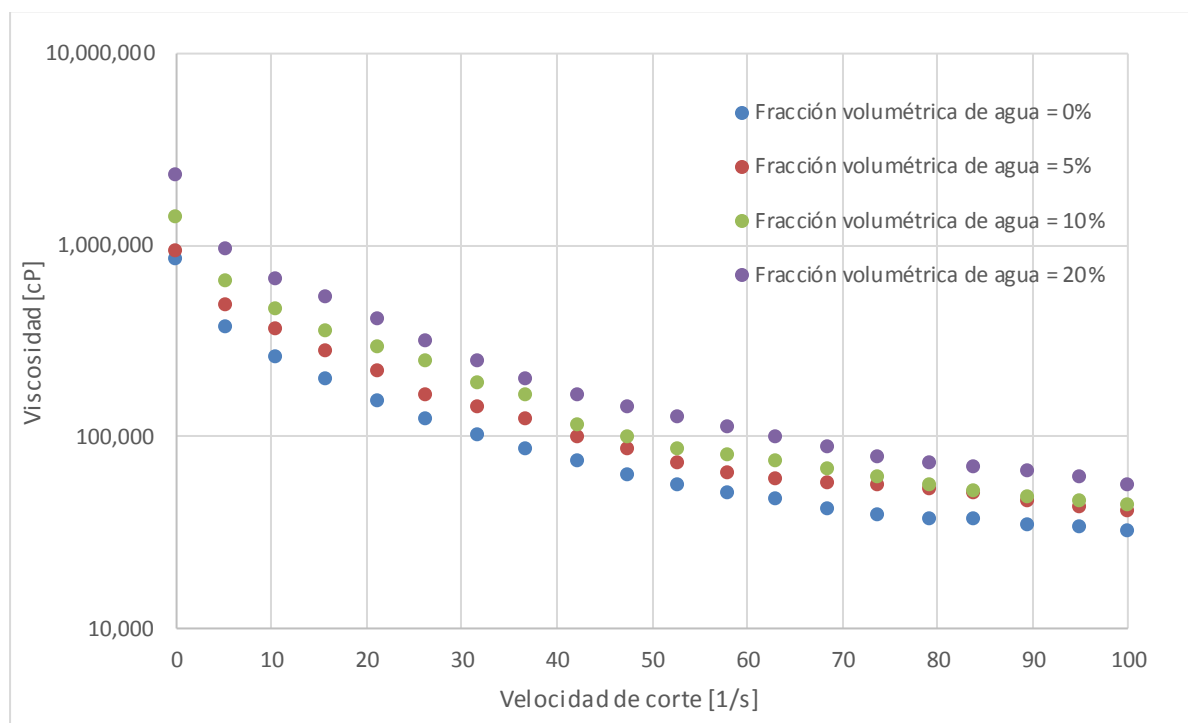


Figura 4.1 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 30°C

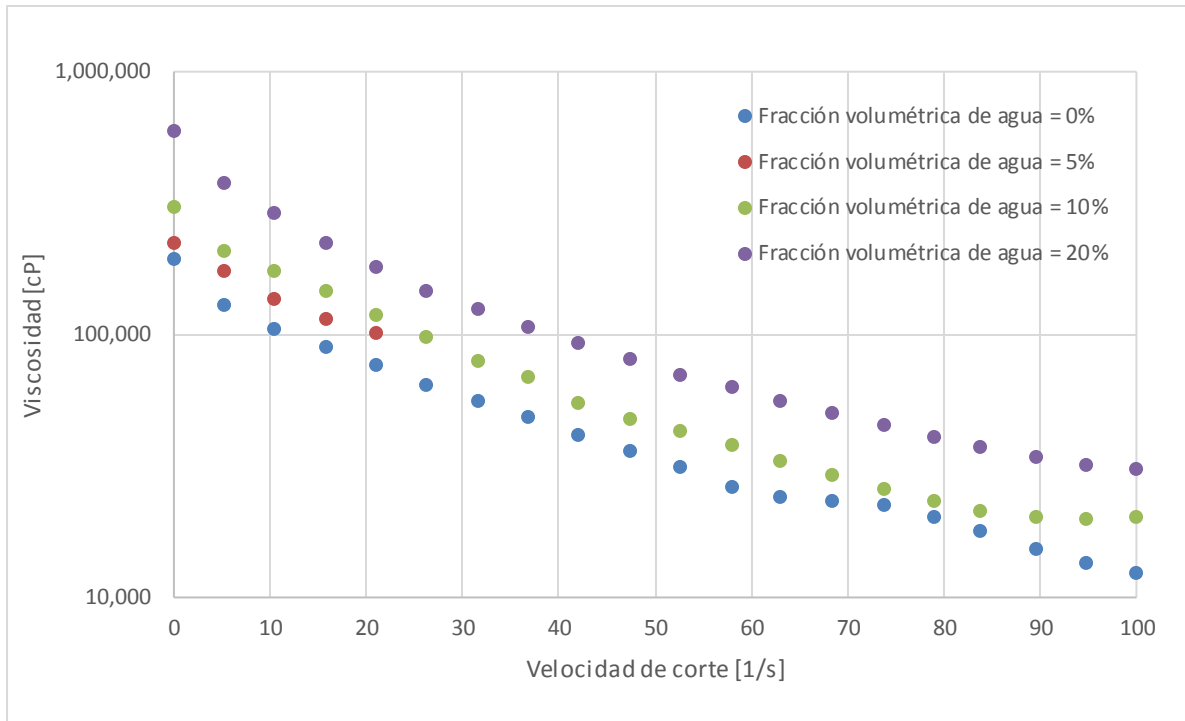


Figura 4.2 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 40°C

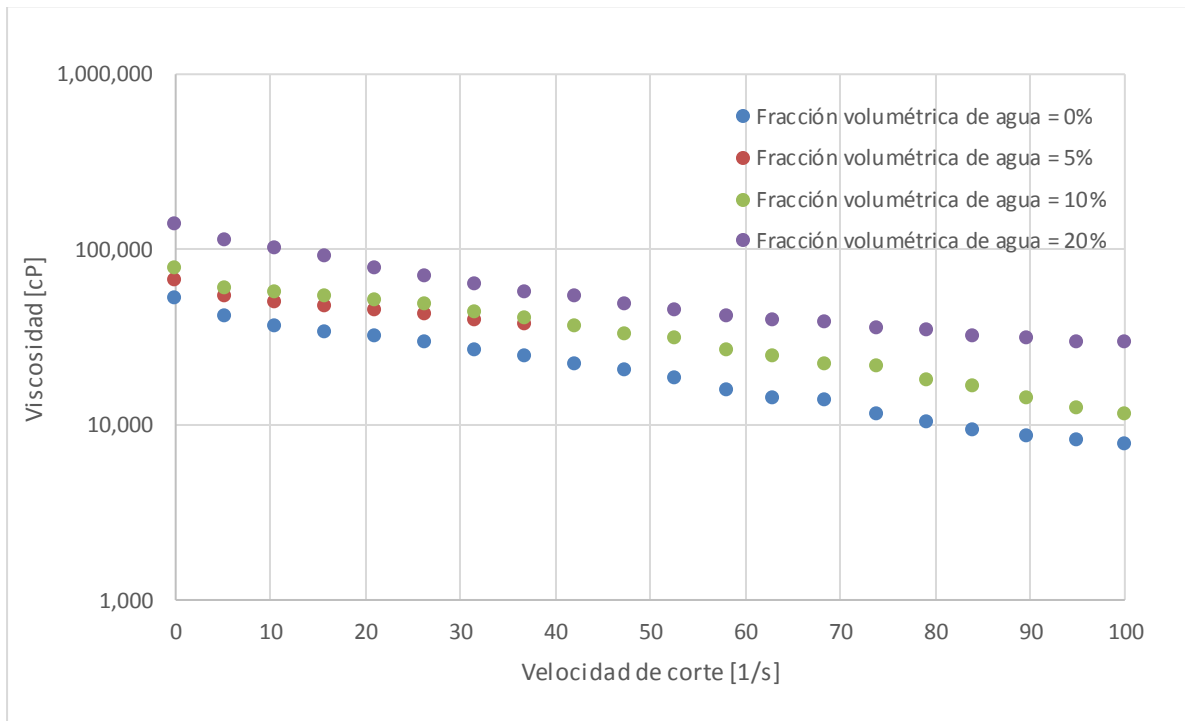


Figura 4.3 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 50°C

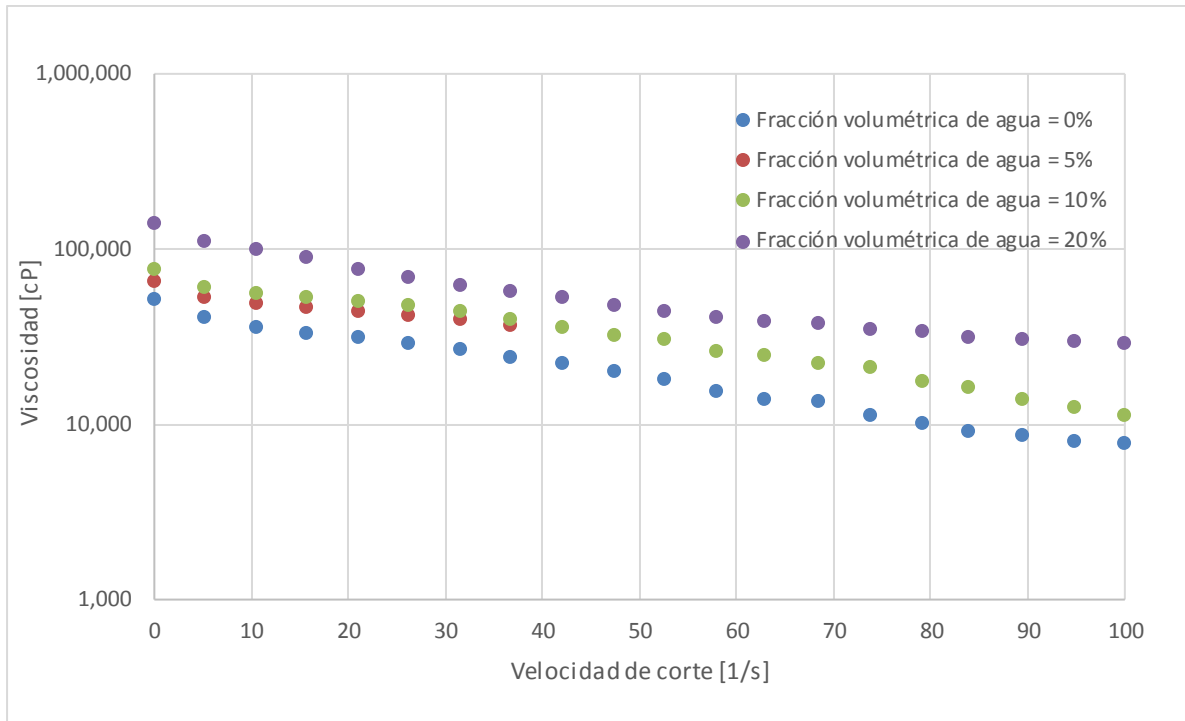


Figura 4.4 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a 60°C

4.1.2 Datos procesados para las emulsiones agua- aceite pesado “T”

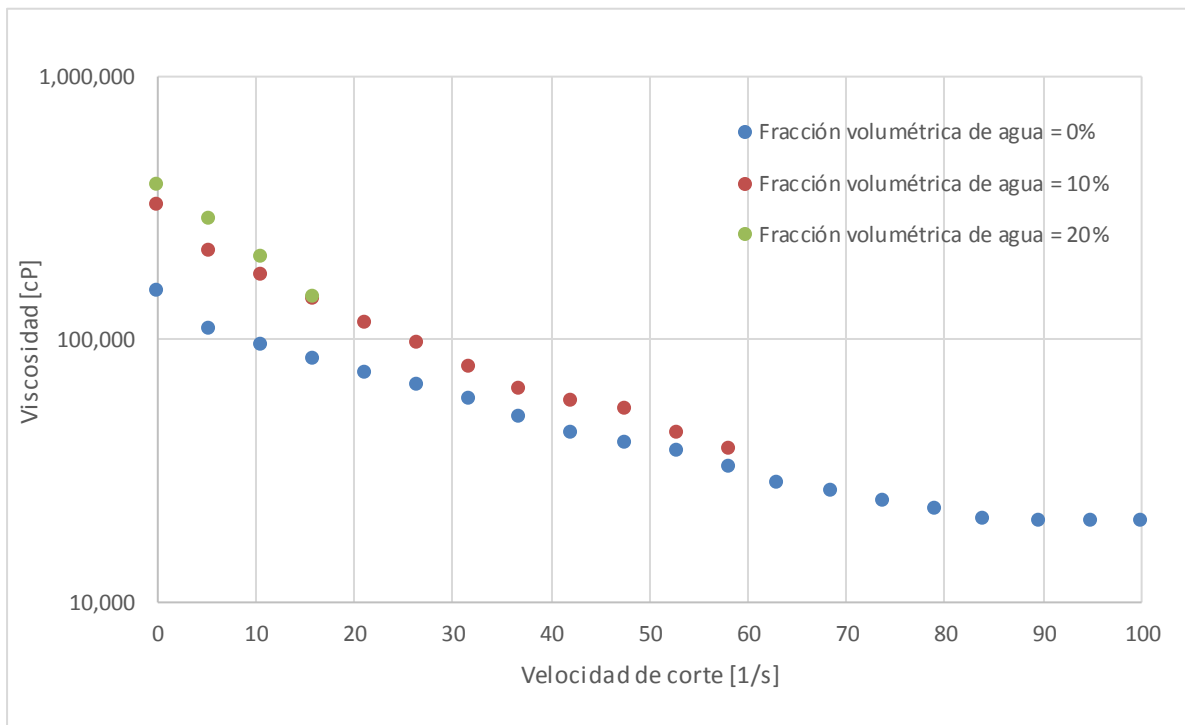


Figura 4.5 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a 30°C

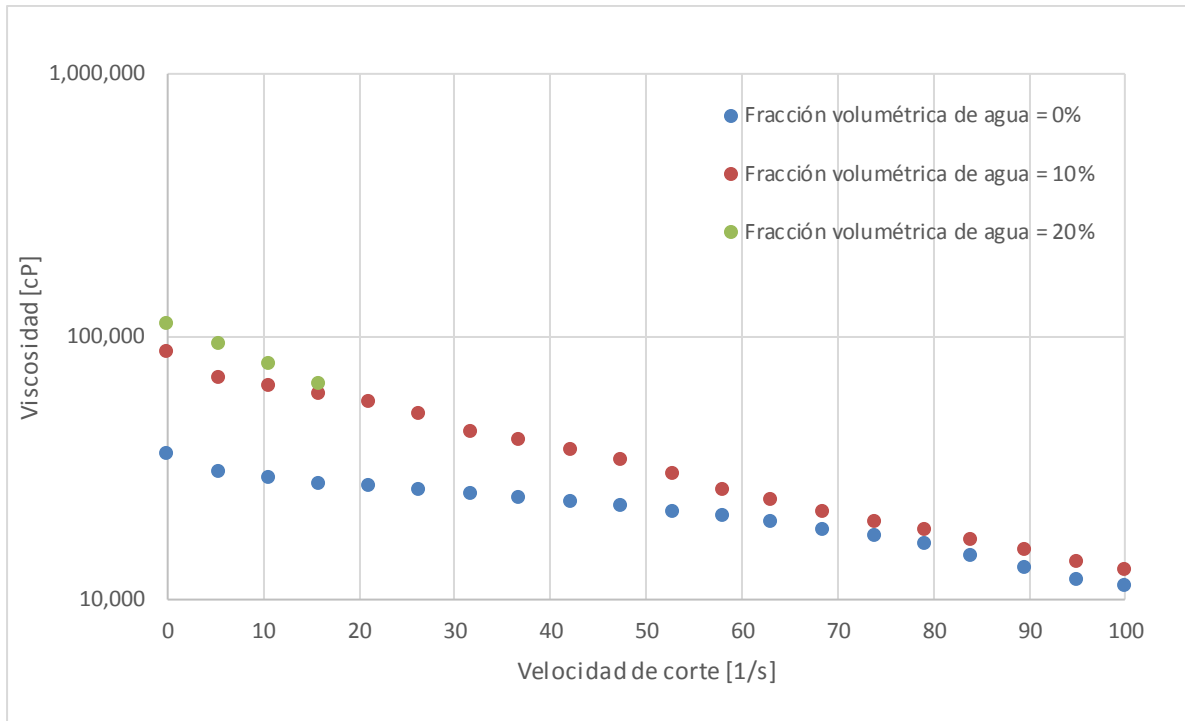


Figura 4.6 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado "T", a 40°C

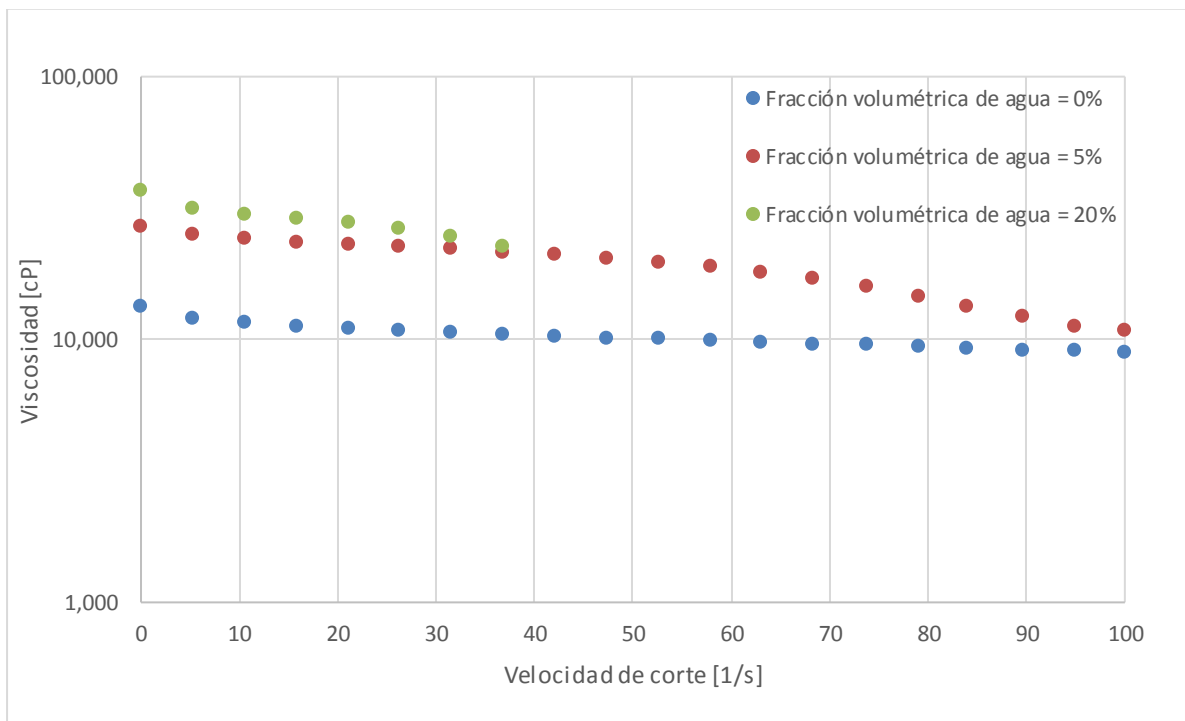


Figura 4.7 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado "T", a 50°C

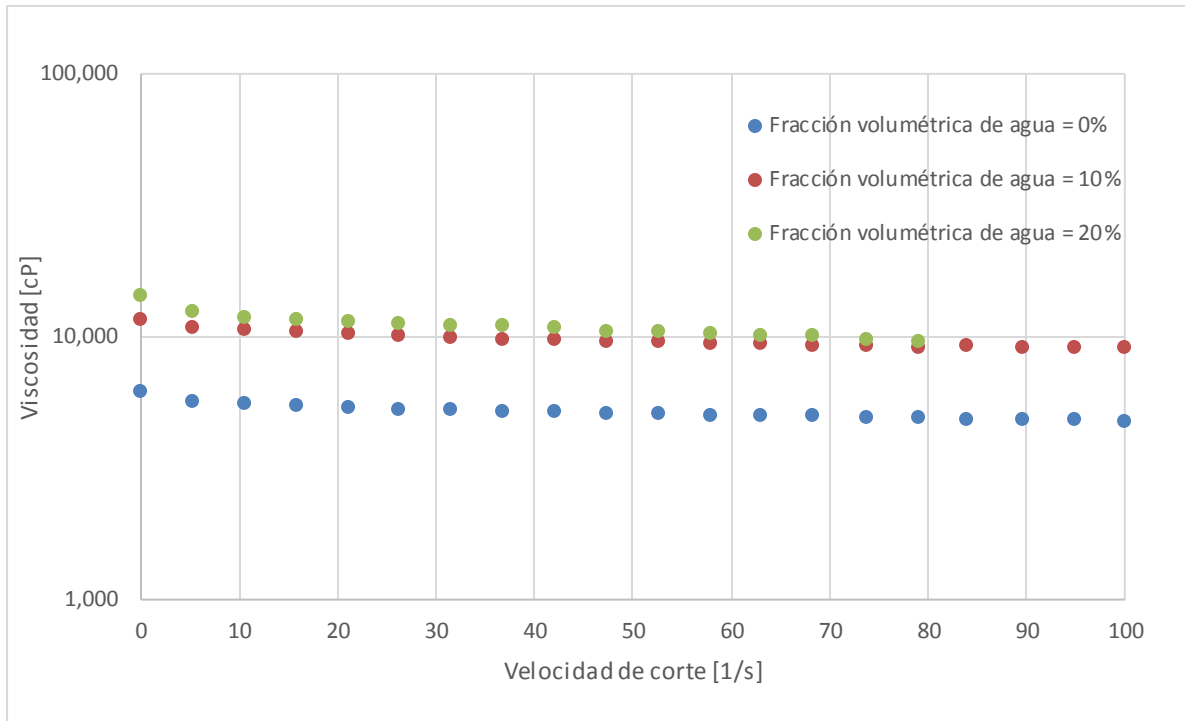


Figura 4.8 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado "T", a 60°C

4.1.3 Datos procesados para las emulsiones agua- aceite pesado "U"

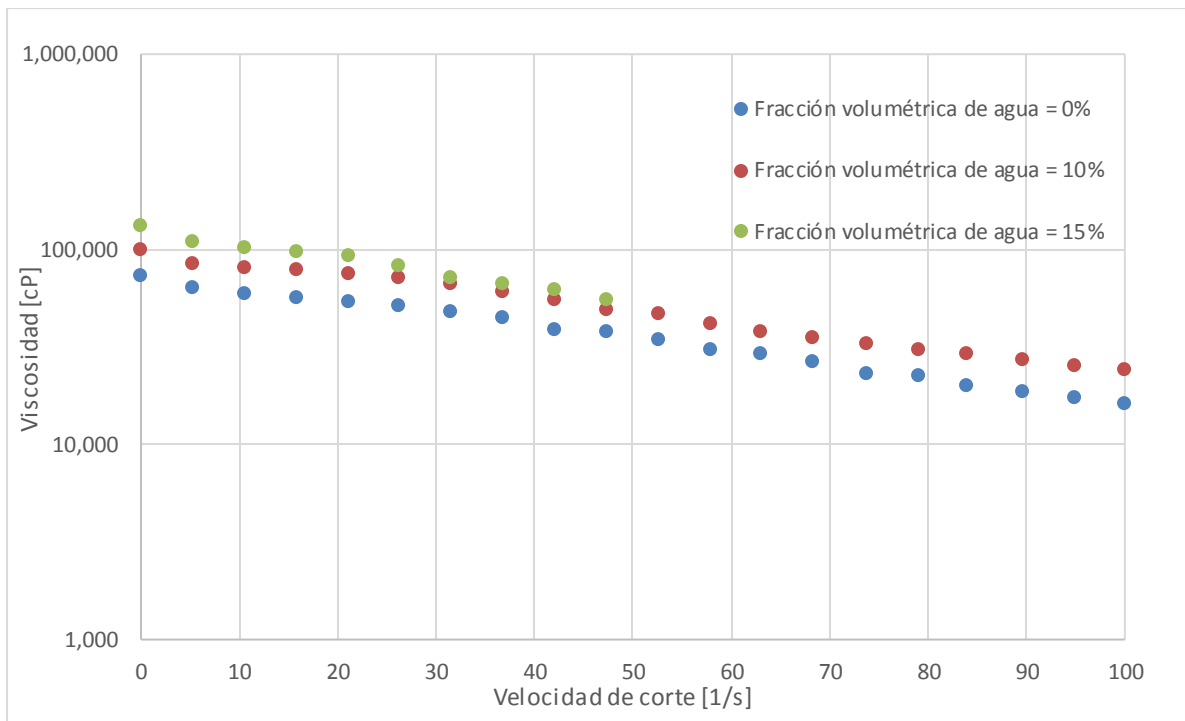


Figura 4.9 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado "U", a 30°C

