

MODELO MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE PRESIÓN
EN LÍNEAS DE FLUJO CON EMULSIONES

ROXANNA MARIA VILLARREAL ESPINOSA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2006

MODELO MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE PRESIÓN
EN LÍNEAS DE FLUJO CON EMULSIONES

ROXANNA MARIA VILLARREAL ESPINOSA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar
al título de Ingeniero de Petróleos

Director

FERNANDO ENRIQUE CALVETE GONZÁLEZ

Ingeniero de Petróleos, M.Sc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA

2006

A DIOS por estar siempre conmigo y permitirme estar siempre con él.

A mis padres Alberto y Norma por el amor y la dedicación.

A mi hermano Albert por ser mi inspiración.

A mi abuelo (Q.E.P.D) por darme fortaleza.

A mi familia por el apoyo en todas las etapas de mi vida.

A mis amigos que hicieron hermoso este transitar.

AGRADECIMIENTOS

De manera muy sincera expreso mis agradecimientos a:

Al M.Sc Fernando Enrique Calvete por la oportunidad y la colaboración brindadas.

A los ingenieros Yeison Romero y Jairo Arrieta por la orientación y la información suministrada.

A la familia Corro Barrera, Juan M. Espinosa y a todas las personas me apoyaron y que de una u otra forma colaboraron en la consecución de esta meta.

A mis amigos por su compañía, comprensión y apoyo.

A mis profesores que contribuyeron en la formación recibida y en la consolidación de este título.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. EMULSIONES	17
1.1. DEFINICIÓN	17
1.2. CLASIFICACIÓN	18
1.3. CARACTERÍSTICAS	20
1.3.1. Tamaño de gota y distribución del tamaño de gota	20
1.3.2. Viscosidad de la emulsión	21
1.4. ESTABILIDAD DE LA EMULSIÓN	22
1.4.1. Película interfacial	23
1.4.2. Factores que afectan la estabilidad	23
1.4.3. Medida de la estabilidad	26
1.5. DESEMULSIFICACIÓN	27
1.5.1. Mecanismos involucrados en la desemulsificación	28
1.5.2. Tratamiento de emulsiones	29
2. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES	33
2.1. RELACIÓN ENTRE ESFUERZO DE CORTE Y DEFORMACIÓN	33
2.2. VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD APARENTE CON LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN	35
2.2.1. Modelo de Bingham	37
2.2.2. Modelo de Ostwale de Waele	38

2.2.3. Otros modelos	38
2.3. VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD APARENTE CON LAS VARIABLES DE LA EMULSIÓN	39
3. FLUJO DE EMULSIONES AGUA EN ACEITE	44
3.1. INTRODUCCIÓN AL FLUJO DE EMULSIONES	44
3.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS FLUIDOS	45
3.3. CORRELACIONES ENTRE FLUJO Y CAIDAS DE PRESIÓN	46
3.4. FACTOR DE FRICCIÓN Y NUMERO DE REYNOLDS	51
3.5. ESTIMACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS CON EMULSIONES AGUA EN ACEITE	53
3.5.1. Método de Metzner-Reed	53
3.5.2. Otros métodos	56
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y MODELO	59
4.1. ELABORACIÓN DEL ALGORITMO	59
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA	63
4.2.1. Datos de entrada	63
4.2.2. Resultados	63
4.2.3. Gráficos	63
4.3. METODOLOGÍA USADA Y PRESENTACIÓN	63
4.3.1. Ventana 1. Datos Requeridos	64
4.3.2. Ventana 2. Registros de Producción	65
4.3.3. Ventana 3. Nuevos Registros de Producción	65
4.3.4. Ventana 4. Comportamiento Reológico	66
5. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA	68
5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS EN LA VALIDACIÓN	68

5.2.	ANALISIS DE RESULTADOS	70
5.2.1.	Efecto de la viscosidad del crudo	70
5.2.2.	Efecto del corte de agua	71
5.2.3.	Comportamiento Reológico	72
5.2.4.	Caídas de Presión	75
5.3.	ANALISIS DE RESULTADOS GALA 1 NORTE	76
5.3.1.	Comportamiento Reológico	76
5.3.2.	Caídas de Presión	79
CONCLUSIONES		80
RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Esquema del proceso de formación y Rompimiento de una emulsión.	17
FIGURA 2. Diferentes tipos de emulsiones.	19
FIGURA 3. Distribución del tamaño de gotas.	20
FIGURA 4. Viscosidad de emulsiones fuertes a 125°F.	21
FIGURA 5. Viscosidad relativa de la emulsión.	22
FIGURA 6. Mecanismo de estabilización por asfáltenos.	24
FIGURA 7. Efectos del pH y de la concentración del desemulsificante en la estabilidad de la emulsión.	26
FIGURA 8. Proceso de desemulsificación.	29
FIGURA 9. Esfuerzo de corte simple en un material	34
FIGURA 10. Distribución de velocidad, esfuerzo de corte y velocidad de corte para un fluido newtoniano	35
FIGURA 11. Comportamiento reológico de fluidos Newtonianos y No-Newtonianos	36
FIGURA 12. Distribución de velocidad, esfuerzo de corte y velocidad de corte para un fluido Bingham	37

FIGURA 13.	Variación de la viscosidad relativa con el contenido de fase interna	41
FIGURA 14.	Esquema de flujo desarrollado en tubería	46
FIGURA 15.	Factor de fricción	55
FIGURA 16.	Diagrama de flujo	61
FIGURA 17.	Ventana 1. Datos Requeridos	64
FIGURA 18.	Ventana 2. Registros de Producción	65
FIGURA 19.	Ventana 3. Nuevos Registros de Producción	66
FIGURA 20.	Ventana 4. Comportamiento Reológico	67
FIGURA 21.	Caída de Presión crudo Tía Juana	69
FIGURA 22.	Caída de Presión crudo GALA, Pozo A	70
FIGURA 23.	Viscosidad de la emulsión vs. Viscosidad del crudo	71
FIGURA 24.	Viscosidad de la emulsión vs. % de agua	71
FIGURA 25.	Comportamiento de la viscosidad con el caudal	73
FIGURA 26.	Comportamiento Reológico de la emulsión	73
FIGURA 27.	Comportamiento Reológico de la emulsión	74
FIGURA 28.	Reograma	74
FIGURA 29.	Comportamiento de la viscosidad con la caída de presión/caudal	76

FIGURA 30.	Comportamiento de la viscosidad con el caudal	77
FIGURA 31.	Comportamiento Reológico de la emulsión	78
FIGURA 32.	Comportamiento Reológico de la emulsión	78
FIGURA 33.	Reograma	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. Propiedades del crudo Tía Juana	68
TABLA 2. Características de operación	69
TABLA 3. Propiedades del crudo GALA, Pozo A	69
TABLA 4. Características de operación	70
TABLA 5. Parámetros Reológicos calculados	72
TABLA 6. Parámetros Reológicos calculados	72
TABLA 7. Parámetros fluidodinámicos calculados	75
TABLA 8. Parámetros Reológicos calculados GALA, Pozo A	76
TABLA 9. Parámetros Reológicos calculados GALA, Pozo A	77
TABLA 10. Parámetros fluidodinámicos calculados GALA, Pozo A	79

RESUMEN

TITULO: **MODELO MATEMÁTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE PRESIÓN EN LÍNEAS DE FLUJO CON EMULSIONES***

AUTOR: **ROXANNA MARIA VILLARREAL ESPINOSA****

PALABRAS CLAVES: Caídas de presión, Emulsiones agua en aceite, Fluidos no newtonianos

DESCRIPCIÓN:

El petróleo crudo rara vez es producido sólo este generalmente esta mezclado con agua. La formación de emulsiones durante la producción de petróleo es un problema costoso tanto por los químicos que deben ser usados para su tratamiento; como por los problemas operacionales que causan, como altas caídas de presión en las líneas de flujo.

Usualmente se consideran las emulsiones como fluidos newtonianos, pero se ha observado que estas tienen frecuentemente un comportamiento no newtoniano sobre todo a altas concentraciones de fase dispersa. En este proyecto se pretende, sin hacer uso de ningún estudio de laboratorio determinar las propiedades reológicas de la emulsión que se puede presentar en una línea de flujo; estimar la caída de presión y entonces determinar la potencia necesaria de bombeo. Para ello se elaborará un algoritmo que permita calcular la caída de presión causada por el flujo de emulsiones en un tramo recto de tubería considerando estas como un fluido no-newtoniano. Y se desarrollará una aplicación con una herramienta de cálculo en la que se implemente el algoritmo y permita calcular caídas de presión de forma sencilla.

Las diferencias observadas al comparar los resultados obtenidos con algunos datos aproximados de la literatura, ponen de manifiesto el efecto tan significativo que tienen las propiedades reológicas de los fluidos de prueba y las características específicas del sistema de transporte; además de que muestran la carencia de datos para el transporte de fluidos no ideales, y de la necesidad de obtenerlos.

* Trabajo de Investigación

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Fernando Enrique Calvete González

ABSTRACT

TITLE: MATHEMATICAL MODEL FOR THE DETERMINATION OF THE PROFILE OF PRESSURE IN LINES OF FLOW WITH EMULSIONS *

AUTHORS: ROXANNA MARIA VILLARREAL ESPINOSA**

KEYWORDS: Pressure Drop, Water in Oil emulsions, Non Newtonian Fluids

DESCRIPTION:

Crude oil is seldom produced alone. It is generally commingled with water. Formation of emulsions during oil production is a costly problem, both in terms of chemical used in the treatment and due operational problems that they cause, as high pressure drop in the lines of flow.

Usually the emulsions like Newtonian fluids are considered, but it has been observed that these frequently have a non Newtonian behavior mainly to high concentrations of dispersed phase. In this project it is tried, without making use of no study of laboratory determine the rheological properties of the emulsion that can be presented in a flowline; to estimate pressure drop and to determine the necessary power of pumping. For it an algorithm will be elaborated that allows in order to calculate the pressure drop caused by the flow of emulsions in a straight section of pipe being considered these like a non-Newtonian fluid. And an application with a calculation tool was developed in which the algorithm is implemented and allows to calculate pressure drop of simple form.

The differences observed when comparing the results obtained with some approximated data of literature, show the so significant effect that they have the rheological properties of the fluids of test and the specific characteristics of the transport system; in addition to which they show the deficiency of data for the transport of non ideal fluid, and to the necessity to obtain them.

* Undergraduate Project

** Physiochemical Engineering Faculty, Petroleum Engineering School. Fernando Enrique Calvete González.

INTRODUCCIÓN

El agua esta lejos de ser soluble en hidrocarburos saturados y su solubilidad disminuye con el incremento del peso molecular de estos. Durante las operaciones de extracción del petróleo, la mezcla bifásica del petróleo crudo y agua de formación se desplazan en el medio poroso a una velocidad del orden de 1 pie/día, lo que es insuficiente para que se forme una emulsión. Sin embargo, al pasar por todo el aparataje de producción durante el levantamiento y transporte en superficie (bombas, válvulas, codos, restricciones, etc.) se produce la agitación suficiente para que el agua se disperse en el petróleo en forma de emulsión agua en aceite estabilizada por las especies de actividad interfacial presentes en el crudo.

Existen tres tipos de problemas con los que se puede encontrar un ingeniero al trabajar en flujo por tuberías, dependiendo de que quiera determinar: la fuerza requerida para el desplazamiento, la tasa de flujo y el diámetro de la tubería. Para el transporte de emulsiones se tiene en cuenta principalmente el primero la energía para movilizar un fluido por tubería dependiendo principalmente de su reología y del régimen de flujo.

Varias de las propiedades de las emulsiones están asociadas con el flujo, quizás las más importantes y por ello debemos estudiarlas. Sin embargo el desafío para la industria esta en la poca atención que recibe este tema. La reología de los sistemas emulsionados se ha estudiado por años, estos estudios son en su gran mayoría experimentales, y desafortunadamente los resultados no son uniformes o fáciles de interpretar.

El comportamiento reológico de las emulsiones es complejo y es función de varios factores, la viscosidad y otras características de las emulsiones están interrelacionadas, haciendo complicado el trabajo de señalar los principales

parámetros que afectan su comportamiento; además al tratarse de emulsiones, existe la posibilidad de que las propiedades de flujo varíen en función del tiempo, por la presencia de dos fases y de sustancias emulsificantes, la compleja interacción entre estos factores hacen que datos de un estudio sean muy difíciles de comparar con otros, o utilizar estos datos en otra aplicación; por esto la mayoría de las aproximaciones matemáticas, basadas en sistemas ideales son de uso limitado para definir el comportamiento reológico de estas.

Trabajos anteriores usualmente consideraban las emulsiones como fluidos newtonianos pero recientemente se ha observado que estas tienen frecuentemente un comportamiento no newtoniano sobre todo a altas concentraciones de fase dispersa, lo que hace más difícil la descripción de sus propiedades reológicas.

Varias técnicas establecidas están disponibles para el diseño de tubería para el flujo de emulsiones; pero en vista del comportamiento no newtoniano de la mezcla, los métodos convencionales no son apropiados. Además si es necesario determinar las características reológicas de la mezcla se requiere el equipo de laboratorio que en ocasiones no está disponible en los centros de producción. El método aquí mostrado es idealmente desarrollado para tales situaciones, no requiere ninguna instalación de laboratorio; este método está desarrollado para emulsiones cuyos datos reológicos no están disponibles fácilmente, y describe las técnicas usadas para medir los parámetros reológicos requeridos para determinar con mayor precisión cuánta energía será requerida para su transporte.

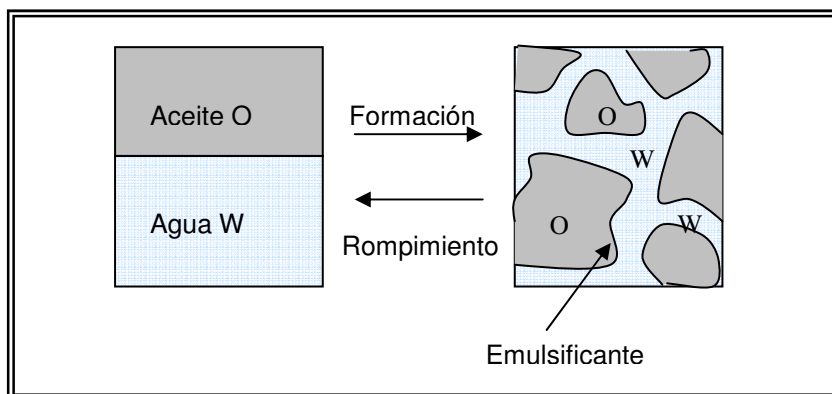
1. EMULSIONES

1.1. DEFINICIÓN

Las emulsiones pertenecen al conjunto de los sistemas dispersos y se distinguen por tener gotas de un líquido dispersas en otro líquido en el cual son insolubles. Las emulsiones son generalmente inestables desde el punto de vista termodinámico, porque al juntar las gotas en una sola fase se obtiene un sistema de menor energía libre. Las dispersiones de un líquido en otro no se llaman emulsiones a menos que sean suficientemente estables para persistir por un período razonable de tiempo; este tiempo puede variar de varios segundos a años, dependiendo del propósito con que se este usando el sistema ⁽¹⁾.

Para disminuir la alta tendencia de estas gotas a unirse, se adiciona al sistema un agente emulsificante. El agente emulsificante, al poseer doble afinidad (hidrófila-lipófila) se acopla en la interfase agua-aceite. La inclusión de este tercer componente con actividad interfacial facilita la formación de una emulsión estable ⁽²⁾ ⁽³⁾ ⁽⁴⁾. El papel del emulsificante puede entenderse mejor si se analiza el proceso de emulsificación esquematizado en la figura 1 en la que la fase aceite se subdivide en pequeñas gotas, las cuales se dispersan en la fase agua.

Figura 1. Esquema del proceso de formación y rompimiento de una emulsión



Fuente: César Augusto García. "Efecto de la Concentración del surfactante en la Estabilidad de Emulsiones O/W de crudos pesados". Tesis de grado UIS 2003.

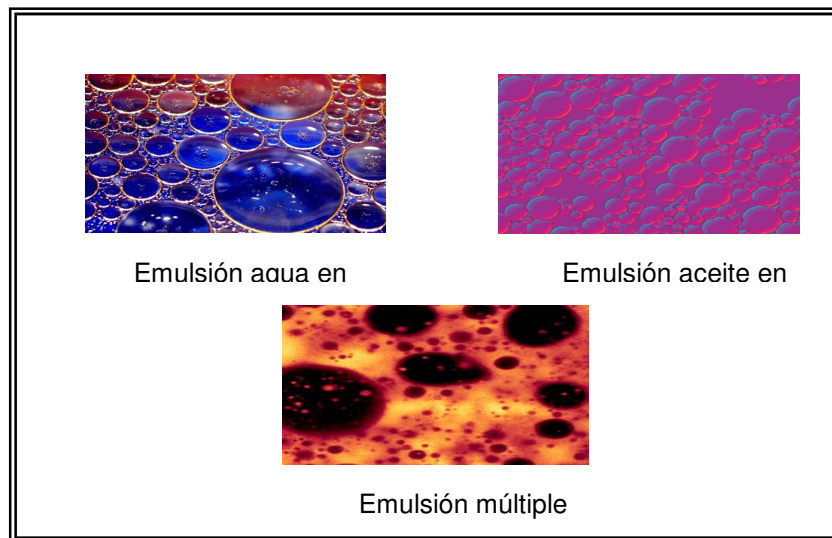
Las emulsiones entonces son estabilizadas por emulsificantes que tienden a concentrarse en la interfase aceite-agua donde forman una película interfacial. Esto generalmente conduce a una disminución de la tensión interfacial y promueve la dispersión de las gotas. Hay emulsificantes naturales como asfáltenos, resinas, ácidos y bases orgánicos otros surfactantes pueden estar presentes en químicos que son inyectados en la formación y en el pozo como por ejemplo fluidos de perforación, químicos para estimulación inhibidores de corrosión entre otros. Sólidos finos pueden también actuar como estabilizadores mecánicos, estas partículas tienen que ser mucho más pequeñas que las gotas de la emulsión. La efectividad de estos sólidos en la estabilización de las emulsiones depende de un número de factores como el tamaño de las partículas e interacción entre estas. Los sólidos finamente divididos encontrados en la producción de petróleo incluyen partículas de arcilla, arena, asfáltenos, productos de la corrosión y lodos de perforación ⁽⁵⁾.

1.2. CLASIFICACIÓN

Las emulsiones se clasifican en dos grandes grupos, con base en la naturaleza de la fase externa; las emulsiones agua en aceite consiste en gotas de agua dispersas en una fase continua de aceite y las emulsiones aceite en agua consiste de gotas de aceite en una fase continua de agua. En la industria del petróleo las emulsiones agua en aceite son las más comunes y se conocen como emulsiones normales, las emulsiones aceite en agua se conocen como inversas, otro tipo de emulsiones que se pueden encontrar son las emulsiones múltiples estas son más complejas y consisten en pequeñas gotas suspendidas dentro de gotas más grandes las cuales están suspendidas en una fase continua, por ejemplo agua en aceite en agua ⁽⁵⁾.

Una vez presentes las fases aceite y agua el tipo de emulsión que se forme depende de varios factores ⁽⁶⁾. Como una regla, cuando la fracción en volumen de una de las fases es pequeña comparada con la otra entonces la fase que se encuentra en menor fracción es la fase dispersa y la otra es la fase continua, cuando la relación de fases es 1 entonces otros factores determinaran el tipo de emulsión ⁽⁵⁾.

Figura 2. Diferentes tipos de emulsiones



Otro factor que se puede usar para continuar la clasificación de las emulsiones es el porcentaje en volumen de fase interna o relación de fase interna IPR (Internal phase ratio). Según el factor IPR, las emulsiones se clasifican en tres categorías: las que tienen un IPR menor que 30%; las que poseen uno comprendido entre 30 y 74% y las que presentan un IPR mayor que 74%.

El porcentaje en volumen de fase interna tiene una profunda influencia en las propiedades de la emulsión. Hasta un IPR de 30% las gotas se comportan aproximadamente como esferas individuales y ascienden o sedimentan hasta formar una capa cremosa de esferas. Con IPR mayores que 30% las gotas comienzan a sufrir colisiones entre ellas y a interferir unas con otras. Cuando se alcanza un IPR entre 50 y 60% se tiende a ordenar el conjunto de gotas de acuerdo con una disposición cúbica; si el IPR sobrepasa estos valores las esferas tratan de ordenarse en una configuración de mayor contacto entre ellas y la emulsión por consiguiente tiene una mayor viscosidad. En algunos casos al aumentar el IPR puede sobrevenir una inversión de la emulsión, en la que la fase dispersa pasa a ser la fase externa; si por otra parte en estas condiciones de alto IPR, se conserva la emulsión las gotas pueden sufrir considerable deformación y pierden su forma esférica ⁽²⁾.

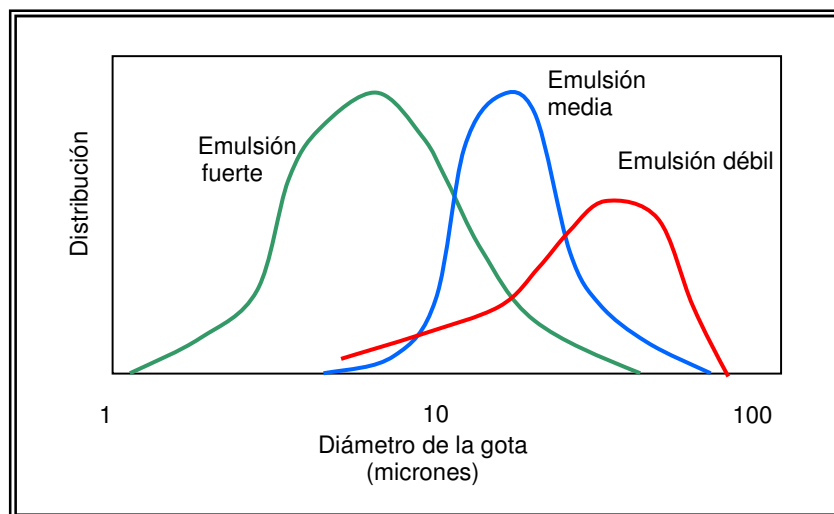
1.3. CARACTERÍSTICAS

Las emulsiones encontradas en campos de petróleo se caracterizan por presentar propiedades que incluyen la apariencia, tamaño de las gotas, viscosidad, conductividad, algunas de estas propiedades son descritas a continuación.