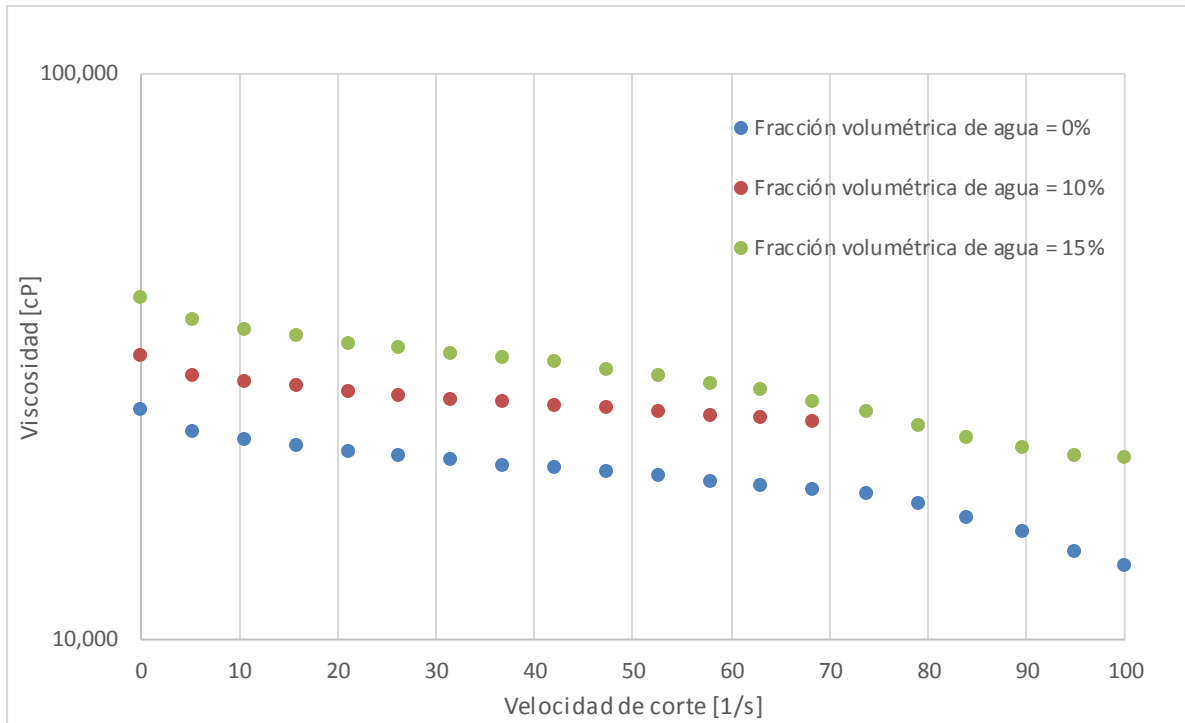


Figura 4.10 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado "U", a 40°C

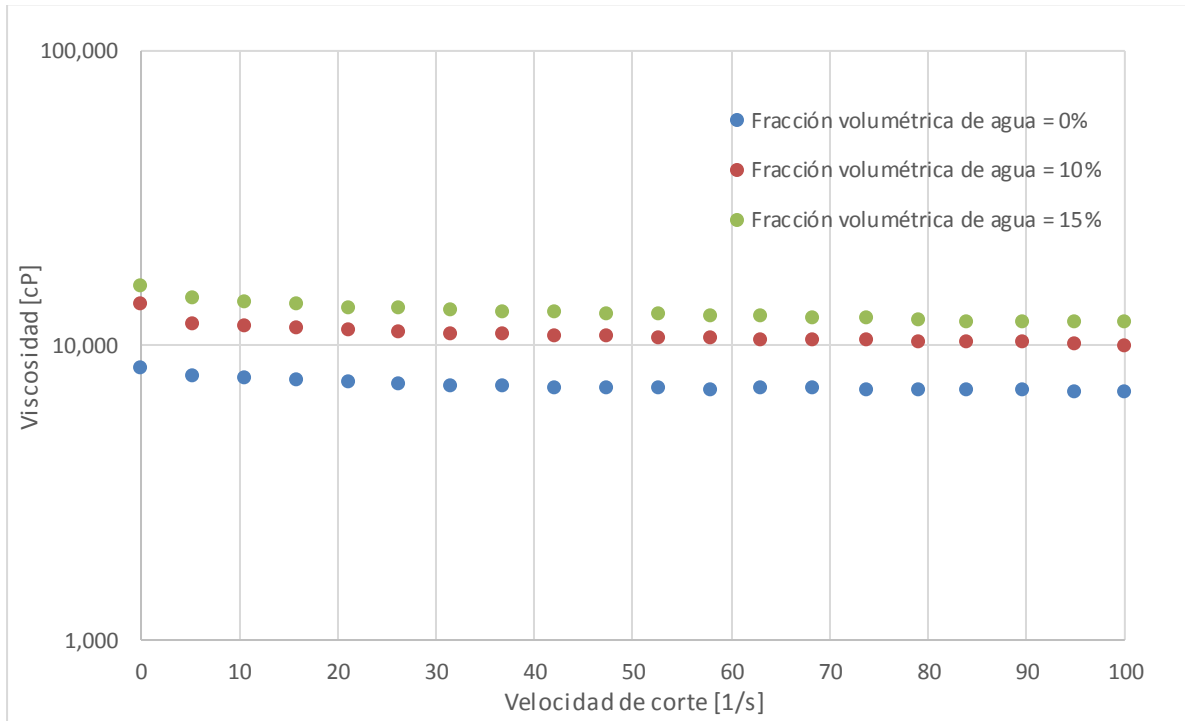


Figura 4.11 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado "U", a 50°C

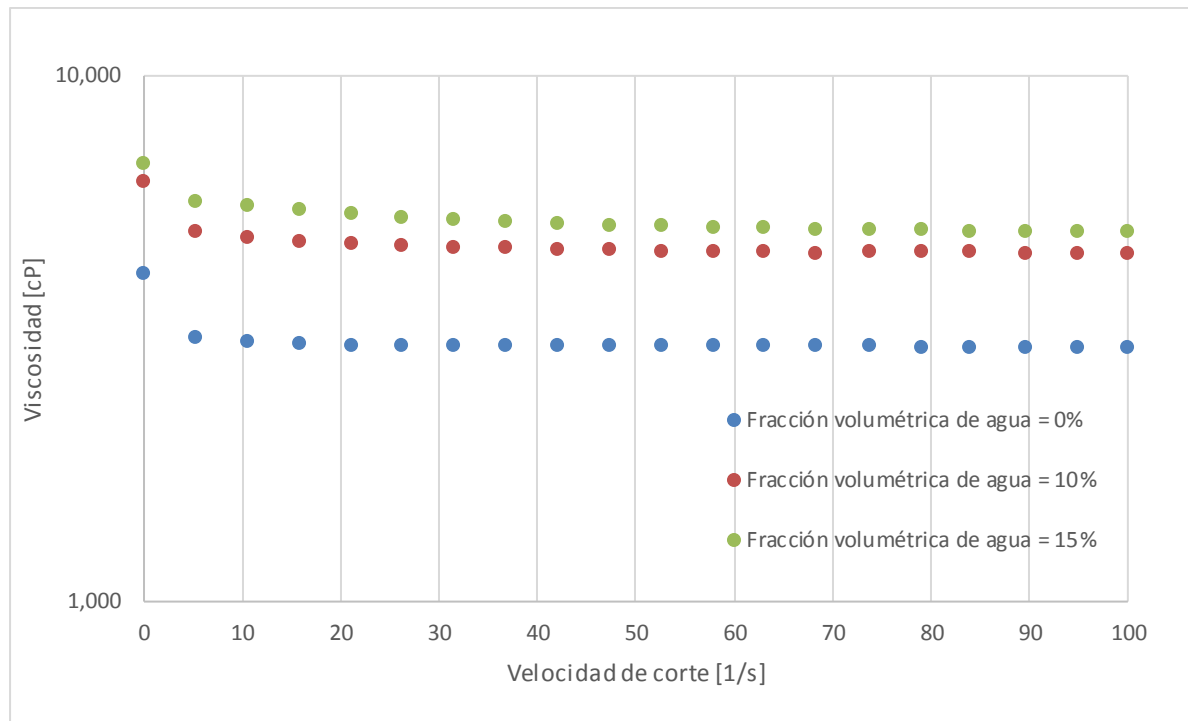


Figura 4.12 Viscosidad de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a 60°C

4.2 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN

Con base en los resultados de la revisión de la literatura (Ronningsen, 1995; Farah et al. 2005; Sefton y Sinton, 2010), se seleccionaron las relaciones funcionales indicadas en la **Tabla 4.1** como modelos base para el desarrollo de correlaciones para estimar la viscosidad de las emulsiones generadas con los aceites pesados “A”, “T”, y “U”. A partir de los datos experimentales procesados se calcularon las constantes de los modelos mediante un algoritmo de regresión no-lineal. Posteriormente, los modelos fueron evaluados para identificar la mejor correlación para cada aceite. En las siguientes secciones se describe el criterio de evaluación utilizado y los resultados de la misma.

Tabla 4.1 Relaciones funcionales consideradas en el desarrollo del modelo de regresión

| Modelo | Relación funcional |
|--------|---|
| M1 | $\ln\mu = K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi + K_5\gamma$ |
| M2 | $\ln\mu = (K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi) * e^{K_5\gamma}$ |
| M3 | $\ln\mu = (K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi) * \gamma^{K_5}$ |
| M4 | $\ln\mu = e^{(K_1+K_2T+K_3\Phi+K_4T\Phi+K_5\gamma)}$ |
| M5 | $\ln\mu = e^{(K_1+K_2T+K_3\Phi+K_4T\Phi+\gamma^{K_5})}$ |
| M6 | $\ln\mu = e^{(K_1+K_2T+K_3\Phi+K_4T\Phi)*\gamma^{K_5}}$ |
| M7 | $\ln\mu = (K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi) * e^{K_5\gamma^2}$ |
| M8 | $\ln\mu = (K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi) * e^{K_5/\gamma}$ |
| M9 | $\ln\mu = (K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi) * e^{K_5/\gamma^2}$ |
| M10 | $\ln\mu = K_1 + K_2T + K_3\Phi + K_4T\Phi + \frac{K_5}{\gamma}$ |

4.2.1 Criterios de evaluación

La evaluación de los modelos se llevó a cabo con base en el índice de comportamiento relativo (*Frp*). Este índice involucra el cálculo de diversos parámetros estadísticos, y permite identificar el modelo que mejor se ajusta a los datos experimentales. De acuerdo a Brill (1999), se define como:

$$Frp = \frac{|E_1| - |E_{1_{\min}}|}{|E_{1_{\max}}| - |E_{1_{\min}}|} + \frac{E_2 - E_{2_{\min}}}{E_{2_{\max}} - E_{2_{\min}}} + \frac{E_3 - E_{3_{\min}}}{E_{3_{\max}} - E_{3_{\min}}} + \frac{|E_4| - |E_{4_{\min}}|}{|E_{4_{\max}}| - |E_{4_{\min}}|} + \frac{E_5 - E_{5_{\min}}}{E_{5_{\max}} - E_{5_{\min}}} + \frac{E_6 - E_{6_{\min}}}{E_{6_{\max}} - E_{6_{\min}}}, \quad \dots \quad (4.1)$$

donde:

1. E_1 , promedio del error relativo:

$$E_1 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{ri} \right) * 100 , \dots\dots\dots (4.2)$$

donde:

$$e_{ri} = \frac{\mu_{i\text{-calculada}} - \mu_{i\text{-medida}}}{\mu_{i\text{-medida}}} . \dots\dots\dots (4.3)$$

2. E_2 , promedio del error relativo absoluto:

$$E_2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_{ri}| \right) * 100 . \dots\dots\dots (4.4)$$

3. E_3 , desviación estándar del error relativo:

$$E_3 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(e_{ri} - E_1)^2}{n - 1}} . \dots\dots\dots (4.5)$$

4. E_4 , error promedio:

$$E_4 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \right) , \dots\dots\dots (4.6)$$

donde:

$$e_i = \mu_{i\text{-calculada}} - \mu_{i\text{-medida}} . \dots\dots\dots (4.7)$$

5. E_5 , error absoluto promedio:

$$E_5 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \right) . \dots\dots\dots (4.8)$$

6. E_6 , desviación estándar del error:

$$E_6 = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(e_i - E_4)^2}{n - 1}} \dots\dots\dots (4.9)$$

Los valores mínimos y máximos posibles para *Frp* son 0 y 6, indicando el mejor y el peor comportamiento, respectivamente.

4.2.2 Resultados de la evaluación

En la **Tabla 4.2** se indica el índice de comportamiento relativo (*Frp*) calculado para cada modelo de regresión, incluyendo también el modelo de Ronningsen descrito en el capítulo 2. Para cada tipo de aceite, la correlación mejor evaluada se marca con color verde (el menor *Frp*). Los segundos y terceros lugares se indican con amarillo y azul, respectivamente.

De acuerdo a los resultados mostrados, el modelo M4 es el que mejor reproduce los datos de viscosidad de la emulsiones con el aceite “A”. En el caso de los aceites “T” y “U”, el mejor modelo es el M2.

Tabla 4.2 Evaluación de modelos para calcular la viscosidad de las emulsiones

| Modelo | Índice de comportamiento relativo, <i>Frp</i> | | |
|------------|---|------------|------------|
| | Aceite “A” | Aceite “T” | Aceite “U” |
| Ronningsen | 5.0 | 2.7 | 4.9 |
| M1 | 3.3 | 1.66 | 2.5 |
| M2 | 2.5 | 1.16 | 1.1 |
| M3 | 3.4 | 1.67 | 3.4 |
| M4 | 1.0 | 1.17 | 1.4 |
| M5 | 1.9 | 1.73 | 3.9 |
| M6 | 2.6 | 1.89 | 3.3 |
| M7 | 4.1 | 1.87 | 3.9 |
| M8 | 3.9 | 1.80 | 4.0 |
| M9 | 3.9 | 1.80 | 4.0 |
| M10 | 4.1 | 1.85 | 3.9 |

Con la finalidad de proponer una relación funcional general para los tres sistemas analizados, se seleccionó el modelo M2. Como puede verse en la tabla 4.2, éste fue el mejor evaluado para los aceites “T” y “U”; para el aceite “A”, resultó en el segundo lugar. En la siguiente sección se indican los valores calculados para las constantes del modelo, para cada tipo de aceite.

4.3 AJUSTE DE DATOS EXPERIMENTALES

En esta sección se presentan las correlaciones desarrolladas para estimar la viscosidad de las emulsiones de agua en los aceites pesados “A”, “T”, y “U”. Adicionalmente, para complementar el presente trabajo se desarrollaron correlaciones para calcular la viscosidad de estos aceites en función de la velocidad de corte y la temperatura. La evaluación estadística de las correlaciones propuestas se presenta en el capítulo 5.

4.3.1 Viscosidad de aceites “A”, “T”, y “U”

a) Aceite pesado “A”

$$\mu_o = K_1 * e^{K_2 T} \gamma^{(K_3 T^2 + K_4 T + K_5)} \dots\dots\dots (4.10)$$

donde:

- K1= 68385055.0856
- K2= -0.1289
- K3= -0.0001
- K4= 0.0222
- K5= -1.3686

b) Aceite pesado "T"

$$\mu_o = (K_1 T^3 + K_2 T^2 K_3 T + K_4) * e^{(K_5 T^3 + K_6 T^2 + K_7 T + K_8) \gamma} \dots\dots\dots (4.11)$$

donde:

- K1= -7.0498
- K2= 1146.9429
- K3= -62609.1974
- K4= 1155495.0123
- K5= -0.000001
- K6= 0.0001
- K7= -0.0017
- K8= -0.0211

c) Aceite pesado "U"

$$\mu_o = (K_1 T^3 + K_2 T^2 K_3 T + K_4) * \gamma + K_5 e^{(-K_6 T)} \dots\dots\dots (4.12)$$

donde:

- K1= 0.0568
- K2= 8.7278
- K3= 445.3905
- K4= 7566.6121
- K5= 1356987.8287
- K6= 0.1015

En las ecuaciones 4.10, a 4.12, las unidades son:

- μ_o es la viscosidad en cp
- T es la temperatura en °C, y
- γ es la velocidad de corte en s⁻¹.

4.3.2 Viscosidad de las emulsiones

Modelo general:

$$\ln \mu_r = (K_1 + K_2 T + K_3 \Phi + K_4 T \Phi) * e^{K_5 \gamma} , \dots\dots\dots (4.13)$$

donde:

μ_r es la viscosidad relativa

T es la temperatura en °C,

Φ es la fracción volumétrica de agua en fracción, y

γ es la velocidad de corte en s^{-1} .

En la **Tabla 4.3** se indican los valores de las constantes K_1 a K_5 en la ecuación 4.13, correspondiente a las emulsiones con cada tipo de aceite pesado. **La validez de las correlaciones está restringida a valores menores de 20% en volumen de agua, velocidades de corte hasta $100 s^{-1}$, y temperaturas de 30 a 60 °C.**

Tabla 4.3 Constantes de la correlación para calcular la viscosidad de emulsiones

| Constantes | Aceite "A" | Aceite "T" | Aceite "U" |
|------------|------------|------------|------------|
| K1 | -0.2190 | -0.6456 | -0.0812 |
| K2 | 0.0093 | 0.0243 | 0.0038 |
| K3 | 3.9357 | 0.0761 | 2.5499 |
| K4 | 0.0070 | -0.0011 | 0.0075 |
| K5 | -0.0027 | -0.0071 | -0.0013 |

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN

En este capítulo se presenta la evaluación estadística de las correlaciones seleccionadas para predecir la viscosidad de las emulsiones formadas con los aceites pesados A, T y U. La evaluación se realiza considerando datos medidos de viscosidad del aceite, así como valores calculados con correlaciones desarrolladas para tal efecto. Se presenta la correlación propuesta para calcular la viscosidad de cada aceite en función de la velocidad de corte y la temperatura.

5.1 RESULTADOS PARA EL ACEITE PESADO “A”

A continuación se presentan los resultados de la evaluación estadística de las correlaciones propuestas para calcular la viscosidad del aceite pesado “A”, y de sus emulsiones.

5.1.1 Correlación para la viscosidad del aceite pesado “A”

La correlación propuesta para calcular la viscosidad del aceite pesado “A” es:

$$\mu_o = K_1 * e^{K_2 T} \gamma^{(K_3 T^2 + K_4 T + K_5)}$$

donde:

$K1= 6.8385 \text{ E}7$
 $K2= -0.1289$
 $K3= -0.0001$
 $K4= 0.0222$
 $K5= -1.3686$

μ_0 es la viscosidad del aceite en cp
 T es la temperatura en °C, y
 γ es la velocidad de corte en s^{-1} .

En la **Tabla 5.1** se indican los parámetros estadísticos principales obtenidos, y en la **Figura 5.1** se comparan los valores de viscosidad calculados contra los medidos. De acuerdo a la Tabla 5.1, el error relativo absoluto promedio es de 20%, la desviación estándar es 9,500 cp, y el coeficiente de correlación es 0.98. Por otra parte, en la Figura 5.1 se observa que la mayor parte de los valores calculados se encuentran dentro de una banda de $\pm 30\%$. Tomando en cuenta que la viscosidad del aceite puede variar en el rango de 10^4 a 10^6 cp, dependiendo de la temperatura y la velocidad de corte, estos resultados son aceptables.

Tabla 5.1 Evaluación de la correlación para la viscosidad del aceite pesado "A"

| Error Relativo Promedio | Error Relativo Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coefficiente de correlación |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -8.26 | 19.84 | 9,505 | -823 | 0.98 |

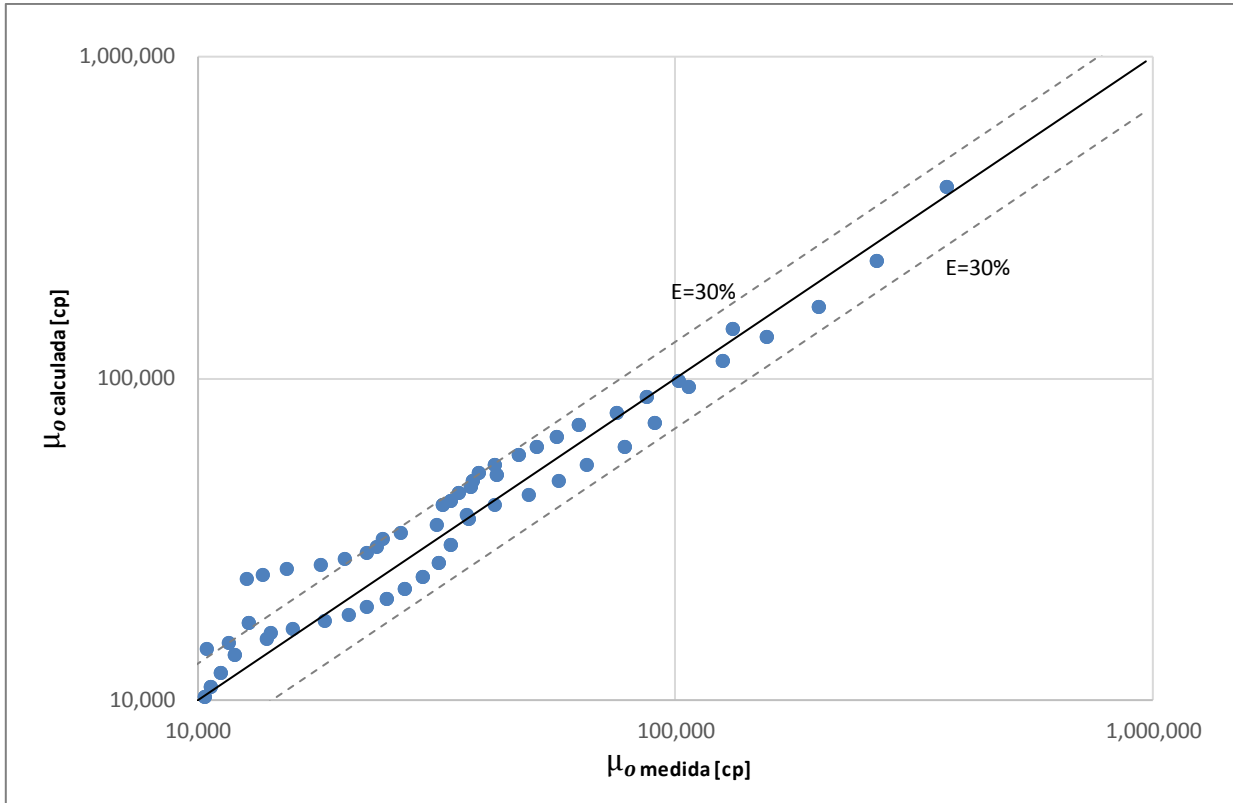


Figura 5.1 Viscosidad calculada vs viscosidad medida para el aceite pesado “A”

5.1.2 Correlación para la viscosidad de las emulsiones

La correlación propuesta para calcular la viscosidad de las emulsiones de agua en aceite pesado “A” es:

$$\ln \mu_r = (K_1 + K_2 T + K_3 \Phi + K_4 T \Phi) * e^{K_5 \gamma}$$

donde:

$$K_1 = -0.2190$$

$$K_2 = 0.0093$$

$$K_3 = 3.9357$$

$$K_4 = 0.0070$$

$$K_5 = -0.0027$$

μ_r es la viscosidad relativa,
 T es la temperatura en °C,
 Φ es la fracción volumétrica de agua en fracción, y
 γ es la velocidad de corte en s^{-1} .

a) Evaluación considerando únicamente datos experimentales

Se evaluó la correlación para calcular la viscosidad aparente de las emulsiones considerando únicamente datos experimentales. Los principales parámetros estadísticos obtenidos se indican en la **Tabla 5.2**. En la **Figura 5.2** se comparan los valores calculados y medidos de viscosidad aparente de las emulsiones.

Como puede observarse en la Tabla 5.2, el error relativo absoluto promedio y la desviación estándar de la correlación son 10.7% y 14,956 cp, respectivamente. El coeficiente de correlación es de 0.99, lo cual indica que la correlación reproduce bien los datos medidos. En la Figura 5.2 se observa que la mayoría de valores calculados de viscosidad se encuentran en una banda de $\pm 20\%$.