1.3.1 Tamaño de gota y distribución del tamaño de gota.

Las emulsiones producidas en campos de petróleo generalmente tienen diámetros que exceden los $0.1 \mu\text{m}$ y pueden ser hasta de unos $100 \mu\text{m}$. La distribución del tamaño de las gotas es mostrado en la figura 3 y depende de un número de factores incluyendo tensión interfacial, naturaleza del agente emulsificador, presencia de sólidos y de las propiedades del aceite y del agua. La distribución del tamaño de las gotas determina la estabilidad de la emulsión, como regla general entre más pequeño sea el promedio del tamaño de las gotas de agua dispersas, mayor es el tiempo de residencia requerido (mayores tamaños de equipos requeridos para el tratamiento) ⁽⁵⁾.

Figura 3. Distribución del tamaño de gotas

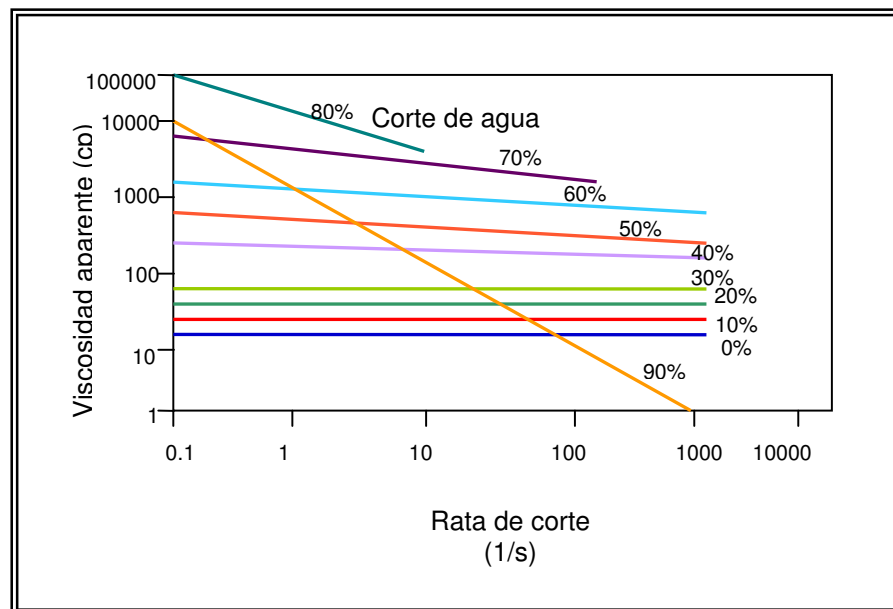


Fuente: KOKAL, Sunil. **Crude oil emulsions: A state of the art review.** Society of petroleum Engineers. Paper SPE 77497, October 2002.

1.3.2. Viscosidad de la emulsión.

La viscosidad de la emulsión agua en aceite puede ser substancialmente más alta que la viscosidad del aceite y el agua. A cierta fracción en volumen de agua la emulsión se comporta como fluidos pseudoplásticos que disminuyen su viscosidad cuando se aumenta la rata de corte. Los datos de viscosidad mostrados en la figura 4 indican que las emulsiones exhiben un comportamiento newtoniano hasta un contenido de agua de 30% (esto es indicado por el valor constante de viscosidad para todas las ratas de corte o pendiente cero) para cortes de agua sobre 30% la pendiente de la curva se desvía de cero indicando un comportamiento no-newtoniano. A aproximadamente a 80% de corte de agua toma lugar un fenómeno muy interesante sobre 80% de corte de agua la emulsión agua en aceite se invierte y el agua que era la fase dispersa ahora se convierte en la fase continua. El caso particular de emulsión múltiple (agua en aceite en agua) se puede presentar cuando la concentración de agua es mayor del 95%⁽⁵⁾.

Figura 4. Viscosidad de emulsiones fuertes a 125°F



Fuente: KOKAL, Sunil. **Crude oil emulsions: A state of the art review.** Society of petroleum Engineers. Paper SPE 77497, October 2002.

1.4. ESTABILIDAD DE LA EMULSIÓN

Desde un punto de vista puramente termodinámico una emulsión es un sistema inestable. Esto es porque la tendencia natural de los sistemas líquido-líquido es a separarse y reducir su área interfacial y por ende su energía interfacial.

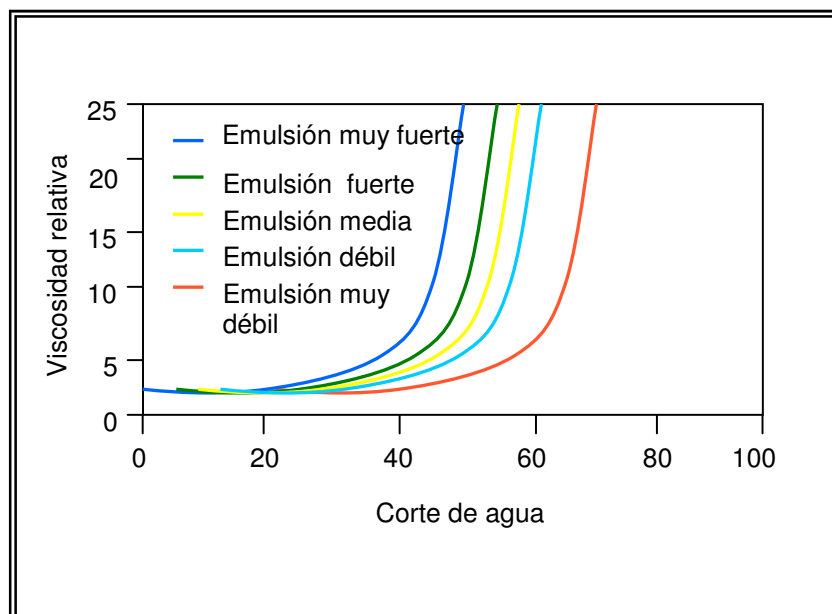
Las emulsiones producidas en campo se pueden clasificar de acuerdo a la estabilidad en ⁽⁵⁾:

Emulsiones débiles son aquellas que se pueden separar en unos pocos minutos.

Emulsiones medias se pueden separar en alrededor de 10 minutos.

Emulsiones fuertes pueden ser separadas algunas veces solo parcialmente en cuestión de horas o tal vez días.

Figura 5. Viscosidad relativa de la emulsión



Fuente: KOKAL, Sunil. **Crude oil emulsions: A state of the art review**. Society of petroleum Engineers. Paper SPE 77497, October 2002.

1.4.1. Película interfacial.

Como se mencionó anteriormente las emulsiones son estabilizadas por una película que se forma alrededor de gotas de agua. Esta película es creada como resultado de la adsorción de moléculas polares de alto peso molecular que son interfacialmente activas. Esta película mejora la estabilidad de la emulsión por: reducción de la tensión interfacial e incremento de la viscosidad interfacial. El aumento en la viscosidad de la película interfacial hace que se retarde la tasa de daño de esta y por lo tanto disminuye la velocidad de rompimiento de la emulsión.

Las características de la película interfacial son función del tipo de crudo (asfáltico, parafínico), composición y PH del agua, temperatura, edad y concentración de las moléculas polares en el crudo. Esta película puede ser clasificada en dos categorías basadas en su movilidad: Película rígida o sólida; película móvil o líquida.

1.4.2. Factores que afectan la estabilidad

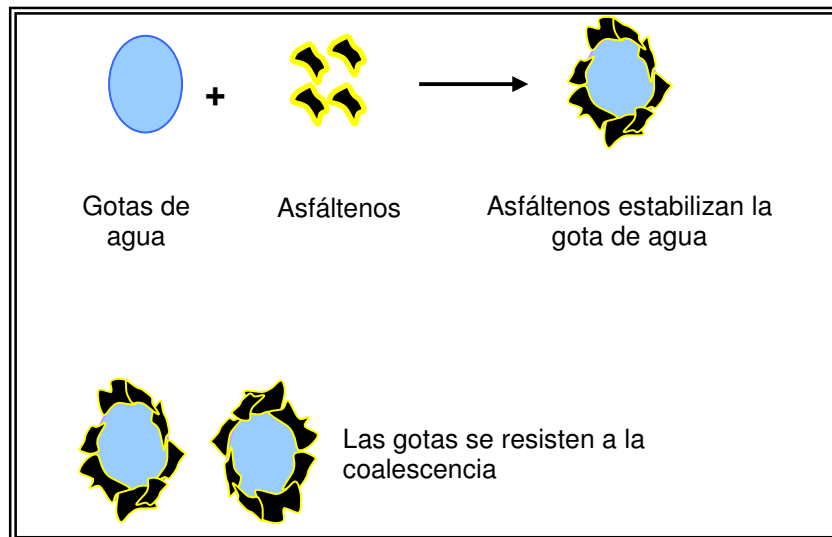
Entre los factores más importantes que afectan la estabilidad de la emulsión se incluye ⁽⁷⁾:

Fracción pesada en el aceite. Estos incluyen asfáltenos resinas y ácidos orgánicos solubles en aceite (ácido nafténico, ácido carboxílico) y bases; estos son los principales constituyentes de la película interfacial que rodea las gotas de agua y le da estabilidad a la emulsión.

Los asfáltenos tienen propiedades surfactantes que hacen de ellos un buen emulsificante. La acumulación de asfáltenos en la interfase da como resultado la formación de una película rígida. Los asfáltenos estabilizan las gotas de agua como se muestra en la figura 5. Para que dos gotas coalescan debe haber daño o ruptura de la película interfacial la presencia de asfáltenos puede retardar naturalmente el daño de esta película. Las resinas también tienen alto peso molecular y tienen una

fuerte tendencia a asociarse con los asfáltenos la relación asfáltenos: resinas en el crudo es la responsable del tipo de película formada (móvil o rígida) o por ende esta directamente relacionada con la estabilidad de la emulsión.

Figura 6. Mecanismo de estabilización por asfáltenos



Fuente: KOKAL, Sunil. **Crude oil emulsions: A state of the art review**. Society of petroleum Engineers. Paper SPE 77497, October 2002.

Sólidos. Partículas sólidas finas presente en el aceite son causantes de la efectiva estabilización de las emulsiones. Las partículas sólidas estabilizan la emulsión por difusión en la interfase aceite-agua donde forman una estructura rígida (película) que inhibe la coalescencia de las gotas; además estas pueden estar cargadas mejorando la estabilidad de la emulsión. Estas partículas deben ser mucho más pequeñas que las gotas en la emulsión para actuar como estabilizadores de la emulsión. Típicamente estos sólidos son partículas submicronicas.

La mojabilidad de las partículas sólidas juega un papel importante en el proceso de estabilización de la emulsión. Si el sólido permanece solamente en la fase aceite o agua no puede ser estabilizador de la emulsión, este debe estar presente en la interfase y debe ser mojado por ambas fases para actuar como agente estabilizador de la emulsión. Cuando los sólidos son preferencialmente mojados por aceite

entonces una emulsión agua en aceite puede resultar, el aceite moja las partículas y previene la coalescencia de las gotas de agua, similarmente cuando el agua moja las partículas sólidas se estabiliza el agua como fase continua o una emulsión aceite en agua.

La presencia de sólidos en la interfase también cambia las propiedades reológicas de la interfase la cual exhibe un comportamiento viscoelástico, afecta la tasa de daño de la película interfacial, y el desplazamiento de partículas a la interfase.