Tabla 5.2 Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite pesado "A"

| Error Relativo Promedio | Error Relativo Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coefficiente de correlación |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -0.89 | 10.71 | 14,956 | 2,171 | 0.99 |

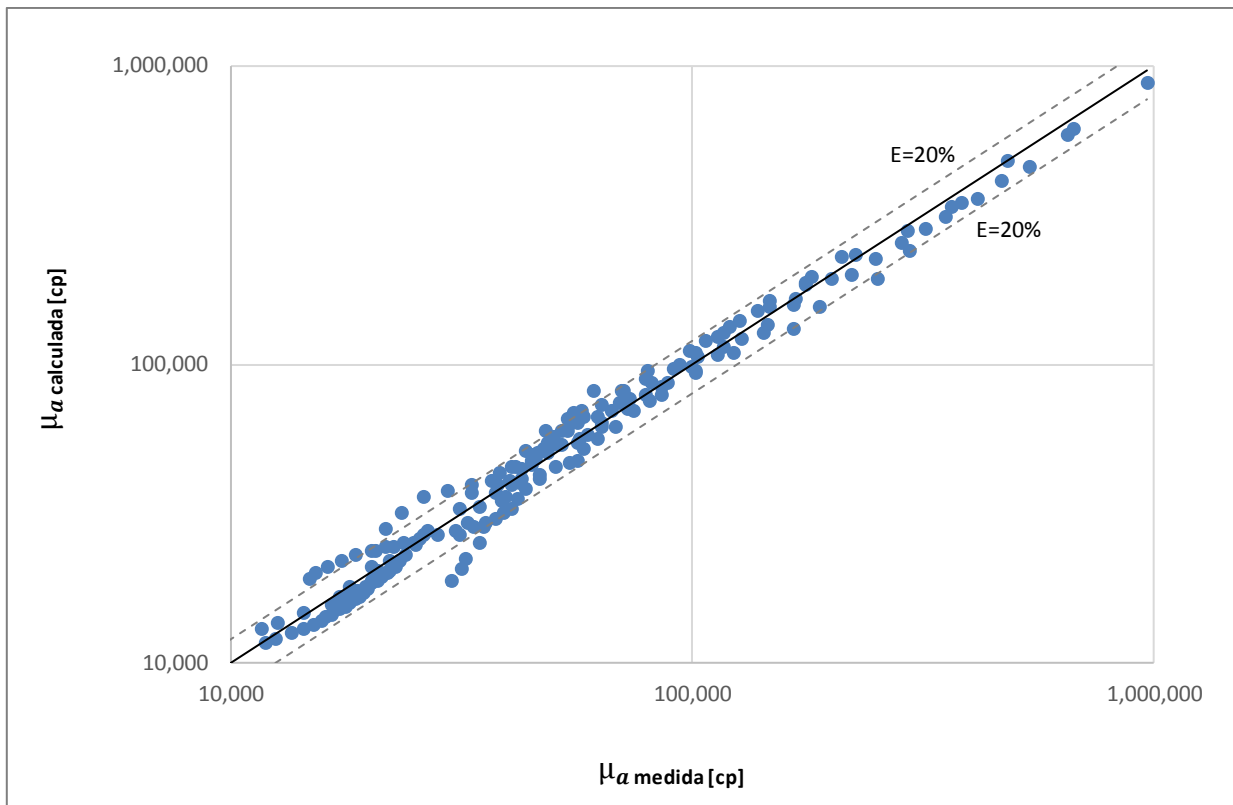


Figura 5.2 Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “A”, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite

b) Evaluación considerando valores calculados de la viscosidad del aceite “A”

Se evaluó el efecto de la viscosidad calculada del aceite sobre los resultados de la correlación para la viscosidad de las emulsiones. La viscosidad del aceite en función de la velocidad de corte y la temperatura fue calculada con la correlación presentada en la sección 5.1.1. Los principales parámetros estadísticos obtenidos se presentan en la **Tabla 5.3**. En la **Figura 5.3** se muestran los valores calculados de viscosidad aparente contra los valores medidos.

Al comparar la información de las Tablas 5.2 y 5.3, y las Figuras 5.2 y 5.3, se observa que el error en la estimación de la viscosidad de las emulsiones se incrementa cuando se utilizan valores calculados de viscosidad del aceite. Ahora bien, considerando que no siempre se tienen datos medidos de viscosidad del aceite, los resultados obtenidos

con la correlación de viscosidad del aceite y la correlación para la viscosidad relativa de las emulsiones, son aceptables para cálculos de ingeniería.

Tabla 5.3 Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando valores calculados de viscosidad del aceite pesado "A"

| Error Relativo Promedio | Error Relativo Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coefficiente de correlación |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -8.76 | 20.79 | 25,033 | 958 | 0.97 |

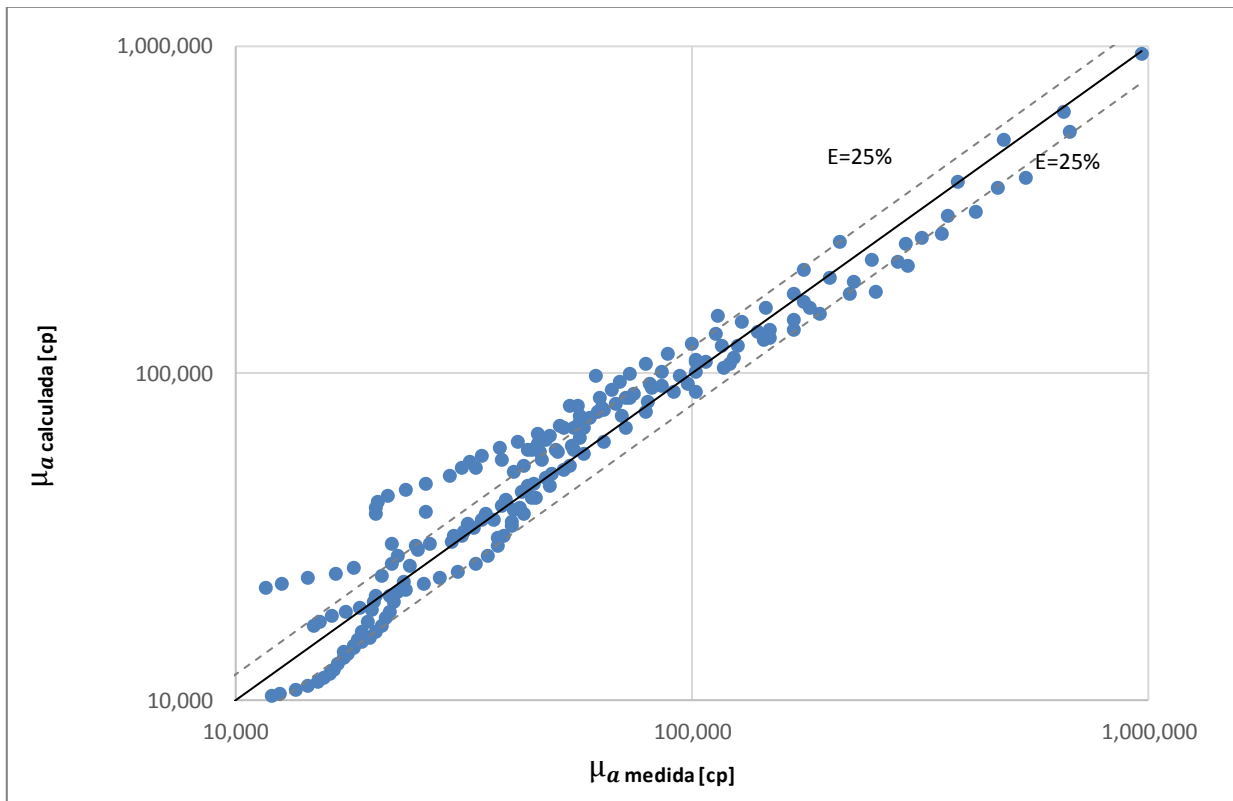


Figura 5.3 Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado "A", considerando valores calculados de la viscosidad del aceite

5.2 RESULTADOS PARA EL ACEITE PESADO “T”

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación estadística de las correlaciones propuestas para calcular la viscosidad del aceite pesado “T”, y de sus emulsiones.

5.2.1 Correlación para la viscosidad del aceite pesado “T”

La correlación propuesta para calcular la viscosidad del aceite pesado “T” es:

$$\mu_o = (K_1 T^3 + K_2 T^2 K_3 T + K_4) * e^{(K_5 T^3 + K_6 T^2 + K_7 T + K_8) \gamma}$$

donde:

$$\begin{aligned} K_1 &= -7.0498 \\ K_2 &= 1.147 \text{ E3} \\ K_3 &= -6.261 \text{ E4} \\ K_4 &= 1.156 \text{ E6} \\ K_5 &= -0.000001 \\ K_6 &= 0.0001 \\ K_7 &= -0.0017 \\ K_8 &= -0.0211 \end{aligned}$$

μ_o es la viscosidad del aceite en cp

T es la temperatura en °C, y

γ es la velocidad de corte en s⁻¹.

Los principales parámetros estadísticos calculados en la evaluación se indican en la **Tabla 5.4**. Por otra parte, en la **Figura 5.4** se comparan los valores de viscosidad calculados contra los medidos. Como puede observarse en la Tabla 5.4, el error relativo absoluto promedio es de 6%, la desviación estándar es 1,400 cp, y el coeficiente de correlación es 0.99. En la Figura 5.4 se ve que los valores calculados se encuentran dentro de una banda de ±10%, por lo que la correlación es satisfactoria.

Tabla 5.4 Evaluación de la correlación para la viscosidad del aceite pesado “T”

| Error Relativo Promedio | Error Relativo Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coefficiente de correlación |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R2 |
| -0.228 | 6.26 | 1,439 | -74 | 0.99 |

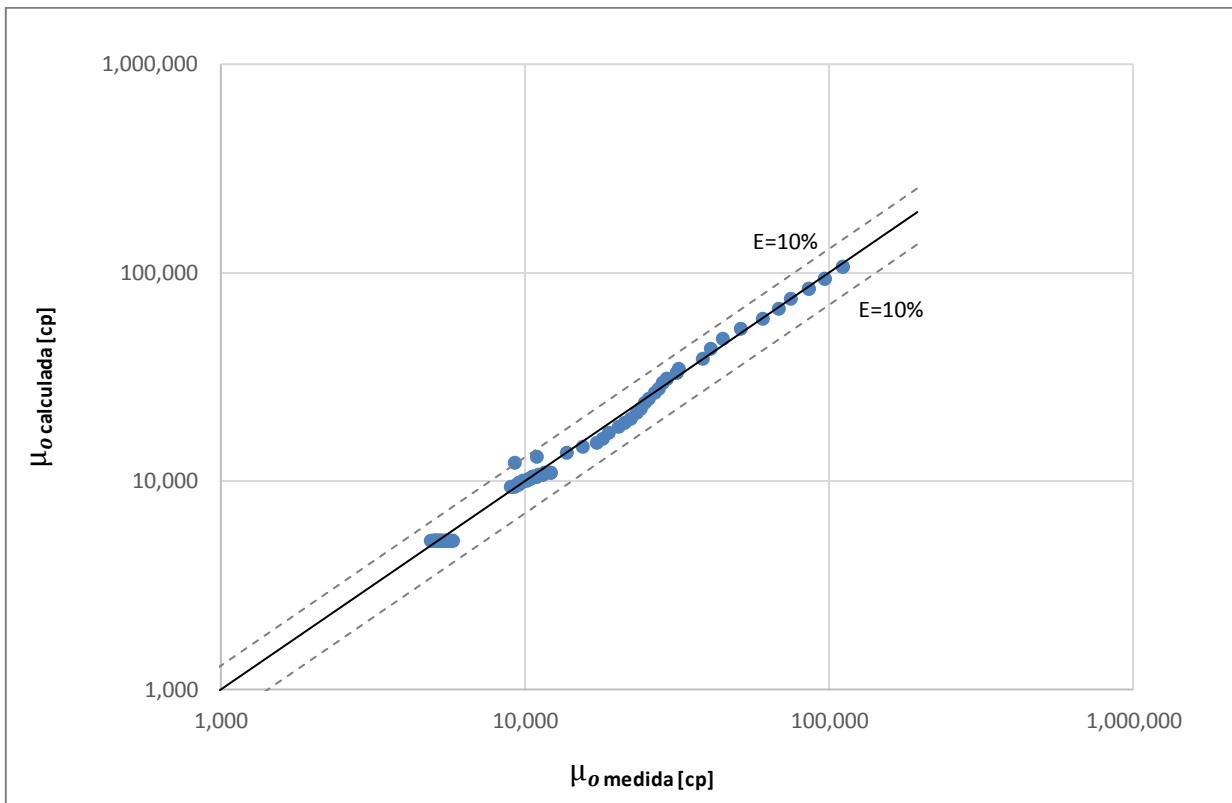


Figura 5.4 Viscosidad calculada vs viscosidad medida para el aceite pesado “T”

5.2.2 Correlación para la viscosidad de las emulsiones

La correlación propuesta para calcular la viscosidad de las emulsiones de agua en aceite pesado “T” es:

$$\ln \mu_r = (K_1 + K_2 T + K_3 \Phi + K_4 T \Phi) * e^{K_5 \gamma}$$

donde:

$$K1= -0.6456$$

$$K2= 0.0243$$

$$K3= 0.0761$$

$$K4= -0.0011$$

$$K5= -0.0071$$

μ_r es la viscosidad relativa,

T es la temperatura en °C,

Φ es la fracción volumétrica de agua en fracción, y

γ es la velocidad de corte en s^{-1} .

a) Evaluación considerando únicamente datos experimentales

Primeramente, se evaluó la correlación para calcular la viscosidad aparente de las emulsiones considerando únicamente datos experimentales. En la **Tabla 5.5** se indican los parámetros estadísticos obtenidos. Los valores calculados y medidos de viscosidad aparente de las emulsiones se comparan en la **Figura 5.5**.

De acuerdo a la Tabla 5.5, el error relativo absoluto promedio, la desviación estándar, y el coeficiente de correlación son 20.7%, 18,647 cp, y 0.9, respectivamente. Aun cuando aparentemente estos resultados estadísticos no son del todo favorables, en la Figura 5.5 puede observarse que la correlación permite obtener buenas estimaciones de la viscosidad de las emulsiones. Es importante notar que la viscosidad varía en un rango de 10^4 a más de 10^5 cp. En la Figura 5.5 se ve que los valores calculados de viscosidad aparente se encuentran en una banda de $\pm 30\%$

Tabla 5.5 Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite pesado "T"

| Error Relativo Porcentual Promedio | Error Relativo Porcentual Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coficiente de correlación |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------------|---------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -1.316 | 20.769 | 18,647 | 4876 | 0.90 |

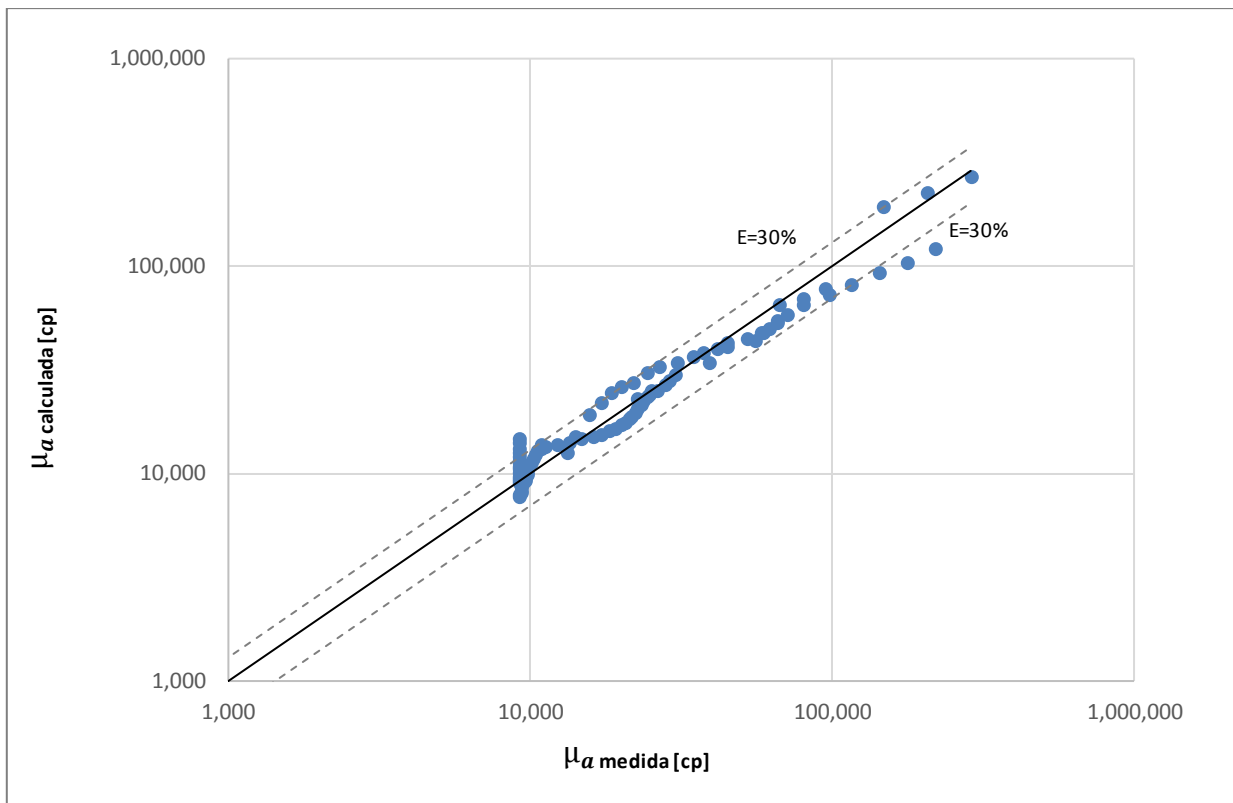


Figura 5.5 Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “T”, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite

b) Evaluación considerando valores calculados de la viscosidad del aceite “T”

En esta evaluación, la viscosidad del aceite fue calculada con la correlación presentada en la sección 5.2.1. Los parámetros estadísticos que fueron determinados se presentan en la **Tabla 5.6**. En la **Figura 5.6** se muestran los valores calculados de viscosidad aparente contra los valores medidos.

De acuerdo a los datos en las Tablas 5.5 y 5.6, y las Figuras 5.5 y 5.6, el error relativo absoluto en la estimación de la viscosidad de las emulsiones disminuye (aunque no de manera significativa) cuando se utilizan valores calculados de viscosidad del aceite. Los resultados obtenidos con las correlaciones propuestas son aceptables para cálculos de ingeniería.

Tabla 5.6 Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando valores calculados de viscosidad del aceite pesado “T”

| Error Relativo Porcentual Promedio | Error Relativo Porcentual Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coficiente de correlación |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------------|---------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -0.768 | 18.398 | 18,778 | 4,896 | 0.90 |

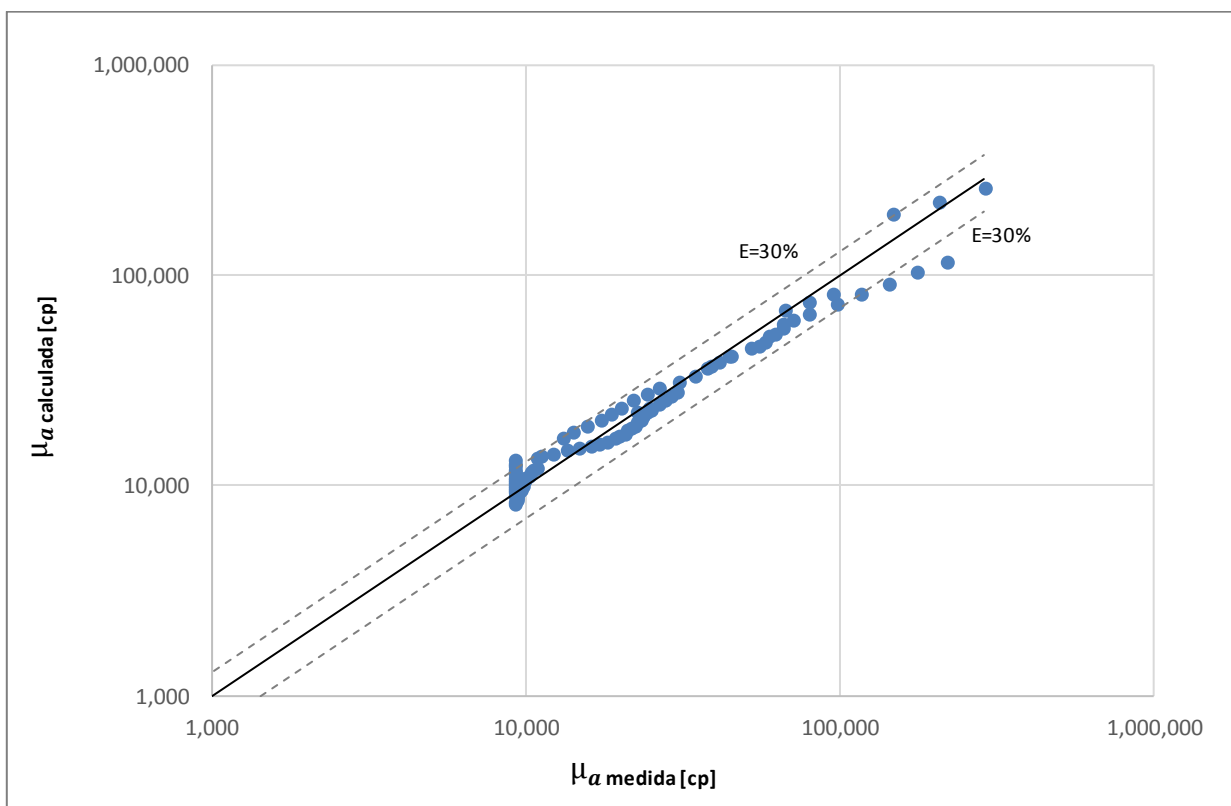


Figura 5.6 Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “T”, considerando valores calculados de la viscosidad del aceite

5.3 RESULTADOS PARA EL ACEITE PESADO “U”

A continuación se presentan los resultados de la evaluación estadística de las correlaciones propuestas para calcular la viscosidad del aceite pesado “U”, y de sus emulsiones.

5.3.1 Correlación para la viscosidad del aceite pesado “U”

La correlación propuesta para calcular la viscosidad del aceite pesado “U” es:

$$\mu_o = (K_1 T^3 + K_2 T^2 K_3 T + K_4) * \gamma + K_5 e^{(-K_6 T)}$$

donde:

$$K_1 = 0.0568$$

$$K_2 = 8.728$$

$$K_3 = 445.4$$

$$K_4 = 7.567 \text{ E}3$$

$$K_5 = 1.357 \text{ E}6$$

$$K_6 = 0.1015$$

μ_o es la viscosidad del aceite en cp

T es la temperatura en °C, y

γ es la velocidad de corte en s^{-1} .

En la **Tabla 5.7** se indican los principales parámetros estadísticos que fueron calculados. La comparación de los valores de viscosidad calculados contra los medidos se muestra en la **Figura 5.7**. Con base en la **Tabla 5.7**, el error relativo absoluto promedio es de 3%, la desviación estándar es 888 cp, y el coeficiente de correlación es 0.99. Como se muestra en la **Figura 5.7**, los datos calculados se encuentran dentro de una banda de $\pm 10\%$. Los datos estadísticos obtenidos indican que existe buen acuerdo entre los resultados de la correlación con los datos experimentales.

Tabla 5.7 Evaluación de la correlación para la viscosidad del aceite pesado “U”

| Error Relativo Porcentual Promedio | Error Relativo Porcentual Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coefficiente de correlación |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -0.17 | 2.89 | 889 | 15 | 0.997 |

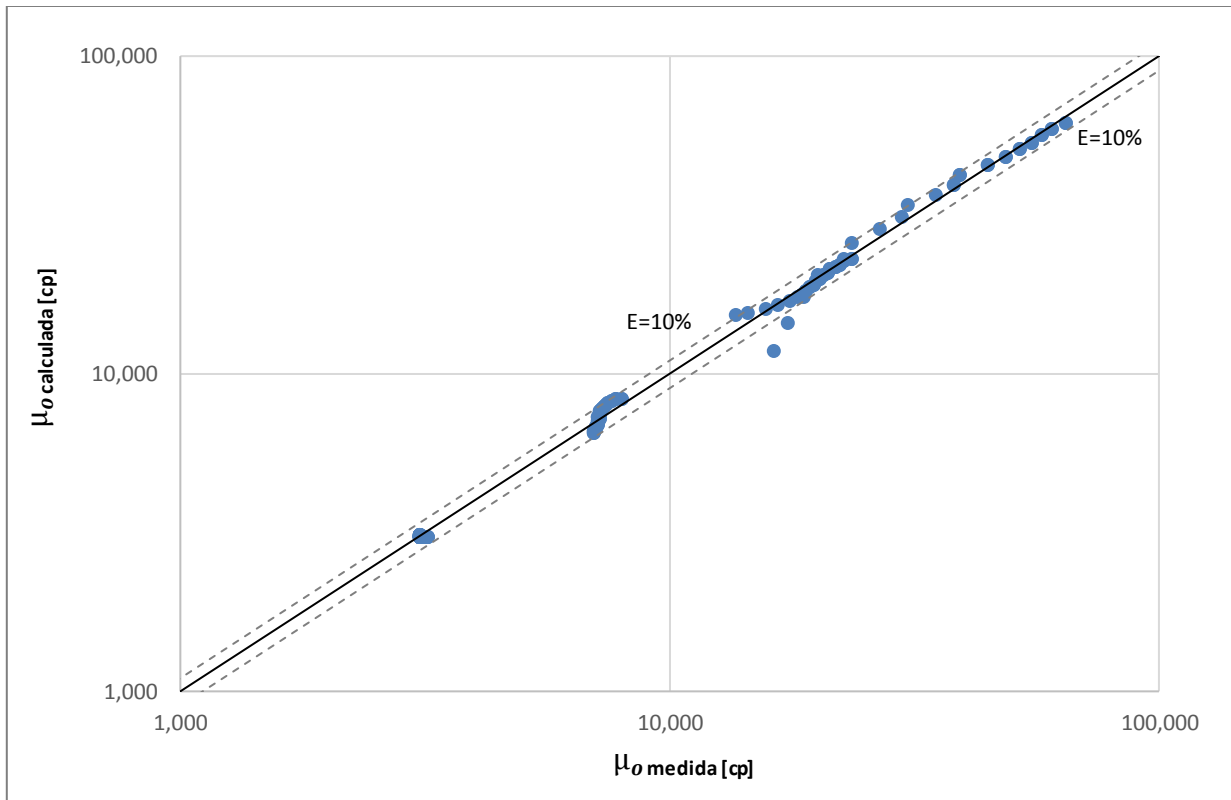


Figura 5.7 Viscosidad calculada vs viscosidad medida para el aceite pesado “U”

5.3.2 Correlación para la viscosidad de las emulsiones

La correlación propuesta para calcular la viscosidad de las emulsiones de agua en aceite pesado “T” es:

$$\ln \mu_r = (K_1 + K_2 T + K_3 \Phi + K_4 T \Phi) * e^{K_5 \gamma}$$

donde:

$$\begin{aligned}K1 &= -0.0812 \\K2 &= 0.0038 \\K3 &= 2.5499 \\K4 &= 0.0075 \\K5 &= -0.0013\end{aligned}$$

μ_r es la viscosidad relativa,

T es la temperatura en °C,

Φ es la fracción volumétrica de agua en fracción, y

γ es la velocidad de corte en s^{-1} .

a) Evaluación considerando únicamente datos experimentales

Los principales parámetros estadísticos de la evaluación se indican en la **Tabla 5.8**. En la **Figura 5.8** se comparan los valores calculados y medidos de viscosidad aparente de las emulsiones.

Como puede observarse en la Tabla 5.8, el error relativo absoluto promedio y la desviación estándar de la correlación son 3.7% y 1,968 cp. El coeficiente de correlación es de 0.99, lo cual indica que la correlación reproduce bien los datos medidos. En la Figura 5.8 se observa que los valores calculados de viscosidad aparente se encuentran en una banda de $\pm 10\%$. Por lo tanto, puede concluirse que existe un buen acuerdo de los valores calculados contra los datos experimentales

Tabla 5.8 Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite pesado "U"

| Error Relativo Porcentual Promedio | Error Relativo Porcentual Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coficiente de correlación |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------------|---------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -0.12 | 3.75 | 1,968 | 71 | 0.99 |

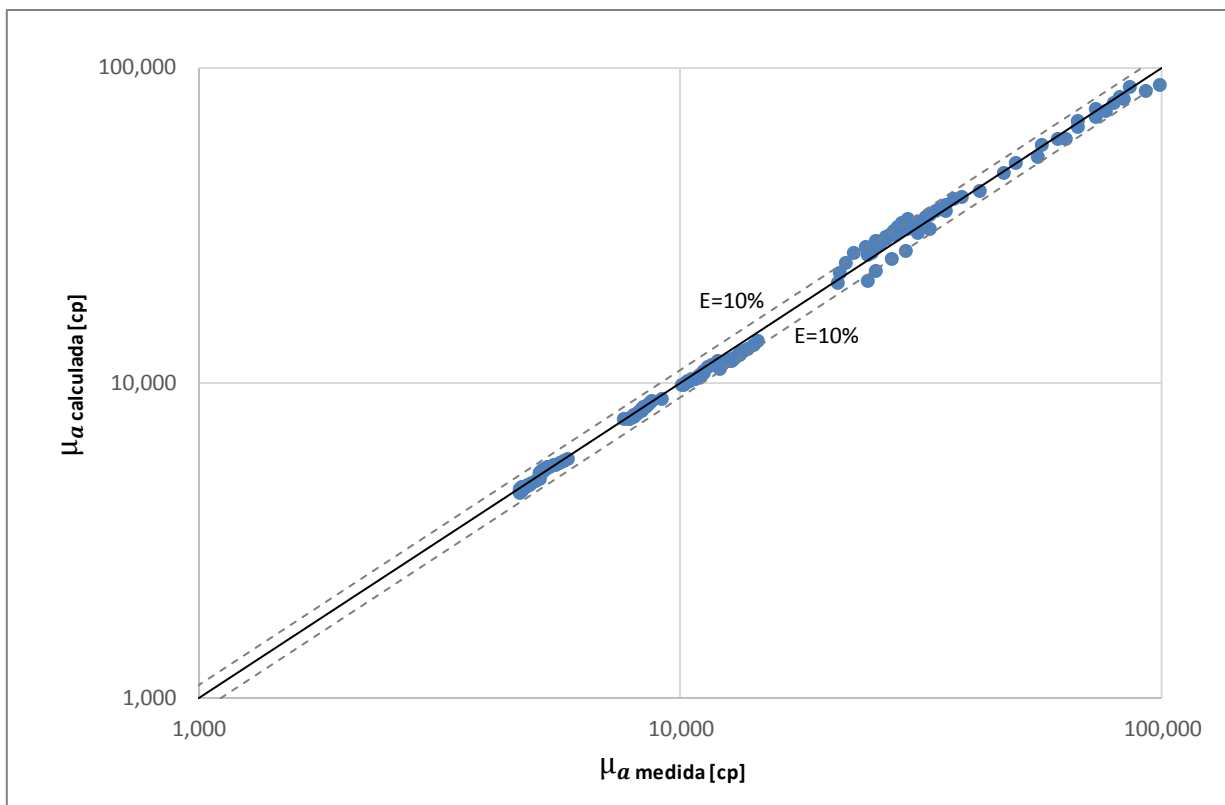


Figura 5.8 Viscosidad relativa calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “U”, considerando datos experimentales de viscosidad del aceite

b) Evaluación considerando valores calculados de la viscosidad del aceite “U”

Se evaluó el efecto de la viscosidad calculada del aceite sobre los resultados de la correlación para la viscosidad de las emulsiones. Para calcular la viscosidad del aceite en función de la velocidad de corte y la temperatura se utilizó la correlación presentada en la sección 5.3.1. Los principales parámetros estadísticos obtenidos se presentan en la **Tabla 5.9**. En la **Figura 5.9** se comparan los valores calculados de viscosidad de las emulsiones contra los valores medidos.

Al comparar la información de las Tablas 5.8 y 5.9, y las Figuras 5.8 y 5.9, se observa que el error en la estimación de la viscosidad de las emulsiones se incrementa en menos de 1% cuando se utilizan valores calculados de viscosidad de la aceite. En ambos casos, el error relativo porcentual absoluto promedio es menor al 5%. Por lo

tanto, los resultados obtenidos con la correlación para la viscosidad relativa de las emulsiones en conjunto con la correlación para la viscosidad del aceite, son aceptables.