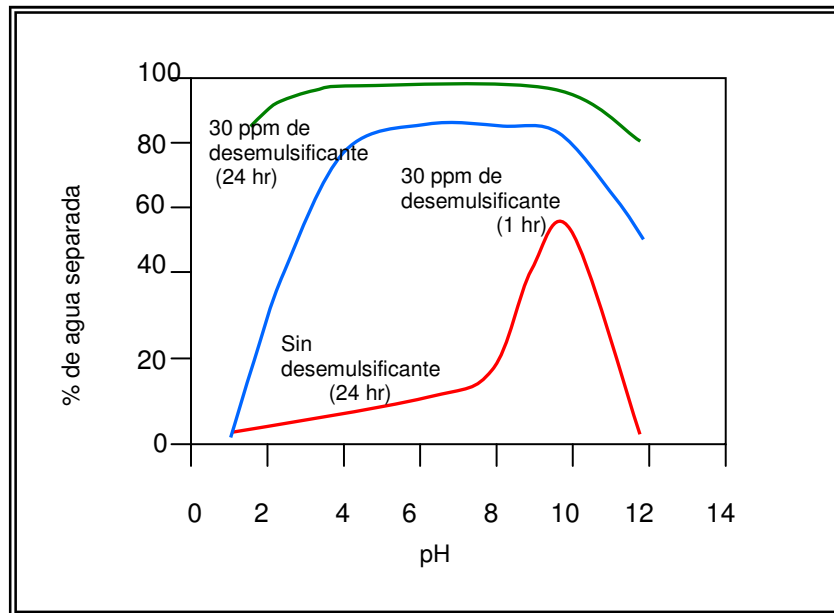
Temperatura. La temperatura puede afectar la estabilidad de la emulsión significativamente. Esta afecta las propiedades físicas del agua y el aceite, la película interfacial y la solubilidad de los surfactantes. Pero tal vez el mayor efecto de la temperatura se ve en la viscosidad de la emulsión: esta disminuye con un incremento de la temperatura, esta disminución ocurre principalmente debido a la disminución de la viscosidad del aceite. La temperatura aumenta la energía de las gotas, aumenta la frecuencia de las colisiones y reduce la viscosidad interfacial resultando en una alta velocidad de daño de la película y mejorando la coalescencia de las gotas.

Tamaño de las gotas. Una distribución del tamaño de las gotas típico es mostrado en la figura 2. Generalmente las emulsiones que tienen tamaños de gotas más pequeños puede ser más estable. Para la separación de agua las gotas deben coalescer, las gotas más pequeñas toman más tiempo para separarse, el tamaño de las gotas afecta la viscosidad de la emulsión esta es alta cuando las gotas son pequeñas.

pH. El pH del agua tiene una fuerte influencia en la estabilidad de la emulsión. La película rígida de la emulsión contiene ácidos orgánicos y bases, asfáltenos con grupos ionizables y sólidos, la adición de ácidos inorgánicos y bases influyen fuertemente la ionización en la película interfacial y cambian radicalmente las

propiedades físicas de esta. El pH influye en el tipo de emulsión formada. Bajos pH generalmente producen emulsiones W/O y altos pH producen emulsiones O/W. Un pH óptimo para la desemulsificación es 10 sin desemulsificante.

Figura 7. Efectos del pH y de la concentración del desemulsificante en la estabilidad de la emulsión



Fuente: KOKAL, Sunil. **Crude oil emulsions: A state of the art review**. Society of petroleum Engineers. Paper SPE 77497, October 2002.

1.4.3. Medida de la estabilidad

Desde un punto de vista práctico la medida de la estabilidad de la emulsión es una de las más importantes pruebas hechas a la emulsión, esta determina la facilidad con que el aceite y el agua pueden separarse. Hay varios métodos que pueden determinar la estabilidad de la emulsión ⁽⁵⁾; por rapidez el más común es la prueba de botella. La prueba de botella consiste en una dilución de la emulsión con un solvente y un desemulsificante; que se agita para dispersar el desemulsificante y se observa la separación de las fases en función del tiempo. Esta prueba normalmente se realiza a elevadas temperaturas y puede involucrar centrifugación para mejorar la dispersión. Mientras diferentes métodos y procedimientos son seguidos por varios

laboratorios para la prueba de botella, el método estándar es el ASTM 4007 desarrollado para determinar sedimentos de fondo y agua en emulsión. La estabilidad de la emulsión es generalmente relacionada con la facilidad para separar el agua con el tiempo y la dosificación. Por ejemplo para una cantidad determinada de desemulsificante la estabilidad de la emulsión puede estar dada por la cantidad de agua separada en un período dado de tiempo. La prueba de botella es usada para determinar el potencial de un desemulsificante.

Recientemente fue propuesto un método para determinar la estabilidad de la emulsión cuantitativamente ⁽⁸⁾, este propone el concepto de índice de separación para la emulsión, el agua total separada en una prueba de botella para diferentes dosificaciones de desemulsificante es promediado para determinar el índice de separación este puede variar entre cero (no separación) hasta cien (separación total). El índice de separación entonces proporciona una medida de la estabilidad de la emulsión; valores bajos del índice de separación indican emulsiones estables.

1.5. DESEMULSIFICACIÓN

La desemulsificación es el rompimiento y separación de la emulsión en sus diferentes fases. Desde el punto de vista de la producción de aceite es interesante observar dos aspectos de la desemulsificación. a) la tasa o velocidad con la cual la separación tiene lugar. b) la cantidad de agua que continúa en el aceite después de la separación. Una rápida separación y un bajo valor de agua residual en el crudo es obviamente lo que se quiere al producir petróleo.

Como se mencionó previamente las emulsiones poseen un grado de estabilidad. Esta estabilidad surge desde la formación la película interfacial y el encapsulamiento de las gotas de agua. Para separar la emulsión la película interfacial debe ser destruida y hacer que las gotas coalescan; la desestabilización o rompimiento de la emulsión esta íntimamente relacionada con la remoción de la película interfacial. Los factores que mejoran o aceleran el rompimiento de la emulsión incluyen ⁽⁵⁾:

Aumento de la temperatura
Reducción de la agitación
Incremento del tiempo de residencia o retención
Remoción de sólidos
Control de agentes emulsificantes

1.5.1. Mecanismos involucrados en la desemulsificación

La desemulsificación es la separación de una emulsión en sus fases componentes el proceso ocurre en dos pasos. El primer paso es la floculación (agregación, aglomeración), el segundo paso es la coalescencia; cada uno de estos pasos es determinante en el proceso de rompimiento de la emulsión ⁽⁵⁾.

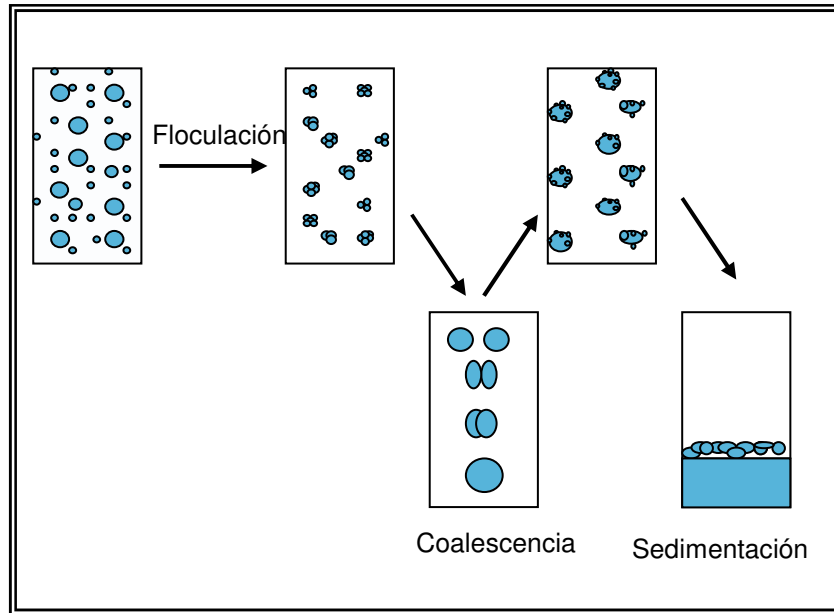
Floculación o agregación el primer paso en el proceso de desemulsificación es la floculación de las gotas de agua. Durante la floculación las gotas forman agregados o “flocs”. La tasa de floculación depende de factores como corte de agua, temperatura, viscosidad del aceite y diferencia de densidad entre el aceite y el agua. La floculación es el resultado de las atracciones de Van Der Waals y en general de las interacciones entre gotas adyacentes ⁽⁹⁾.

Coalescencia durante la coalescencia las gotas se fusionan para formar gotas más grandes. La coalescencia ocurre en dos etapas: daño y rompimiento de la película interfacial, la coalescencia solo tiene lugar si la película interfacial que esta alrededor de las gotas se rompe. Este es un proceso irreversible que conduce a una disminución en el número de gotas y eventualmente a una completa desemulsificación. La coalescencia puede ser mejorada a altas tasas de floculación, altas tensiones interfaciales, bajas viscosidades de aceite, altos cortes de agua y altas temperaturas ⁽⁹⁾.

Finalmente la emulsión se separa en dos porciones una con mayor porcentaje de fase dispersa que la otra. Es la consecuencia directa de la diferencia de densidades

entre las gotas y la fase continua. Si las gotas son más densas que la fase continua, tenderán a precipitarse, enriqueciendo el fondo de la emulsión. Si la fase continua es más densa que las gotas estas ascienden, enriqueciendo el tope de la emulsión.

Figura 8. Proceso de desemulsificación



1.5.2. Tratamiento de emulsiones

En la industria del petróleo las emulsiones deben ser separadas casi completamente antes de que este sea procesado y transportado. La separación de la emulsión en aceite y agua involucra la desestabilización de la película emulsificante que envuelve las gotas de agua, este proceso llevado a cabo por uno o combinación de los siguientes métodos ⁽⁵⁾:

Reducción de la velocidad de flujo que permite la separación gravitacional de aceite y agua.

Adición de desemulsificantes químicos.

Aumento de la temperatura de la emulsión.

Aplicación de un campo eléctrico que promueva la coalescencia.

Cambio de las características físicas de la emulsión.

La mayoría de los métodos de tratamiento de emulsiones utilizan la aplicación de calor y un apropiado desemulsificante para promover la desestabilización, seguido por un tiempo de asentamiento que permita que ocurra la separación gravitacional.

- **Método térmico**

El calentamiento de la emulsión mejora el rompimiento o separación, si se reduce la viscosidad del aceite se incrementa la tasa de sedimentación del agua. El incremento de la temperatura también causa una desestabilización de la película rígida debido a la reducción de la viscosidad interfacial, de otro lado la frecuencia de la coalescencia entre las gotas de agua aumenta por el aumento de la energía térmica de estas, en otras palabras el calor acelera el proceso de rompimiento de la emulsión. Sin embargo el incremento de la temperatura tiene algunos efectos negativos, primero el costo del calor que hay que suministrar a la corriente de emulsión, segundo esto puede resultar en pérdidas de livianos reduciendo su gravedad API y el volumen de aceite tratado, a demás el aumento de temperatura puede conducir a un aumento del potencial de corrosión en el tratador. La aplicación de calor para el rompimiento de las emulsiones debe estar basada en un análisis económico; el costo de la adición de calor (instalación del tratador, adición de químicos) debe estar balanceado con el precio del crudo resultante.

- **Método mecánico**

Existe una amplia variedad de equipos mecánicos utilizados en el rompimiento de las emulsiones, estos incluyen el free water knock out, separadores de dos y tres fases, tanques de asentamiento entre otros, en estos equipos se separa el agua libre y se rompe la emulsión.

- **Método eléctrico**

La aplicación de un alto voltaje eléctrico es frecuentemente un principio efectivo para el rompimiento de la emulsión, este se basa en la teoría que las gotas de agua tienen una carga asociada y cuando se le aplica un campo eléctrico las gotas se mueven rápidamente y colisionan unas con otras y coalescen. El campo eléctrico también causa disturbios en la película interfacial por ordenamiento de las moléculas polares, por eso se rompe la película interfacial y se mejora la coalescencia. El sistema eléctrico consta de un transformador y unos electrodos que proporcionan el alto voltaje, los electrodos son colocados de tal forma que el campo se genere en dirección perpendicular al flujo, la distancia entre los electrodos se diseña de forma ajustable para variar la intensidad del campo según se requiera para el tratamiento de la emulsión. El tratamiento electrostático raramente es aplicado solo como un método de rompimiento de emulsiones, este generalmente es usado en conjunto con la adición de químicos, el uso de tratamiento electrostático puede resultar en una reducción del calor requerido para el tratamiento, y bajas temperaturas implican menos costos, menos pérdidas de livianos y reduce los problemas de corrosión.

- **Método químico**

El método más común de tratamiento de emulsión es la adición de químicos llamados desémulsificantes. Estos químicos están diseñados para neutralizar el efecto de el agente emulsificante que estabiliza la emulsión. Los desémulsificantes son componentes surfactantes que cuando se adicionan a la emulsión migran a la interfase aceite-agua y rompen o debilitan la película rígida y mejoran la coalescencia de las gotas de agua. Un óptimo rompimiento de emulsiones con desémulsificantes requiere:

Apropiada selección del químico para una emulsión dada.

Adecuada cantidad de ese químico.

Adecuada mezcla del químico en la emulsión.

Suficiente tiempo de retención para permitir la sedimentación de las gotas.

La cantidad de químicos adicionados es muy importante; una pequeña cantidad de desemulsificante puede no resolver el problema de emulsiones, pero una cantidad muy alta también puede resultar dañino para el proceso de tratamiento, ya que los desemulsificantes también son surfactantes y un exceso en la cantidad de desemulsificante puede producir una emulsión muy estable, en este caso el desemulsificante simplemente reemplaza los emulsificantes naturales. Debido a la amplia variedad de químicos desarrollados como desemulsificantes, los diferentes tipos de crudo manejados, es muy difícil establecer una dosificación típica o Standard para el tratamiento de emulsiones. La cantidad o dosificación de desemulsificante requerido es muy específico y depende de un número de factores. Basado en un análisis de la literatura la cantidad de desemulsificante utilizada puede variar desde menos de 10 ppm hasta más de 100 ppm para recobros primarios y secundarios, durante la recuperación terciaria especialmente durante la inyección de surfactantes estas cantidades pueden alcanzar los miles de ppm.

2. COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LAS EMULSIONES

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo; esto es todo lo concerniente a la relación entre fuerzas que pueden actuar sobre un material y como se comporta el material en respuesta a estas fuerzas, deformándose o fluyendo. La aplicación de un esfuerzo de corte a un material puede provocar, o una deformación de corte constante, que lo identifica como un sólido elástico, o una deformación continua que, en estado estacionario aumentará a una velocidad constante y lo caracteriza como un fluido.

La ecuación que describe la relación entre esfuerzo y deformación para un material dado es una característica de la naturaleza o constitución del material y por esto se llama ecuación constitutiva o ecuación reológica de estado.

Las emulsiones tienen un comportamiento reológico variado que va desde materiales que tiene características de sólido, hasta fluidos ligeros. Para efectos de especificar y medir las propiedades reológicas de las emulsiones, la mayoría de los autores las consideran un sistema continuo, pseudohomogéneo. Esta suposición impone limitaciones sobre cálculos y mediciones ya que estas se referirán a un promedio sobre una pequeña región y no a un punto en el espacio. Cambios en propiedades de las emulsiones, entre distancias inferiores al tamaño de las gotas o a la separación entre gotas, no se puede analizar, desde un punto de vista reológico con esta suposición ⁽¹⁰⁾.

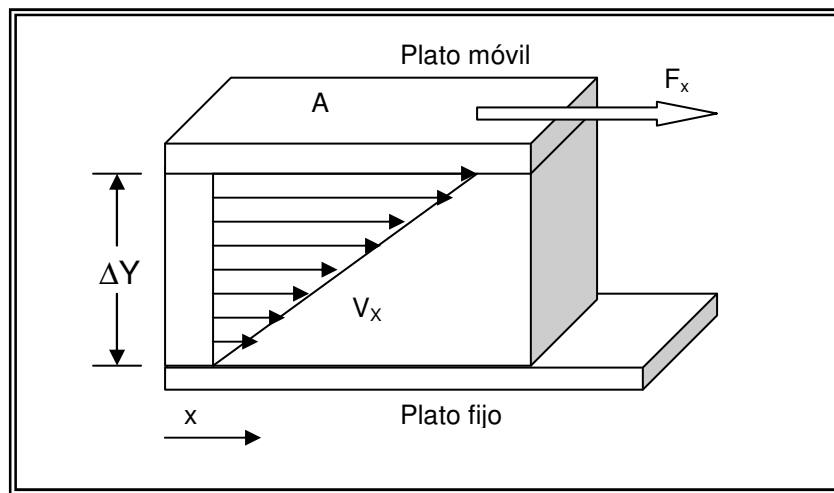
2.1. RELACIÓN ENTRE ESFUERZO DE CORTE Y DEFORMACIÓN ^{(10) (11) (12) (13)}

Si se supone un material confinado entre dos laminas a las cuales esta firmemente adherido, separadas una distancia ΔY como se muestra en la figura 9 y se aplica una fuerza F_x , a la lámina superior a la que se le permite el desplazamiento

en una longitud L_x mientras que la inferior permanece estática, se establece un gradiente de desplazamiento en el material, $J_{yx} = \Delta L_x / \Delta Y$, y el esfuerzo aplicado, $\tau_{yx} = F_x / A_y$ es proporcional al gradiente de desplazamiento en el material; es decir:

$$\tau_{yx} = G(\Delta L_x / \Delta Y) = G(J_{yx}) \quad (2.1)$$

Figura 9. Esfuerzo de corte simple en un material



DARBY, Ronald. **Emulsions Rheology**. Texas A&M University, College Station, Texas. 1990.

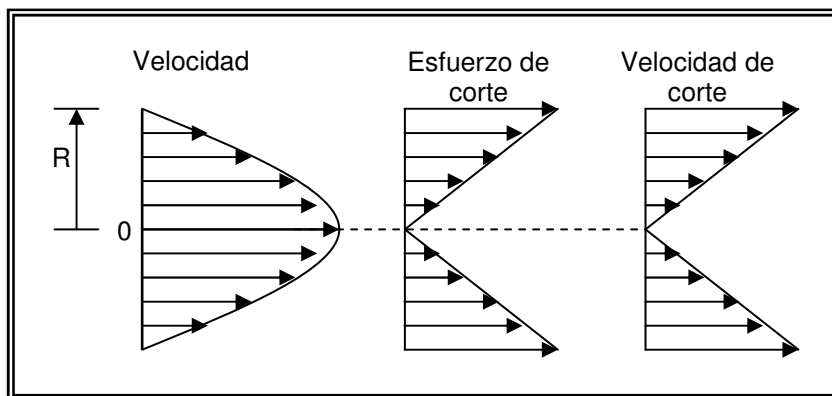
El valor de la relación esfuerzo de corte a deformación unitaria de corte es llamada el modulo de corte G.

$$\tau_{yx} / J_{yx} = G \quad (2.2)$$

El modulo de corte puede ser constante o función de J_{yx} o τ_{yx} . Los parámetros que definen esta función son llamadas las propiedades reológicas del material. Por otra parte V_x representa el componente en la dirección x de la velocidad. Su derivada respecto a "y" dV_x/dy es el gradiente de velocidad llamado velocidad de deformación o cizallamiento.

La velocidad de aumento de la deformación unitaria de corte se llama para abreviar, velocidad de corte. Si la magnitud de la velocidad de corte en condiciones de flujo estacionarias es directamente proporcional al esfuerzo de corte aplicado el material es conocido como newtoniano. En este caso la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte es constante y la constante de proporcionalidad se denomina viscosidad de fluido. Cuando la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte no es constante el fluido es denominado no-newtoniano y la relación funcional entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte es conocida como viscosidad aparente que puede ser expresada en relación con el esfuerzo de corte o con la velocidad de corte, en cuyo caso los parámetros de la relación son las propiedades reológicas del material.

Figura 10. Distribución de velocidad, esfuerzo de corte y velocidad de corte para un fluido newtoniano



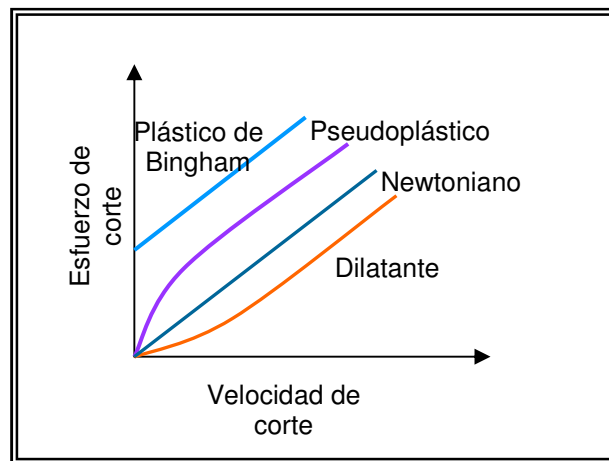
Fuente: Martin H. Wohl. "Isothermal Laminar Flow of Non-Newtonian Fluids in Pipe". Chemical Engineering

2.2. VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD APARENTE CON EL NIVEL DE ESFUERZO DE CORTE Y/O VELOCIDAD DE CORTE⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾

Muchos fluidos de interés en ingeniería no exhiben propiedades newtonianas; es decir una proporcionalidad estricta entre el esfuerzo y la deformación. Las diferentes manifestaciones de comportamiento no newtoniano puede ser divididas en dos clasificaciones: aquellos que dependen del tiempo y aquellos que no.

El comportamiento de algunos fluidos cuya reología depende solo de la magnitud del esfuerzo de corte aplicado; y no de la duración de la aplicación del esfuerzo son mostrados en la figura 11. Así si la relación del esfuerzo de corte a velocidad de corte permanece constante el fluido es newtoniano; si aumenta al aumentar el esfuerzo de corte el fluido es dilatante y si disminuye el fluido es pseudoplástico. Algunos fluidos presentan deformación unitaria a bajos niveles de aplicación de esfuerzos de corte y luego, superado un cierto nivel de esfuerzo conocido como esfuerzo de cedencia se comportan como fluidos newtonianos y son llamados fluidos de Bingham.

Figura 11. Comportamiento reológico de fluidos Newtonianos y no-Newtonianos



Fuente: DARBY, Ronald. **Emulsions Rheology**. Texas A&M University, College Station, Texas. 1990.