Tabla 5.9 Evaluación de la correlación para la viscosidad de emulsiones, considerando valores calculados de viscosidad del aceite pesado “U”

| Error Relativo Porcentual Promedio | Error Relativo Porcentual Absoluto Promedio | Desviación Estándar | Media del Error | Coefficiente de correlación |
|------------------------------------|---|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| APE [%] | AAPE [%] | σ [cp] | μ [cp] | R^2 |
| -0.28 | 4.34 | 2,509 | 93 | 0.99 |

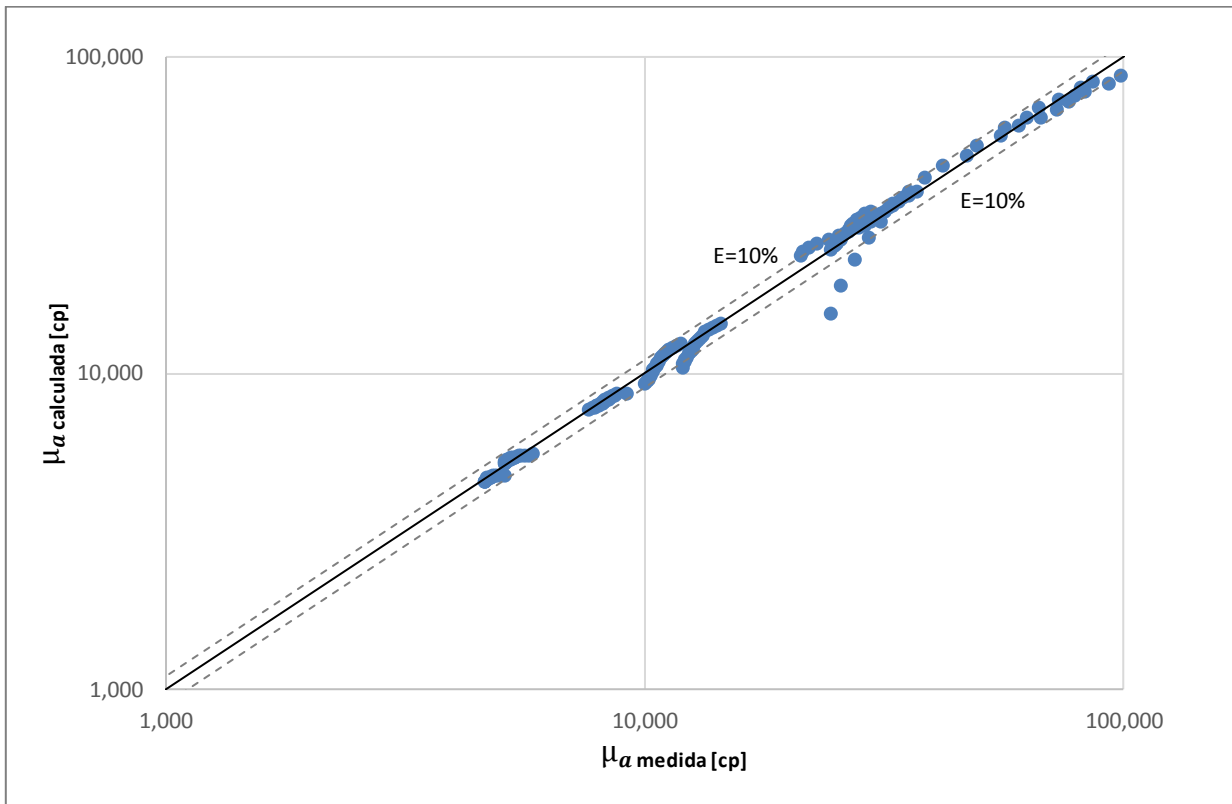


Figura 5.9 Viscosidad aparente calculada vs medida para las emulsiones de agua en aceite pesado “U”, considerando valores calculados de la viscosidad del aceite

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se realizó una revisión de la literatura acerca de estudios experimentales sobre la formación, estabilidad, inversión de fases, y reología de emulsiones de agua y aceite. Asimismo, se presentó un resumen de diversas correlaciones para predecir la viscosidad de éstas.
2. Se recopilaron tres muestras de aceite crudo pesado de campos marinos en México, para estudiar su comportamiento reológico al formar emulsiones. La densidad de los aceites, referidos como “A”, “T” y “U”, fueron 10.5, 13.6 y 9.5 °API, respectivamente.
3. Se desarrolló una metodología experimental para formar emulsiones estables con agua y crudo pesados, y estudiar su comportamiento reológico, con y sin el uso de agentes tensoactivos.
4. Se realizaron pruebas experimentales para determinar el comportamiento reológico de las muestras de aceite pesado “A”, “T” y “U”, a temperaturas de 30, 40, 50 y 60°C. En general, los aceites presentaron un comportamiento no newtoniano a 30°C del tipo pseudo-plástico, alcanzando valores de viscosidad del orden de 10^5 cp a bajas velocidades de corte. A 60 °C su comportamiento fue prácticamente newtoniano.
5. Se prepararon emulsiones con agua y los aceites pesados, a distintos porcentajes de agua y temperaturas. Las emulsiones generadas que resultaron

estables fueron caracterizadas reológicamente. En el caso de las emulsiones inestables, se dejaron en reposo y se cuantificaron las fracciones volumétricas de agua libre y de agua emulsionada.

6. A partir del comportamiento reológico de las emulsiones estables se identificó su punto de inversión a una velocidad de corte de 0.01 s^{-1} . Para el sistema "A", éste se encontró a 47% de agua en volumen; para el sistema "T", fue de 30%; y para el sistema "U", de 50%.
7. Se estudió experimentalmente el efecto de un agente tensoactivo (Q-233) sobre la formación, estabilidad y comportamiento reológico de emulsiones de agua y aceites pesados, a diferentes fracciones volumétricas de agua, 0.01 s^{-1} de velocidad de corte, y $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - a. Para el sistema "A", se generaron emulsiones estables con porcentajes de agua de hasta 50%. En todos los casos, el tensoactivo redujo la viscosidad de las emulsiones a valores menores que la del aceite puro; este efecto aumentó con el incremento de la fracción volumétrica de agua.
 - b. Para el sistema "T", las emulsiones generadas con el agente tensoactivo requirieron menos tiempo de mezclado y resultaron más estables, en comparación a cuando no se utilizó éste. Se formaron emulsiones estables con hasta 30% en volumen de agua. La viscosidad de las mismas fue menor en aproximadamente un 50%.
 - c. Para el sistema U, las emulsiones generadas con tensoactivo fueron inestables a valores mayores de 40% en volumen de agua. Aun cuando la viscosidad de las emulsiones se redujo con el uso de tensoactivo, su efecto no fue significativo.
8. Se generó una base de datos experimentales de viscosidad para los aceites pesados y emulsiones analizadas. A partir de esta información, se llevó a cabo el ajuste de datos para predecir la viscosidad de los aceites "A", "T" y "U", en

función de la velocidad de corte y la temperatura; asimismo para calcular la viscosidad relativa de las emulsiones formadas con cada uno de ellos, que dependen de la temperatura, el porcentaje volumétrico de agua, y la velocidad de corte.

Recomendaciones

1. Investigar experimentalmente el comportamiento reológico de emulsiones a condiciones de alta presión y temperatura.
2. Extender el estudio de los efectos de otros agentes tensoactivos sobre la estabilidad y reología de las emulsiones generadas con los aceites crudos analizados, a efecto de identificar el producto químico que represente mayores beneficios en cuanto a la reducción de la viscosidad.
3. Investigar los efectos que tienen: la salinidad del agua, el número ácido del aceite crudo, y la tensión superficial, sobre la estabilidad y la reología de las emulsiones con los aceites pesados analizados.
4. Desarrollar correlaciones para predecir la viscosidad de las emulsiones de agua en aceite pesado a porcentajes de agua mayores de 20%.

NOMENCLATURA

| | |
|----------|--|
| μ_a | viscosidad aparente de la emulsión |
| μ_c | viscosidad de la fase continua |
| μ_d | viscosidad de la fase dispersa |
| μ_o | viscosidad del aceite |
| μ_r | viscosidad relativa de la emulsión |
| $[\mu]$ | es igual a $(\mu_d/\mu_c) - 1$ |
| Φ | fracción volumétrica de agua |
| Φ_m | concentración máxima de la fase dispersa |
| W/O | emulsión agua en aceite |
| O/W | emulsión aceite en agua |
| k | constante |
| A | factor de corrección |
| h | factor de hidratación |
| c | factor de acumulación |
| C | constante |
| m | pendiente de una gráfica |
| Φ_c | fracción volumétrica de la fase continua |
| Φ_d | fracción volumétrica de la fase dispersa |
| γ | velocidad de corte |
| T | temperatura |
| ρ | densidad |

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| k_0 | factor de hidratación |
| k_f | factor de floculación |
| F_{rp} | índice de comportamiento relativo |
| $K1, K2, K3, K4,$ $K5, K6, K7, K8$ | constantes |

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdurahman, H., Rosli, Y., Azhari, N. et al. 2012. Pipeline transportation of viscous crudes as concentrated oil-in-water emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **90-91**: 139-144.
- Alboudwarej, H., Muhammad, M., Shahraki, A. et al. 2007. Rheology of Heavy-Oil Emulsions. *SPE Production & Operations* **22** (3). SPE-97886-PA.
- Al-Yaari, M., Hussein, I., Al-Saekhi, A. et al. 2015. Effect of water salinity on surfactant-stabilized water-oil emulsions flow characteristics. *Experimental Thermal and Fluid Science* **64**: 54-61.
- Ashrafizadeh, S. y Kamran, M. 2010. Emulsification of Heavy Crude Oil in Water for Pipeline Transportation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **71** (3-4): 205-211.
- Azodi, M., Solaimany, A. 2013. An experimental study on factors affecting the heavy crude oil in water emulsions viscosity. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **106**: 1-8.
- Becher, P. 1965. Physical Properties of Emulsions. In *Emulsions: Theory and Practice*, segunda edición, Reinhold Publishing Corporation, capítulo 3, 49-91, New York: Monograph series / American Chemical Society.
- Becker, J. 1997. *Crude oil waxes, emulsions, and asphaltenes*, primer edición. Tulsa, Oklahoma: Pennwell Books.
- Berkman, S. y Egloff, G. 1941. *Emulsions and foams*, primer edición. New York: Reinhold.
- Bouchama, F., van Aken, G., Autin, A. et al. 2003. On the mechanism of catastrophic phase inversion in emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **231** (1-3): 11-17
- Carneiro, G., Silva, R., Barbosa, L. et al. 2015. Characterisation and selection of demulsifiers for water-in-crude oil emulsions using low-field H NMR and ESI-FT-ICR MS. *Fuel* **140**: 762-769.
- Charin, R., Araújo, B., Farias, A. et al. 2015. Studies on transitional emulsion phase inversion using the steady state protocol. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **484**: 424-433.
- Chhabra, R. y Richardson, J. 2008. *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*, segunda edición, Amsterdam: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- Daaou, M. y Bendedouch, D. 2012. Water pH and surfactant addition effects on the stability of Algerian crude oil emulsion. *Journal of Saudi Chemical Society* **16** (3): 333-337.
- Dan, D. y Jing, G. 2006. Apparent viscosity prediction of non Newtonian water in crude oil emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **53** (1-2): 113-122.

- De Souza, T., Scheer, A., Khalil, M. et al. 2012. Emulsion inversion using solid particles. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **96-97**: 49-57.
- El-Sayed, M. 2012. Factors Affecting the Stability of Crude Oil Emulsions. In *Crude Oil Emulsions/Composition Stability and Characterization*, Chap 10. In Tech.
- Elgibaly, A., Nashawi, I. y Tantawy, M. 1997. Rheological Characterization of Kuwaiti Oil-Lakes Oils and their emulsions. SPE-37259-MS.
- Ersoy, G., Yu, M. 2008. Modeling of inversion point for heavy oil-water emulsion systems. SPE-115610-MS.
- Farah, M., Olivera, R., Navaes, J. y Rajagopal, K. 2005. Viscosity of water-in-oil emulsions: Variation with temperature and water volume fraction. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **14** (3-4):169-184.
- Fingas, M. 2011. Models for water-in-oil Emulsion Formation. Behaviour of Oil in the Environment and spill Modeling. In *Oil Spill Science and Technology*, edición electrónica, Elsevier inc., capítulo 10, 243–273.
- Fortuny, M., Oliveira, C., Melo, R. et al. 2007. Effect of salinity, temperature, water content, and pH on the microwave demulsification of crude oil emulsions. *Energy Fuels* **21** (3): 1358-1364.
- Friberg, S. 2014. Selective emulsion in an equilibrium Janus drop. 1. Unlimited space. *Journal of Colloid and Interface Science* **416**: 167-171
- Ghloum, E., Rashed, A., Al-Attar, M. 2015. Characteristics and Inversion Point of Heavy Crude Oil Emulsions in Kuwait. SPE-172732-MS.
- Groeneweg, F., Agterof, W., Jaeger, P. et al. 1998. On the mechanism of the inversion of emulsions. *Institution of Chemical Engineers* **76** (1): 55-63.
- Hasan, S., Ghannam, M. y Esmail, N. 2010. Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation. *Fuel* **89** (5): 1095-1100.
- Jiang, J., Mei, Zhen., Xu, J. et al. 2013. Effect of inorganic electrolytes on the formation and the stability of water-in-oil (W/O) emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **429**: 82-90.
- Kumar, T. y Srini-Vasan, S. 1985. A new model for analysis of rheological properties of crude oil-water emulsion system. SPE-15201-MS.
- Kumar, A., Li, S., Cheng, C. et al. 2015. Recent Developments in Phase Inversion Emulsification. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **54** (34): 8375-8396.
- Kundu, P., Agrawal, A., Mateen, H. et al. 2013. Stability of oil-in-water macro-emulsion with anionic surfactant: Effect of electrolytes and temperature. *Chemical Engineering Science* **102**: 176-185.
- Kundu, P., Kumar, V. y Mishra, I. 2015. Modeling the steady-shear rheological behavior of dilute to highly concentrated oil-in-water (o/w) emulsions: Effect of temperature, oil volume fraction and anionic surfactant concentration. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **129**: 189-204.
- Li, C., Mei, Z., Liu, Q. et al. 2010. Formation and properties of paraffin wax submicron emulsions prepared by the emulsion inversion point method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **356** (1-3): 71-77.
- Ling, N., Haber, A., May, E. et al. 2014. NMR studies of emulsion microstructure approaching the phase inversion point. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **462**: 244-251.
- Liu, W., Sun, D., Li, C. et al. 2006. Formation and stability of paraffin oil-in-water nano-emulsions prepared by the emulsion inversion point method. *Journal of Colloid and Interface Science* **303** (2): 557-563.
- Macosko, C. 1994. *Rheology : principles, measurements, and applications*, primer edición. New York: VCH.

- Maia, D., Ramalhob, J., Lucas, G. y Lucas, E. 2012. Aging of water-in-crude oil emulsions: Effect on rheological parameters. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects* **405**: 73-78.
- Malkin, A., Zadymova, N., Skvortsova, Z. et al. 2016. Formation of concentrated emulsions in heavy oil. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **504**: 343-349.
- Martínez, R., Mosqueira, M., Zapata, B. et al. 2010. Transportation of heavy and extra heavy crude oil by pipeline: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **75** (3-4): 274-282.
- Mira, I., Zambrano, N., Tyrode, E. et al. 2003. Emulsion Catastrophic Inversion from Abnormal to Normal Morphology. 2. Effect of the Stirring Intensity on the Dynamic Inversion Frontier. *Ind. Eng. Chem. Res* **42** (1): 57-61.
- Moradi, M., Alvarado, V. y Huzurbazar, S. 2011. Effect of salinity on Water-in-Crude Oil Emulsion: Evaluation through Drop-Size Distribution Proxy. *Energy Fuels* **25** (1): 260-268.
- Muguet, V., Seiller, M., Barratt, G. et al. 2001. Formulation of shear rate sensitive multiple emulsions. *Journal of Controlled Release* **70** (1-2): 37-49
- Opawale, A. 2009. Oilfield Emulsion Control: A Major Issue During Heavy Crude Oil Production. SPE-128352-MS.
- Orr, R. Phase inversion In heavy crude oil production. Presentación de StatoilHydro.
- Pierre, C., Barré, L., Pina, A. et al. 2004. Composition and Heavy Oil Rheology. *Oil & Gas Science and Technology* **59** (5): 489-501.
- Pilehvari, A., Saadevandi, B., Halvaci, M. et al. 1988. Oil/Water Emulsions for Pipeline Transport of Viscous Crude Oils. SPE-18218-MS.
- Plasencia, J., Pettersen, B. y Nydal, O. 2013. Pipe flow of water-in-crude oil emulsions: Effective viscosity, inversion point and droplet size distribution. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **101**: 35-43.
- Rondon, M., Madariaga, L., Sadtler, V. et al. 2007. Emulsion Catastrophic Inversion from Abnormal to Normal Morphology. 6. Effect of the Phase Viscosity on the Inversion Produced by Continuous Stirring. *Industrial and Engineering Chemistry Research* **46** (11): 3595-3601.
- Ronningsen, H.P. 1995. Correlation for predicting Viscosity of W/O emulsions based on North Sea Crude Oils. SPE-28968-MS.7
- Ronningsen, H.P. 2012. Rheology of Petroleum fluids. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society* **20**.
- Sandoval, L., Cañas, W. y Martínez, R. 2014. Rheological Behavior of Water-In-Oil Emulsions of Heavy and Extra Heavy Live Oils: Experimental Evaluation. *Ciencia Tecnología y Futuro* **5** (4): 5-24.
- Sarbar, M., Wingrove, M. 1997. Physical and chemical characterization of Saudi Arabian crude oil emulsions. SPE-38817-MS.
- Schramm, L. 1992. *Emulsions: fundamentals and applications in the petroleum industry*, primer edición. Washington, DC: American Chemical Society.
- Sefton, E. y Sinton, D. 2010. Evaluation of selected viscosity prediction models for water in bitumen emulsions. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **72** (1-2): 128-133.
- Torrey, S. 1984. *Emulsions and emulsifier applications: Recent developments*, primer edición. New Jersey: Noyes Data Corporation.
- Vermeir, L., Sabatino, P., Balcaen, M. et al. 2016. Effect of molecular exchange on water droplet size analysis as determined by diffusion NMR: The W/O/W double emulsion case. *Journal of Colloid and Interface Science* **475**: 57-65.
- Yang, F., Li, C., Xu, C. et al. 2012. Studies on the normal-to-abnormal emulsion inversion of waxy crude oil-in-water emulsion induced by continuous stirring. *Journal of Petroleum Science and Engineering* **81**: 64-69.

Zhang, J., Xu, J., Gao, M. et al. 2013. Apparent Viscosity of Oil Water Coarse Emulsion and Its Rheological Characterization During the Phase Inversion Region. *Journal of Dispersion Science and Technology* **34** (8): 1148-1160.