Cuando se presentan emulsiones con bajos valores de fase interna las interacciones entre las gotas de la emulsión son mínimas y la relación entre el esfuerzo de corte es constante, es decir que la emulsión se comporta como un fluido Newtoniano. Cuando las interacciones entre las gotas son numerosas la viscosidad aparente no es más una constante sino una función del esfuerzo de corte, o más propiamente de la velocidad de corte y el fluido se llama no Newtoniano. Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas o “modelos” para expresar la relación que existe, en estado estacionario, entre el esfuerzo y la velocidad de corte para estos fluidos no-newtonianos.

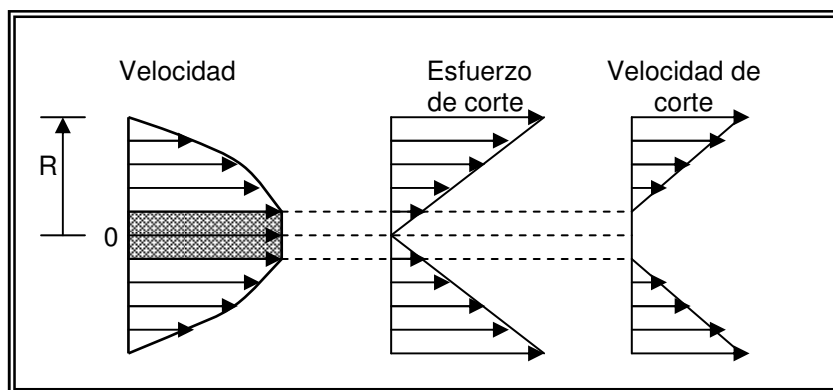
2.2.1. Modelo de Bingham ⁽¹⁰⁾ ⁽¹³⁾

Los plásticos de Bingham son fluidos que muestran un punto de cedencia definido, un esfuerzo bajo el cual el flujo no ocurre. Históricamente este comportamiento fue descubierto por Bingham y Green en 1919 dando nacimiento a la reología moderna. La ecuación para el flujo de los plásticos de Bingham es:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0 + \mu\gamma & \tau &> \tau_0 \\ \gamma &= 0 & \tau &< \tau_0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Toda sustancia que se comporta de acuerdo con este modelo de dos parámetros se denomina **plástico de Bingham**: permanece rígida mientras el esfuerzo cortante es menor de un determinado valor τ_0 , por encima del cual se comporta de forma semejante a un fluido newtoniano. Mucho debate existe sobre la validez de un esfuerzo de cedencia en un material, porque en muchas ocasiones este esfuerzo aparece por dificultades experimentales para trabajar a muy bajos esfuerzos.

Figura 12. Distribución de velocidad, esfuerzo de corte y velocidad de corte para un fluido Bingham



Fuente: Martin H. Wohl. "Isothermal Laminar Flow of Non-Newtonian Fluids in Pipe". Chemical Engineering

2.2.2 Modelo de Ostwald-de Waele ^{(10) (13)}

En algunos casos al graficar esfuerzos de corte vs. velocidades de corte en escala logarítmicas, se obtiene una línea recta. Este comportamiento conduce a una relación del tipo:

$$\tau = m\gamma^n \quad (2.4)$$

Esta ecuación de dos parámetros se conoce también con, el nombre de ley **de la potencia**. Los parámetros de este modelo son m , la consistencia y n , el índice de flujo. Para $n = 1$ se transforma en la ley de la viscosidad de Newton, siendo $m = -1$; por consiguiente, la desviación del valor de n con respecto a la unidad es una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano.

Cuando n es menor que uno el comportamiento es pseudoplástico, mientras que para valores superiores a la unidad es dilatante.

Este modelo tiene varias dificultades fundamentales que hacen difícil su extrapolación más allá de los valores medidos. Predice contra la evidencia experimental, que la viscosidad disminuye, sin límite, a medida que aumenta el esfuerzo de corte. También lleva a establecer que la viscosidad tiende a infinito a medida que el esfuerzo de corte se acerca a cero. Ambos comportamientos contradicen resultados experimentales por lo que los dos extremos de la ley de potencia no tienen valor real.

2.2.3 Otros modelos ⁽¹⁰⁾

Los modelos hasta aquí presentados son los más sencillos porque sólo tienen dos parámetros para representar el material. Existen por supuesto otros más complejos que representan mejor el material pero son más difíciles de aplicar en problemas reales de flujo:

- Modelo de Herschel-Bulkley

Este es esencialmente una combinación de los modelos de Bingham y la ley de potencia

$$\tau = \tau_0 + m\dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

- Modelo de Ellis

$$\dot{\gamma} = \left(\tau_0 + \tau_1 |\dot{\gamma}|^{n-1} \right) \tau \quad (2.6)$$

- Modelo de Reiner-Philippoff

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{1}{\mu} + \frac{\mu_0 - \mu}{1 + (\tau/\tau_0)^2} \right) \tau \quad (2.7)$$

2.3. VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD APARENTE CON LAS VARIABLES DE LA EMULSIÓN

Las emulsiones son dispersiones de dos fases líquidas inmiscibles, como agua y petróleo. Las propiedades de flujo de estas emulsiones son de gran interés para la industria. Por ejemplo la elección de equipos, los requerimientos de potencia para la producción de emulsiones dependen de las propiedades reológicas de las emulsiones. La predicción del comportamiento de las emulsiones durante el transporte a través de tuberías requiere un conocimiento de posibles variaciones de la viscosidad.

Al aumentar la fase dispersa el patrón de la viscosidad puede cambiar de Newtoniano a no Newtoniano. A los primeros valores altos fase interna el comportamiento de la emulsión puede tender al del fluido pseudoplástico. A los valores máximos de fase interna se puede llegar a observar ocasionalmente un comportamiento plástico que exhibe viscoelasticidad⁽¹⁵⁾.

La viscosidad de una emulsión depende de factores como: ^{(11) (13) (15)}

Fracción en volumen de fase dispersa.

Viscosidad de la fase continua.

Rata de corte.

Temperatura.

Viscosidad de la fase dispersa.

Naturaleza y concentración de los agentes emulsificantes.

Tamaño promedio de las gotas y distribución.

Presencia de sólidos.

La viscosidad de la emulsión es directamente proporcional a la viscosidad de la fase continua. Sin embargo las ecuaciones y correlaciones para la predicción de la viscosidad de la emulsión esta normalmente expresado en términos de la viscosidad relativa η_r .

$$\eta_r = \eta_e / \eta_o \quad (2.8)$$

donde η_e y η_o son las viscosidades de la emulsión y la fase aceite respectivamente. El factor más importante que influye en la viscosidad de la emulsión es la fracción en volumen de la fase dispersa ⁽¹⁶⁾.

En la literatura se encuentran modelos teóricos o empíricos que indican una relación de proporcionalidad entre la viscosidad de la emulsión y la viscosidad de la fase externa, la cual contiene en general el agente emulsionante. Tal relación es obvia a baja proporción de fase interna, cuando la presencia de las gotas de la fase interna produce sólo una interacción adicional; ⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾.

$$\eta = \eta_{0*} f(x) \quad (2.9)$$

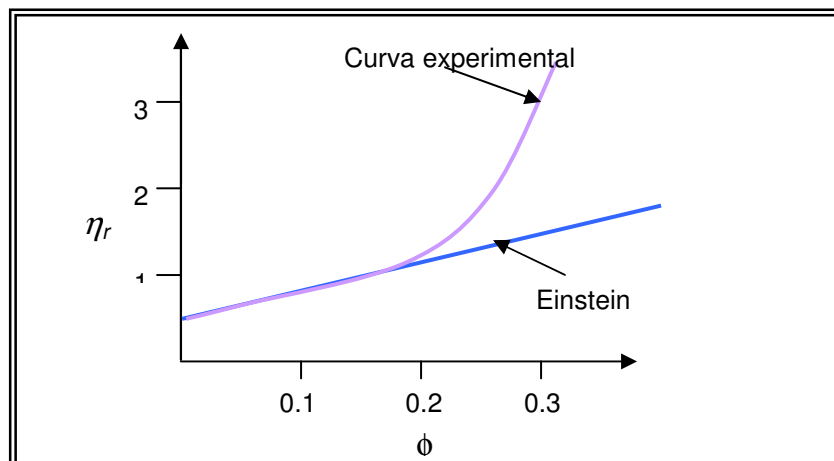
donde $f(x)$ representa los demás efectos.

Sin embargo, a alto contenido de fase interna ($\phi > 70\%$) es probable que tal relación ya no sea válida. La proporción de la fase interna es obviamente un factor de primera importancia en la viscosidad de las emulsiones. Las emulsiones de muy baja relación de fase interna generalmente exhiben un comportamiento reológico de acuerdo con el patrón que impone la fase que está en mayor proporción. En efecto, es perfectamente razonable desde el punto de vista intuitivo considerar que a mayor contenido de gotas, mayores interacciones entre gotas y por lo tanto mayor viscosidad. Einstein desarrolló una ecuación que relaciona la viscosidad de emulsiones diluidas η con la viscosidad de la fase continua η_0 y la concentración de fase dispersa ϕ :

$$\eta = \eta_0 * (1 + 2.5 * \phi) \quad (2.10)$$

Esta expresión es válida solo para $\phi < 20\%$ es decir en el caso en que no existen interacciones de las gotas entre si, sino sólo interacciones entre gota y fase externa. Es por lo tanto una ley limite de poco interés en los problemas prácticos.

Figura 13. Variación de la viscosidad relativa con el contenido de fase interna



Fuente: SALAGER, J. L. **Propiedades de las emulsiones y su medición**. Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. 1999

La importancia de esta ecuación es que una emulsión puede tener una viscosidad aproximada a la de la fase continua cuando la concentración de fase dispersa es

aproximadamente cero. Sin embargo viscosidad de la emulsión aumenta al aumentar la concentración de fase dispersa.

Esta ecuación se basa en los siguientes supuestos ⁽¹⁸⁾:

Las gotas se comportan como esferas rígidas.

Las gotas son grandes cuando se comparan con el tamaño de las moléculas que componen la fase continua.

La interacción hidrodinámica entre las gotas es mínima.

El deslizamiento de la fase continua sobre la interfase no existe.

Las limitantes impuestas a la aplicabilidad de la ecuación se cumplen cuando las gotas son pocas; cuando su tamaño no pasa de unas pocas micras y se encuentran rodeadas por una red de emulsificante en forma de película elástica o viscoelástica.

Cuando la concentración de la fase dispersa aumenta, la emulsión comienza progresivamente un comportamiento no-Newtoniano. Las emulsiones en general exhiben una dependencia no lineal de la viscosidad relativa y la fracción en volumen. Un incremento exponencial de η_r hasta un valor máximo conocido como punto de inversión, es frecuentemente observado ⁽¹⁵⁾.

La relación que describe este comportamiento fue derivada por Richardson:

$$\eta_r = e^{K\phi} \quad (2.11)$$

Donde:

K Es la constante de Richardson y depende del sistema.

Para emulsiones agua en aceite Camy y colaboradores reportaron valores de K entre 3 y 4 ⁽¹⁹⁾

ϕ Es la fracción en volumen de la fase dispersa (corte de agua).

Esta ecuación estima la viscosidad relativa con una aproximación entre el 15 y 30% para temperaturas entre 5 y 40°C y cortes de agua entre 10 y 60%.

Otra ecuación fue propuesta por Hatscheck para emulsiones altamente concentradas que presentan un comportamiento no-Newtoniano ⁽²⁰⁾:

$$\eta = \eta_0 \left[\frac{1}{1 - \phi^{1/3}} \right]^8 \quad (2.12)$$

Aquí se puede observar que si la fase dispersa es relativamente viscosa, la viscosidad de la emulsión es menor que la de la fase dispersa como es el caso de emulsiones aceite en agua donde la viscosidad de la emulsión es marcadamente menor que la del aceite.

Otra ecuación fue desarrollada para correlacionar la viscosidad de emulsiones no-Newtonianas ⁽²¹⁾. El propósito de esta correlación es tener en cuenta los efectos de la relación de viscosidades, fracción en volumen de la fase dispersa, rata de corte, tamaño y distribución de la gota sobre la viscosidad de la emulsión.

Esta ecuación es aplicable a emulsiones aceite en agua y agua en aceite. Y considera las emulsiones monodispersiones y gotas aproximadamente redondas.

$$\eta_r^{1/KI} = e^{(2.5*\phi/(1-0.71*\phi))} \quad (2.13)$$

$\eta_r = \eta/\eta_c$ Donde η y η_c son las viscosidades de la emulsión y la fase continua respectivamente.

$K = \eta_d/\eta_c$ Es la relación de viscosidades donde η_d viscosidad de la fase dispersa.

Y KI se puede calcular de la siguiente manera: $KI = (K + 0.4)/(K + 1)$

3. FLUJO DE EMULSIONES AGUA EN ACEITE

3.1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE FLUJO DE LAS EMULSIONES

De acuerdo con lo tratado anteriormente el fluido heterogéneo compuesto por una emulsión tiene un comportamiento fuertemente no newtoniano, especialmente si la fracción de la fase dispersa es muy alta. El análisis que sigue a continuación es aplicable a casos en los que la emulsión está en movimiento y adquieren importancia entonces los movimientos convectivos.

Dos problemas surgen de inmediato ante esta circunstancia. El primero es el problema de la determinación de las curvas de esfuerzo velocidad de deformación para determinar la ecuación constitutiva de una emulsión especificada y el segundo es el cálculo de las características fluidodinámicas de la emulsión tales como el factor de fricción ^{(22) (23)}.

En cuanto a la determinación del factor de fricción es necesario recordar la definición de esta característica del flujo que sirve, entre otras cosas para definir la energía que se necesita para transportar un fluido específico por un camino previamente establecido sea este una tubería, un lecho poroso o un conducto de cualquier forma.

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos ⁽¹⁰⁾. Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito. La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo.

Para situaciones de flujo en la cual la asunción de flujo laminar en estado estable y sin deslizamiento en las paredes e independiente del tiempo de las propiedades del fluido es valida, en general las ecuaciones que relacionan la tasa de flujo con el esfuerzo de corte pueden ser obtenidas. Desde estas ecuaciones la tasa de flujo y distribución de velocidad como función de la caída de presión pueden ser derivadas por sustitución de la adecuada ecuación constitutiva relacionando velocidad de deformación y esfuerzo de corte.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS FLUIDOS

Como se definió anteriormente el coeficiente de viscosidad esta dado por $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ Donde η es constante para fluidos newtonianos, pero es una función dependiente $F(\tau, \dot{\gamma})$, para fluidos no newtonianos. Con el deseo de caracterizar estos fluidos existen varios modelos ⁽²⁴⁾. Dos de los más comunes se describen brevemente a continuación ^{(10) (13) (25)}. En ambos casos el coeficiente de viscosidad se despeja en función de la deformación, pero a veces resulta práctico despejarlo en función del esfuerzo de corte.

A. Modelo de Oswald de Waele (ley de potencia)

$$\tau = m\dot{\gamma}^n = m(\dot{\gamma})^{n-1}\dot{\gamma}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = m(\dot{\gamma})^{n-1}$$

$$\tau^{1/n} = m^{1/n}\dot{\gamma}$$

$$\tau^{1/n-1}\tau = m^{1/n}\dot{\gamma}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = m^{1/n}\tau^{-(1/n-1)} = m^{1/n}\tau^{\left(\frac{n-1}{n}\right)}$$

B. Modelo de Bingham (plástico)

$$\tau = \tau_0 + \mu \quad \text{para} \quad \tau > \tau_0$$

$$\gamma = 0 \quad \text{para} \quad \tau < \tau_0$$

$$\eta = \mu + \frac{\tau_0}{\gamma}$$

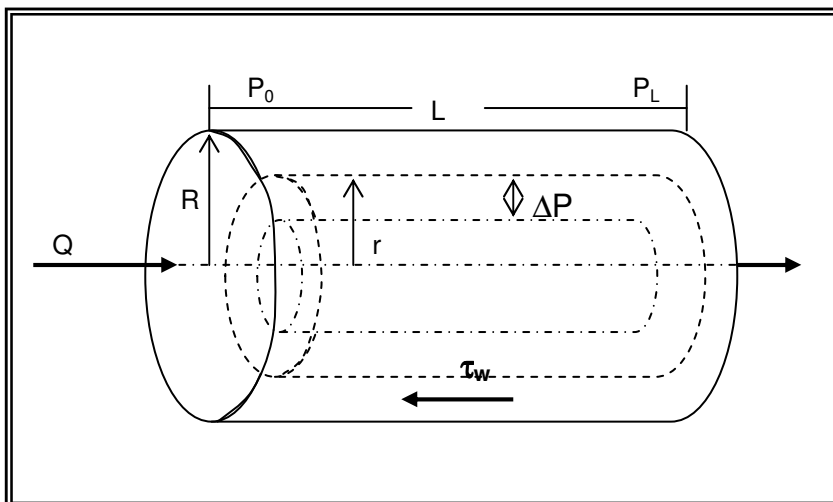
$$\eta = \mu \left(\frac{\tau}{\tau - \tau_0} \right)$$

3.3. CORRELACIONES ENTRE FLUJO Y CAÍDA DE PRESIÓN

Con el objeto de predecir los perfiles de caída de presión ΔP de una emulsión al fluir por tubería, se debe hacer uso de ciertos conceptos de fenómenos de transporte ⁽¹⁹⁾⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾⁽²⁷⁾. Lo que se conoce como ecuaciones de variación, relacionan flujo a través de una tubería dada (caudal Q o velocidad lineal V) de un fluido definido con viscosidad y densidad y con otros parámetros como diámetro, longitud y factor de rugosidad.

El caudal que fluye a través de un elemento anular donde r varía de 0 en el centro hasta R en la pared interna de la tubería se puede definir de la siguiente forma ^{(25) (28)}
Figura 14.

Figura 14. Esquema de flujo desarrollado en tubería



Fuente: César Augusto García. "Efecto de la Concentración del surfactante en la Estabilidad de Emulsiones O/W de crudos pesados". Tesis de grado UIS 2003.

$$dQ = V(2\pi r dr) \quad (3.1)$$

Integrando por partes se obtiene

$$Q = \pi \left(Vr^2 - \int_0^R r^2 dV \right) \quad (3.2)$$

En la pared de la tubería ($r=R$), la velocidad en la dirección del flujo es cero. Por lo tanto la ecuación se reduce a:

$$Q = - \int_0^R r^2 dV \quad (3.3)$$

La deformación γ , para un flujo totalmente desarrollado en régimen laminar es una función del esfuerzo τ .

$$\gamma = - \frac{dV}{dr} = F(\tau) \quad (3.4)$$

El signo (-) se explica, porque dV/dr es negativo ya que V decrece de un valor máximo para $r=0$ a cero para $r=R$ entonces

$$dV = -F(\tau)dr \quad (3.5)$$

Por otra parte se ha definido el esfuerzo de cizalla así:

$$\tau = \frac{r\Delta P}{2L} \quad (3.6)$$

En la pared del tubo ($r=R$)

$$\tau_w = \frac{R\Delta P}{2L} \quad (3.7)$$

Eliminando ΔP de estas ecuaciones obtiene

$$\tau = \tau_w \frac{r}{R} \quad (3.8)$$

De esta ecuación

$$r^2 = \frac{R^2 \tau^2}{\tau_w^2} \quad (3.9), (3.10)$$

$$dr = \frac{R}{\tau_w} d\tau$$

Substituyendo las ecuaciones 3.5, 3.9, 3.10 en la ecuación 3.3

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 F(\tau) d\tau \quad (3.11)$$

Esta ecuación puede ser integrada para los diferentes modelos que caracterizan los fluidos ⁽²⁸⁾:

Fluido newtoniano $\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{4} \frac{\tau_w}{\mu}$ (3.12)

Ley de potencia $\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\tau_w}{m} \right)^{1/n}$ (3.13)

Bingham $\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{\tau_w}{4\mu} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_0}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_0}{\tau_w} \right)^4 \right]$ (3.14)

Cabe aclarar que las ecuaciones obtenidas son aplicables en flujo laminar ⁽²⁵⁾.

Ahora bien la ecuación 3.11 comúnmente se desarrolla para obtener ecuaciones generalizadas, como se explica a continuación ⁽²⁸⁾.

Primero la ecuación se multiplica por τ_w^3 y luego se deriva con respecto a τ_w quedando de la siguiente forma:

$$\frac{Q\tau_w^3}{\pi R^3} = \int_0^{\tau_w} \tau^2 F(\tau) d\tau \quad (3.15)$$

$$\frac{1}{\pi R^3} \left[3Q\tau_w^2 + \tau_w^3 \frac{dQ}{d\tau_w} \right] = \frac{d}{d\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 F(\tau) d\tau \quad (3.16)$$

$$\frac{1}{\pi R^3} \left[3Q\tau_w^2 + \tau_w^3 \frac{dQ}{d\tau_w} \right] = \tau_w^2 F(\tau) \quad (3.17)$$

$$F(\tau) = \gamma_w = \frac{1}{\pi R^3} \left[3Q + \tau_w \frac{dQ}{d\tau_w} \right] = \frac{1}{\pi R^3} \left[3Q + \Delta P \frac{dQ}{d\Delta P} \right] \quad (3.18)$$

La última expresión es la ecuación de Rabinowitsch-Mooney, la cual permite calcular la velocidad de de formación en la pared de la tubería a partir de valores medidos de R, Q y ΔP . La ecuación 3.18 es más conveniente usarla así:

$$\gamma_w = \frac{3}{4} \left(\frac{8V}{D} \right) + \frac{1}{4} \tau_w \frac{d \left(\frac{8V}{D} \right)}{d\tau_w} \quad (3.19)$$

Donde $V = Q/\pi R^3$ y $D = 2R$. Ahora haciendo uso de la siguiente regla de la diferenciación:

$$d \ln x = \frac{1}{x} dx \quad (3.20)$$

$$xd \ln x = dx$$

La ecuación 3.19 queda:

$$\gamma_w = \frac{3}{4} \left(\frac{8V}{D} \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{8V}{D} \right) \frac{d \ln \left(\frac{8V}{D} \right)}{d \ln \tau_w} \quad (3.21)$$

Si ahora introducimos el parámetro n^l , equivalente a:

$$n^l = \frac{d \ln \tau_w}{d \ln \left(\frac{8V}{D} \right)} = \frac{d \log \tau_w}{d \log \left(\frac{8V}{D} \right)} \quad (3.22)$$

La ecuación 3.21 se reduce a:

$$\gamma = \left(\frac{3n^l + 1}{4n^l} \right) \left(\frac{8V}{D} \right) \quad (3.23)$$

El parámetro n^l , es la pendiente de la línea graficada en coordenadas log-log de τ_w versus $8V/D$. No debe confundirse con el índice de flujo del modelo de la ley de potencia. La ecuación 3.22 puede representarse con la ecuación de la línea:

$$\ln \tau_w = n^l \ln \left(\frac{8V}{D} \right) + \ln k^l \quad (3.24)$$

n^l puede variar con $8V/D$ o con τ_w , representando la tangente de la curva en un punto dado. Por otro lado cuando n^l es constante, es útil rescribir la ecuación 3.24 en la forma:

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L} = k^l \left(\frac{8V}{D} \right)^{n^l} \quad (3.25)$$

Comparando la ecuación 3.25 con las ecuaciones 3.12, 3.13 y 3.14 se pueden hallar las interrelaciones entre los parámetros n^l y k^l de las ecuaciones generalizadas, con los parámetros de los modelos que correlacionan reológicamente los fluidos.