Zhang, R., Yang, L., Tu, R. et al. 2015. Emulsion phase inversion from oil-in-water (1) to water-in-oil to oil-in-water (2) induced by in situ surface activation of CaCo₃ nanoparticles via adsorption of sodium stearate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **477**: 55-62.

ANEXO A

DATOS TÉCNICOS

A.1 Reómetro Anton Paar MCR-301

Tabla A.1 Ficha técnica del reómetro Anton Para MCR-301.

| Datos técnicos | Valor | Unidad |
|--|-----------------|-----------|
| Rodamiento | Aire | - |
| Motor EC | Sí | - |
| Torque máximo | 200 | mNm |
| Torque mínimo, rotación | 1 | nNm |
| Torque mínimo, oscilación | 0.5 | nNm |
| Deflexión angular (valor establecido) | 0.05 a ∞ | μ rad |
| Velocidad angular mínima | 10^{-9} | rad/s |
| Velocidad angular máxima | 314 | rad/s |
| Velocidad máxima | 3000 | 1/min |
| Frecuencia angular mínima | 10^{-7} | rad/s |
| Frecuencia angular máxima | 628 | rad/s |
| Rango de fuerza normal | 0,005-50 | N |
| Resolución de fuerza normal | 0.5 | mN |
| Gama de temperatura máxima | -150 a 1000 | °C |
| QuickConnect | Sí | - |
| Control/configuración automática del hueco (AGC/AGS) | Sí | - |
| Control de la deformación directo | Sí | - |
| Controlador del esfuerzo directo | Sí | - |
| Perfiles de velocidad y fuerza normal, pegajosidad, compresión | Sí | - |
| Datos en bruto (LAOS, forma de onda) | Opcional | - |

A.2 Mezclador IKA T25 digital ULTRA TURRAX

Tabla A.2 Características del mezclador IKA T25

| Datos técnicos | Valor | Unidad |
|---|--------------|--------|
| Control de velocidad electrónico | Sí | - |
| Indicador digital de velocidad | Sí | - |
| Elementos de dispersión de acero inoxidable | Sí | - |
| Funcionamiento silencioso | Sí | - |
| Volumen | 1 a 2000 | ml |
| Velocidad | 3000 a 25000 | rpm |
| Torque máximo | 200 | mNm |
| Torque mínimo, rotación | 1 | nNm |

A.3 Agua des-ionizada

Como fase acuosa se emplea agua desionizada (tipo I), filtrada mediante sistema de purificación de agua Milli-Q® Advantage A10, marca Merck Millipore®, mostrado en la figura 3.6.

Tabla A.3 Características del agua des-ionizada ultrapura (tipo I) Milli-Q® Advantage A10.

| Propiedad | Valor |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Resistividad a 25 °C* | 18,2 MΩ•cm |
| TOC** | ≤ 5 ppb |
| Partículas (tamaño > 0,22 µm)*** | < 1 partícula/ml |
| Bacterias ** | < 10 UFC/100 ml |
| Lipopolisacáridos (endotoxinas)**** | < 0,001 UE/ml |
| RNAsas**** | < 1 pg/ml |
| DNAsas**** | < 5 pg/ml |
| Caudal | Hasta 2 litros/minuto |

* La resistividad puede mostrarse sin compensación de temperatura como exige la USP

** En las condiciones analíticas apropiadas

*** Con los filtros finales Millipak® o Biopak®

**** Con el filtro BioPak®

Estos valores son típicos y pueden variar dependiendo de la naturaleza y la concentración de los contaminantes del agua de alimentación.

A.4 Aceite de referencia

Tabla A.4 Características del aceite crudo de referencia

| Propiedades físicas | | | |
|-----------------------------------|-------------|--------------|---------------------|
| Propiedad | ASTM | Valor | Unidad |
| Gravedad API | D7042 | 13.5 | |
| Densidad @ 100°F | D7043 | 0.9602 | g cm-3 |
| Viscosidad cinemática @ 100°F | D7044 | 1891.30 | mm ² s-1 |
| Masa molecular | D2224 | 432.9 | u.m.a. |
| Propiedades químicas | | | |
| Propiedad | ASTM | Valor | Unidad |
| Concentración de agua y sedimento | D4007 | 10.0 | % vol |
| Concentración de sal | D3230 | 1287.0 | lb de NaCl/1000 bbl |
| | | 3673.0 | g cm-3 |
| Análisis elemental | | | |
| Carbón | D5291 | 83.9550 | % peso |
| Hidrógeno | D5291 | 11.8088 | % peso |
| Nitrógeno | D5291 | 0.3387 | % peso |
| Azufre | D7039 | 5.0629 | % peso |
| Análisis SARA | | | |
| Saturados | D2007 | | % peso |
| Aromáticos | D2007 | | % peso |
| Resinas | D2007 | | % peso |
| Asfaltenos | D3279 | 10.2531 | % peso |

A5. Tensoactivos

Tabla A.5 Agentes tensoactivos

| Id. | PRODUCTO QUÍMICO | PUREZA | MARCA | TIPO DE SURFACTANTE |
|------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|----------------------------|
| Q232-I | No autorizado para su difusión | 99% | No autorizado para su difusión | No lónico |
| Q233-I | No autorizado para su difusión | 99% | No autorizado para su difusión | No lónico |
| Q234-I | No autorizado para su difusión | 70% | No autorizado para su difusión | No lónico |

ANEXO B

DATOS REOLÓGICOS EXPERIMENTALES

En este anexo se presentan los datos reológicos obtenidos experimentalmente para las emulsiones formadas con los aceites pesados “A”, “T”, y “U”.

B.1 Reogramas de emulsiones del aceite A

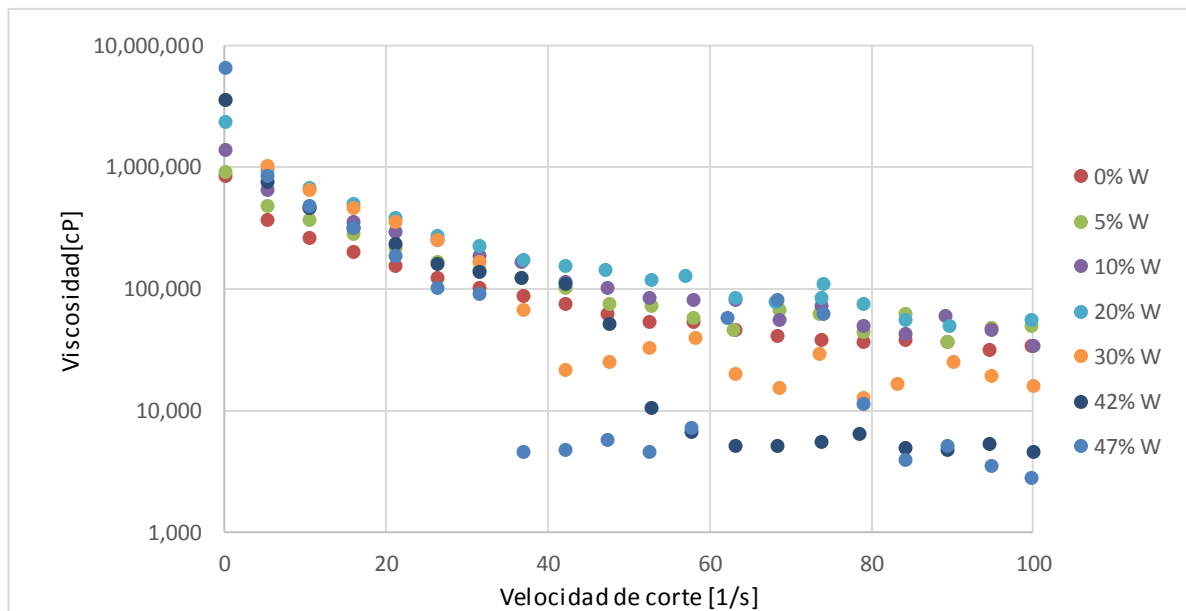


Figura B.1 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 30 °C.

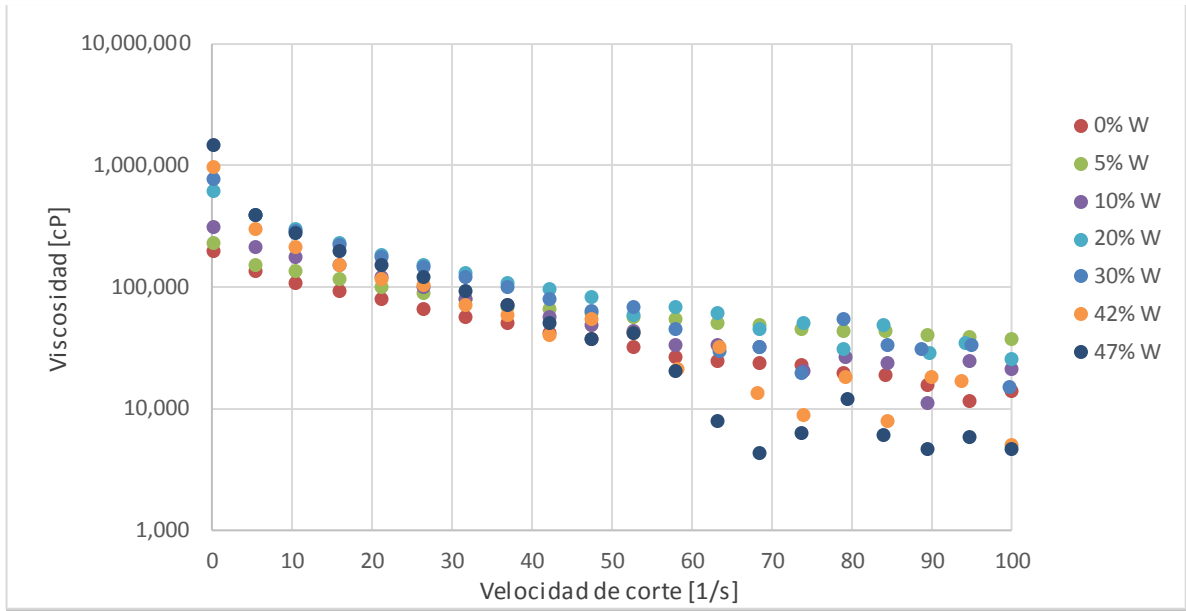


Figura B.2 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado "A", a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 40 °C.

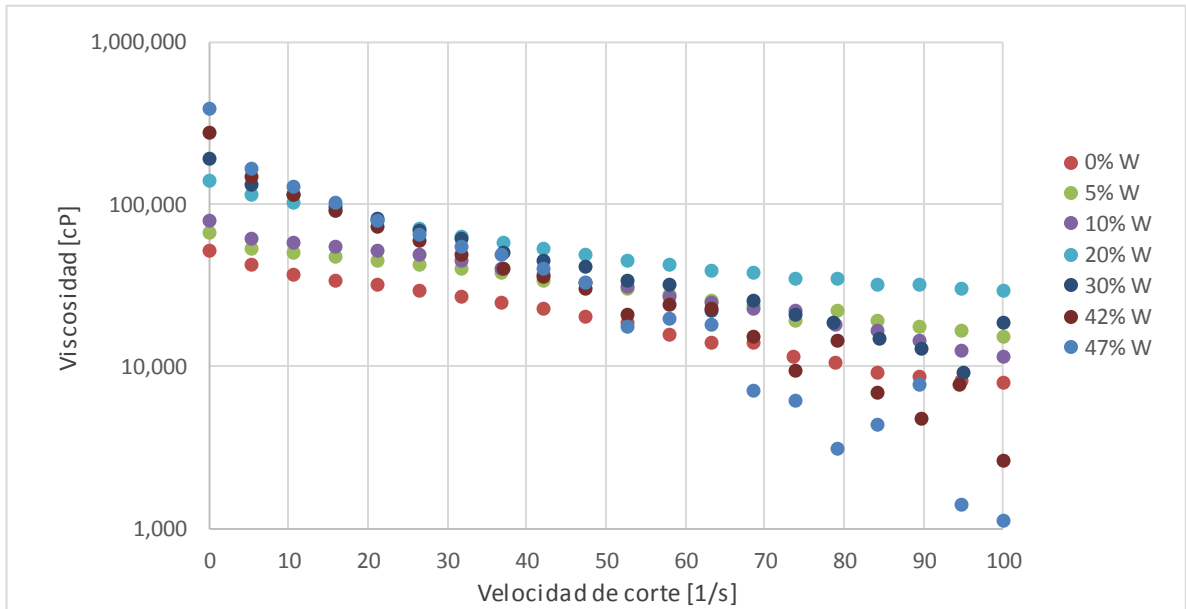


Figura B.3 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado "A", a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 50 °C.

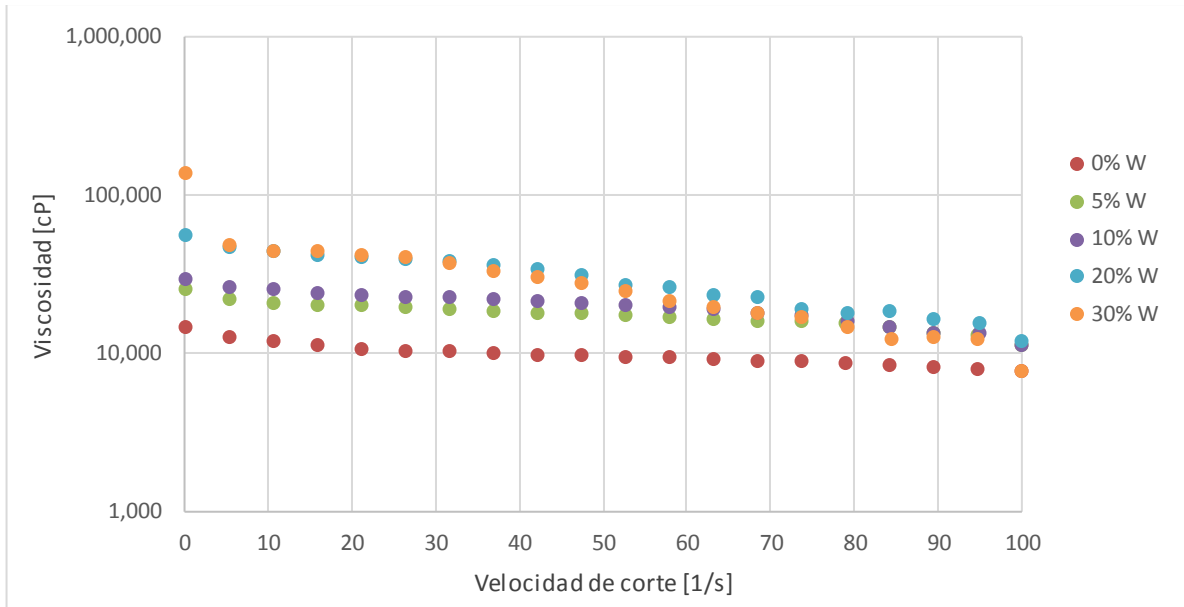


Figura B.4 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “A”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C.

B.2 Reogramas de emulsiones del aceite T

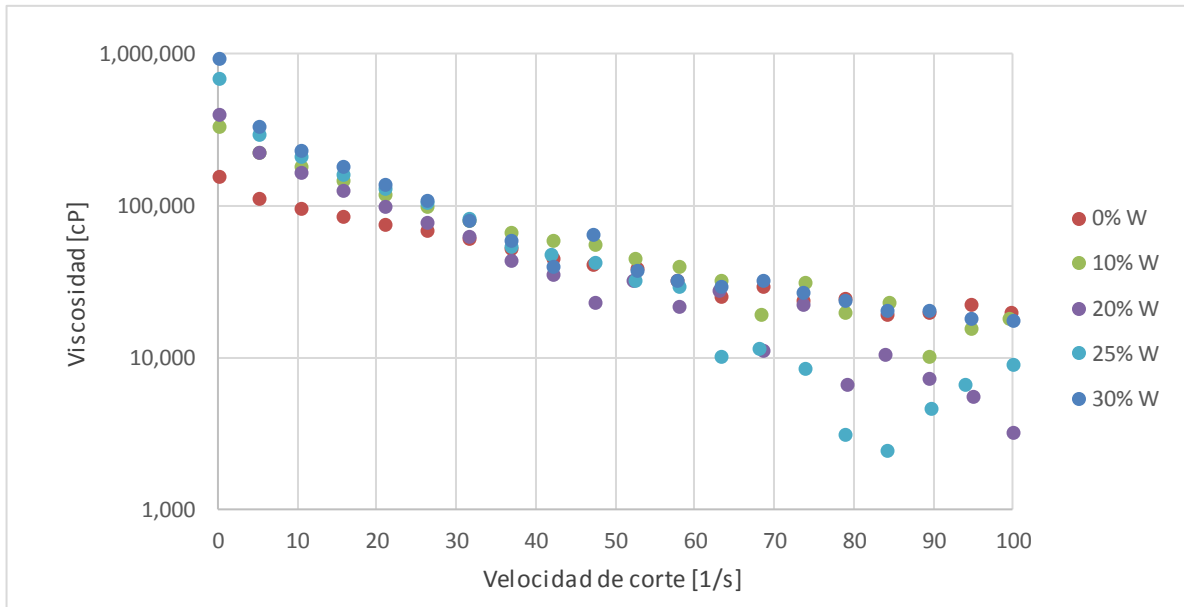


Figura B.5 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 30 °C.

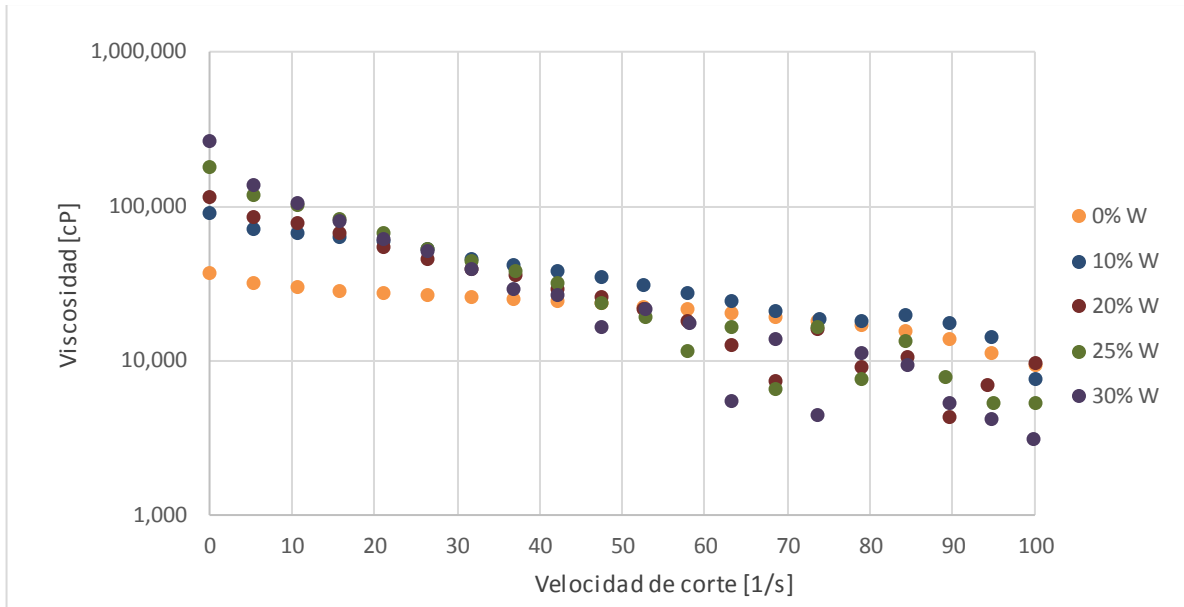


Figura B.6 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 40 °C.

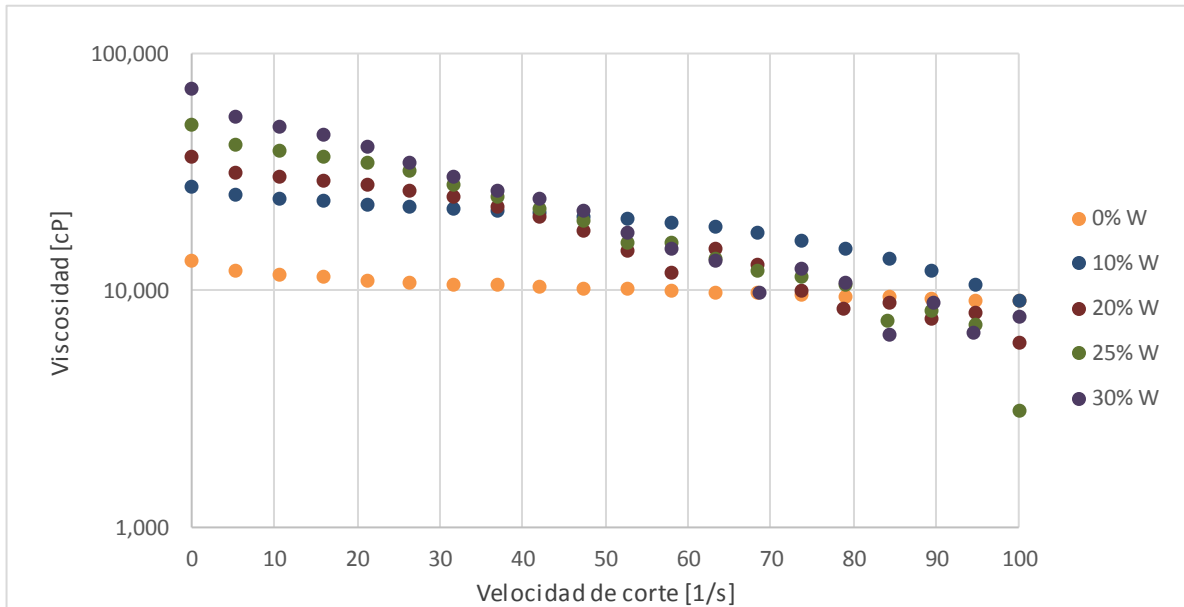


Figura B.7 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 50 °C.

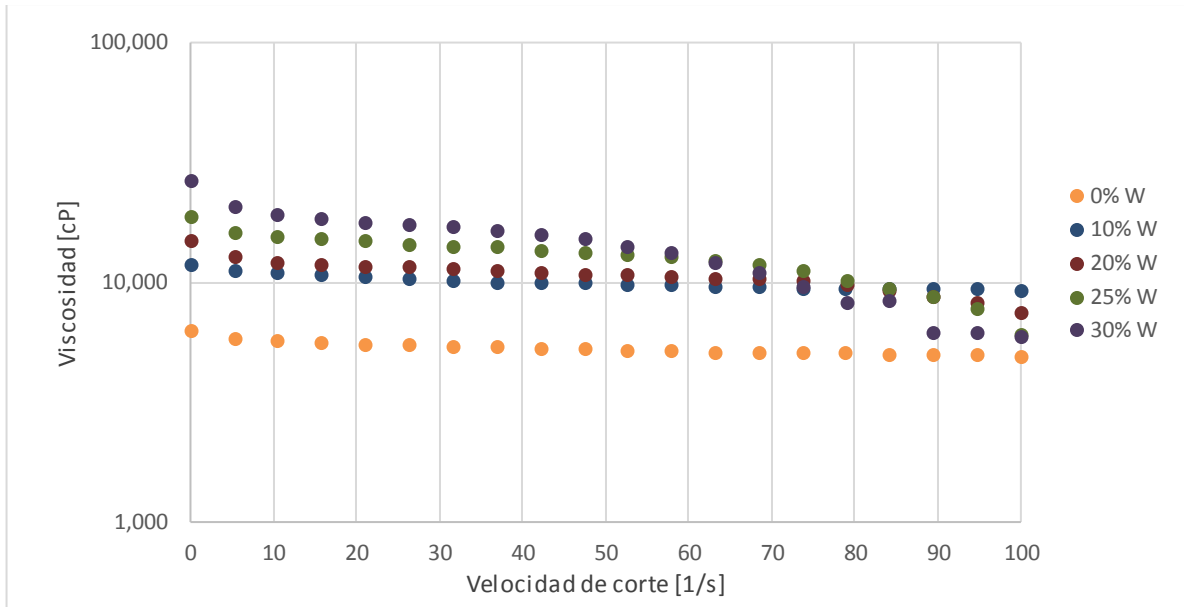


Figura B.8 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “T”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C.

B.3 Reogramas de emulsiones del aceite U

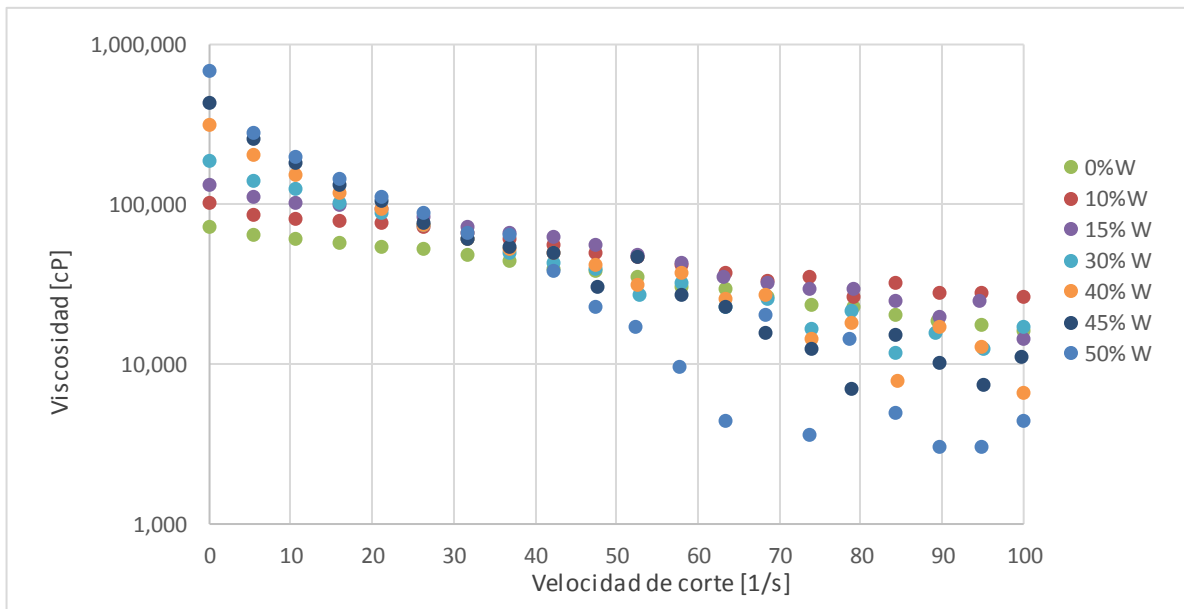


Figura B.9 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 30 °C.

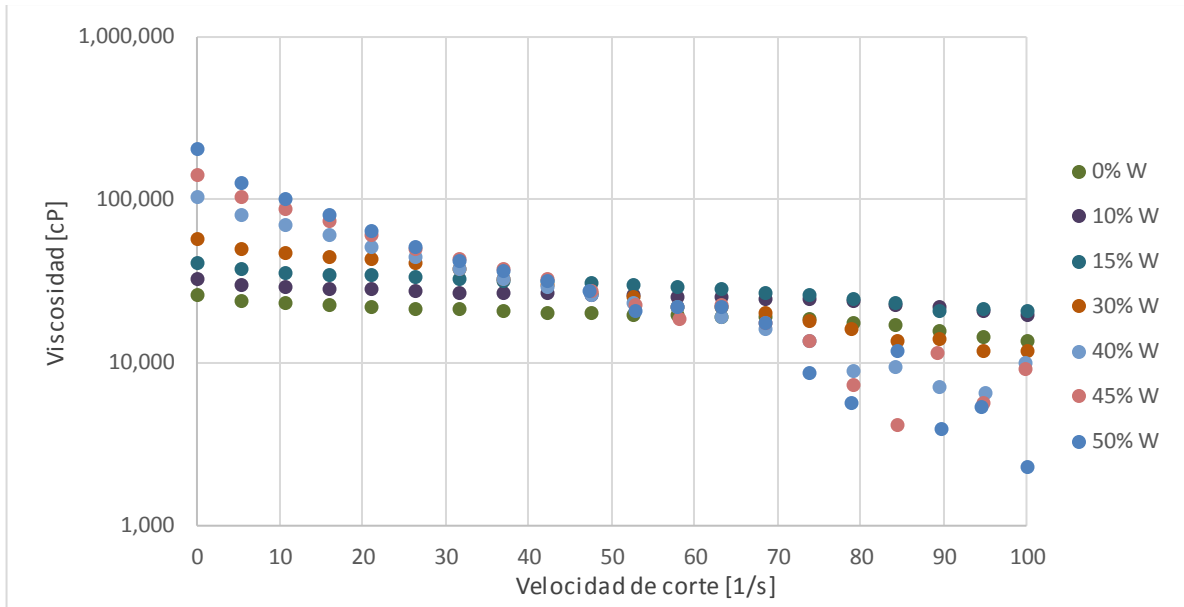


Figura B.10 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 40 °C.

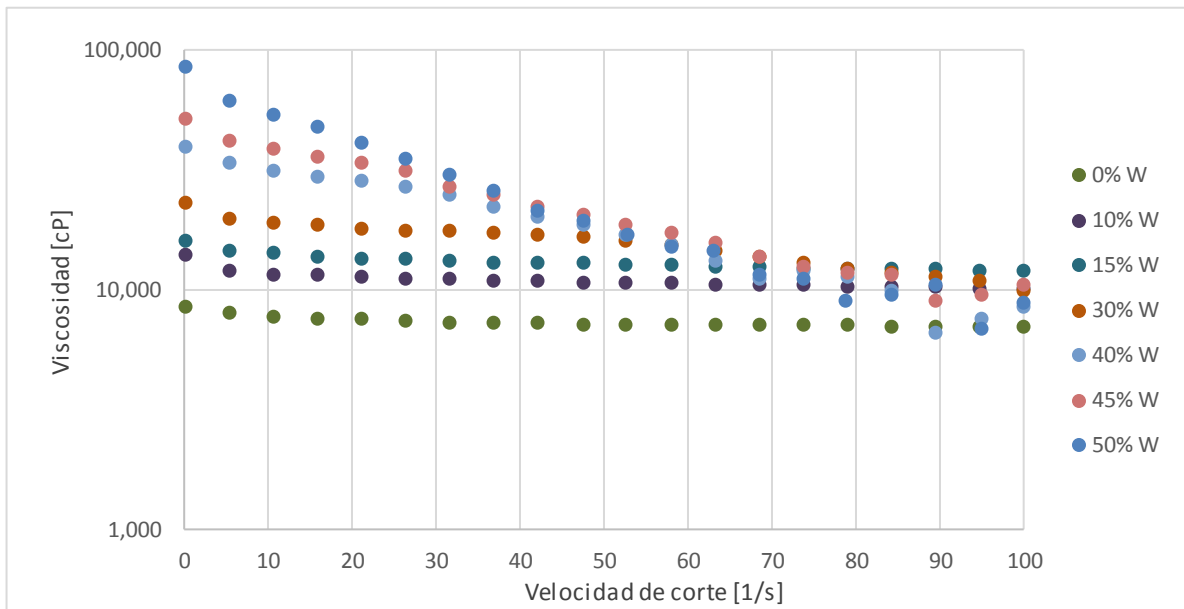


Figura B.11 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 50 °C.

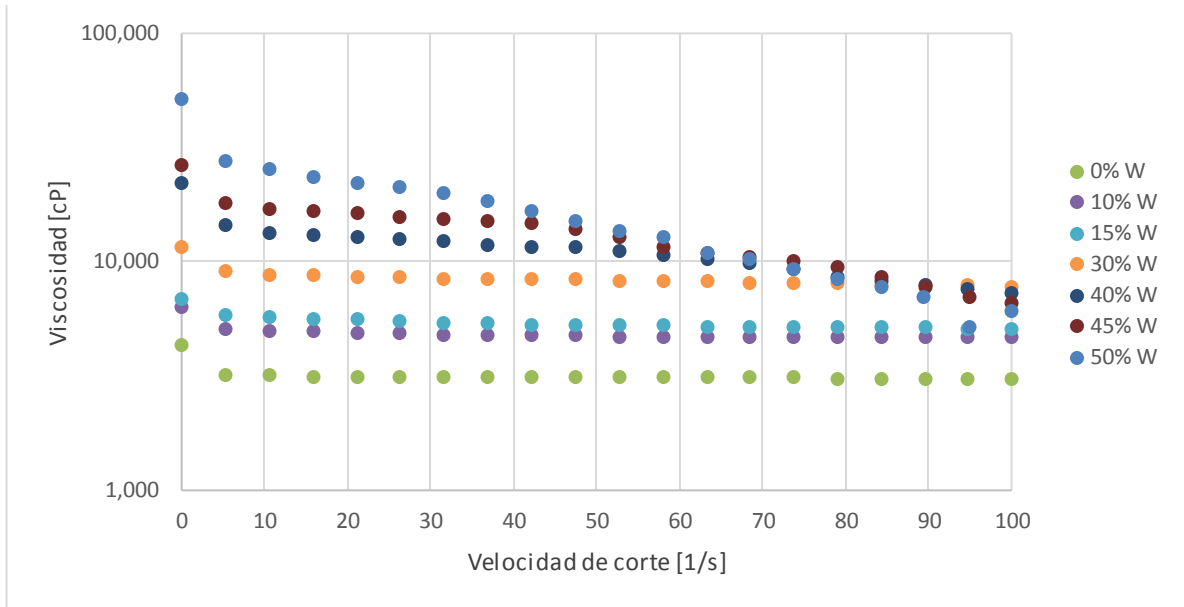


Figura B.12 Comportamiento reológico de las emulsiones con el aceite pesado “U”, a diferentes porcentajes volumétricos de agua y 60 °C.