Por ejemplo para fluidos newtonianos $n^l = 1$ y $k^l = \mu$; para fluidos caracterizados por la ley de potencia $n^l = n$ y $k^l = \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n m$

3.4. FACTOR DE FRICCIÓN Y NÚMERO DE REYNOLDS

El fluido ejerce sobre las superficies sólidas una fuerza F , que puede dividirse en dos F_S , la fuerza que ejercería el fluido aunque estuviese en reposo y F_K , la fuerza adicional relacionada con el comportamiento cinético del fluido ⁽²⁵⁾. El valor de F_K puede expresarse, como el producto de un área característica A , una energía cinética por unidad de volumen K y un número adimensional f , denominado factor de fricción: $F_K = AKf$

Para flujo en una tubería, generalmente se toma para A la superficie mojada y para K la magnitud $(\rho V^2/2)$. Para tubos circulares de radio R y longitud L , F_K esta definido por:

$$F_K = (2\pi RL) \left(\frac{\rho V^2}{2} \right) f \quad (3.26)$$

De otro lado, aplicando un balance de fuerza al fluido entre 0 y L en la dirección del flujo, cuando este está totalmente desarrollado se obtiene:

$$F_k = [(P_0 - P_L) + \rho g(h_0 - h_L)]\pi R^2 = (P_0 - P_L)\pi R^2 \quad (3.27)$$

Donde $P = p + \rho gh$. Por igualación de las ecuaciones 3.26 y 3.27 se obtiene la definición clásica de factor de fricción ⁽²⁸⁾

$$f = \frac{1}{4} \left(\frac{D}{L} \right) \left(\frac{P_0 - P_L}{\frac{1}{2} \rho V^2} \right) = \frac{D\Delta P/4L}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3.28)$$

El factor de fricción se ha definido en función del número adimensional de Reynolds (N_{Re}), el cual nos da una idea del régimen de flujo (laminar o turbulento). Para flujo laminar de un fluido newtoniano puede ser equivalente a $f = 16 / N_{Re}$ donde $N_{Re} = DV\rho/\mu$. Este número puede hallarse igualmente para los diferentes fluidos no newtonianos y para la ecuación generalizada de flujo. Por ejemplo:

Ley de potencia

$$f = \left[\frac{16}{8 \left(\frac{D^n V^{2-n} \rho}{m} \right) \left(\frac{n}{6n+2} \right)^n} \right] \quad (3.29)$$

$$N_{Re} = 8 \left(\frac{D^n V^{2-n} \rho}{m} \right) \left(\frac{n}{6n+2} \right)^n \quad (3.30)$$

Ecuación generalizada de flujo

$$f = \frac{k^l \left(\frac{8V}{D} \right)^{n^l}}{\rho V^2} = \frac{64k^l 8^{n^l-1}}{D^{n^l} V^{2-n^l} \rho} = \frac{64}{N_{Re}^l} \quad (3.31)$$

$$N_{Re}^l = \frac{D^{n^l} V^{2-n^l} \rho}{8^{n^l} k^l} \quad (3.32)$$

Una cuestión que ha sido muy estudiada es ¿Cuándo el flujo es laminar? En el caso de fluidos newtonianos se ha determinado el valor empírico del número de Reynolds de 2100, bajo el cual el flujo es laminar. Para fluidos no newtonianos se ha encontrado que el número de Reynolds generalizado se incrementa ligeramente con el aumento de n^l . De esta manera algunos autores han sugerido que la transición de flujo laminar a flujo turbulento se encuentra en $0.38 < n^l < 1$, lo que indica $2100 < N_{Re} < 3100$.

Una vez desarrollado el régimen turbulento Dodge y Metzner ^{(29) (30) (31)} aconsejan la siguiente correlación para parámetros generalizados

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{4}{(n')^{0.75}} \log \left[N_{Re} f^{1-n'/2} \right] - \frac{0.4}{(n')^{1.2}} \quad (3.33)$$

3.5. ESTIMACIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS CON EMULSIONES AGUA EN ACEITE

Uno de los campos de acción de la tecnología de emulsiones es su transporte, esto implica además de establecer parámetros de formulación y formación seleccionar condiciones fluidodinámicas ^{(26) (32) (33)}.

En vista del comportamiento no-newtoniano de la mezcla agua y aceite de las emulsiones, la determinación de la caída de presión no puede ser hecha por los métodos convencionales porque se pueden derivar resultados erróneos.

3.5.1. Método de Metzner y Reed ⁽³⁴⁾

El método propuesto por Metzner y Reed está idealmente diseñado para caracterizar reológicamente la emulsión sin necesidad de los aparatos de laboratorio Dodge y Metzner y más tarde Metzner y Reed desarrollaron algunas correlaciones para manejar este tipo de fluidos; en estas se considera que las emulsiones están regidas por la ley de potencia.

Ellos utilizaron el número de Reynolds generalizado, al que llamaron número de Reynolds de Metzner y Reed (Re_{MR}); y este en unidades que se manejan en la industria está dado por:

$$\text{Re}_{MR} = \frac{\gamma \rho V^{2-n} (0.0254D)^n}{mA_n * 10^{-3}} \quad (3.34)$$

γ Gravedad específica

ρ Densidad del agua $(1000 \text{Kg} / \text{m}^3)$

V Velocidad (m/s) $v = 3.6278 * Q / d^2$

Q Caudal (1000bld)

D Diámetro interno (pulg.)

m Coeficiente de la ley de potencia (cp)

n Índice de comportamiento de flujo

En forma más simplificada se puede expresar el número de Reynolds de Metzner y Reed de la siguiente forma:

$$\text{Re}_{MR} = MQ^{2-n} D^{3n-4} / m \quad (3.35)$$

donde

$$M = \frac{13.161 * 10^6 * 0.007^n * \gamma}{A_n} \quad (3.36)$$

$$A_n = 8^{n-1} ((1 + 3n) / 4n)^n \quad (3.37)$$

- **Determinación de la caída de presión**

La caída de presión en psi/Km esta dada por la ecuación de Fanning

$$\Delta P = \frac{4f\rho V^2}{2gD} \quad (3.38)$$

O en unidades de campo:

$$\Delta P = \frac{150 * 10^3 * \gamma * f * Q^2}{D^5} \quad (3.39)$$

Donde f se determina así:

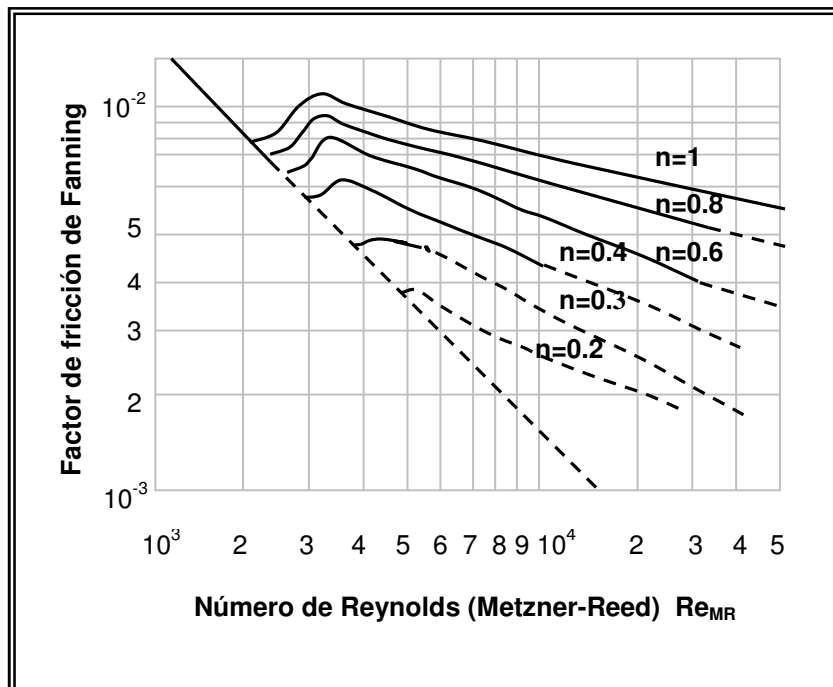
$$f = 16 / \text{Re}_{MR} \quad (3.40)$$

si el régimen es laminar.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{4}{(n')^{0.75}} \log \left[N_{\text{Re}} f^{1-n'/2} \right] - \frac{0.4}{(n')^{1.2}} \quad (3.41)$$

Si el régimen es turbulento; esta ecuación también se encuentra expresada en forma grafica, en la cual el factor de fricción esta correlacionado con el número de Reynolds modificado por Metzner-Reed.

Figura 15. Factor de fricción



- **Determinación de las propiedades reológicas**

En ausencia de datos de laboratorio, las propiedades reológicas m y n pueden ser determinadas con datos de producción, considerando régimen laminar y combinando las ecuaciones (3.36), (3.39) y (3.40) se obtiene que:

$$\Delta P = BmQ^n \quad (3.42)$$

Es decir

$$\ln(\Delta P) = n\ln(Q) + \ln(mB) \quad (3.43)$$

donde

$$B = 0.182A_n / 0.007^n D^{1+3n} \quad (3.44)$$

Entonces m y n pueden ser determinados al graficar en forma logarítmica ΔP Vs. Q .

Ahora se pueden calcular esfuerzos de corte y velocidades de deformación para elaborar el reograma del fluido.

$$\tau = D * \Delta P / 4L \quad (3.45)$$

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (3.46)$$

3.5.2. Otros métodos ⁽³⁵⁾

Para el flujo laminar de fluidos newtonianos, la solución exacta para las pérdidas de fricción consiste esencialmente en resolver la ecuación de momento y energía para una correspondiente geometría.

Para los fluidos no newtonianos existen métodos aproximados para el cálculo de las pérdidas por fricción:

- Kozicki y colaboradores (1966)

Propusieron un método para predecir estas características hidráulicas

$$f = \frac{16}{\text{Re}^*} \quad (3.47)$$

$$\text{Re}^* = \frac{V^{2-n} D^n \rho}{m \left[\frac{a + bn}{n} \right]^n 2^{3(n-1)}} \quad (3.48)$$

En esta ecuación a y b son parámetros relacionados con la geometría. Para tubos circulares a = 1/4 y b = 3/4

- Miller (1972)

Publico un método simple para calcular estas características de la ley de potencia para fluidos en tubos no circulares. Este autor asume que es razonable escribir para cualquier geometría que:

$$\tau_w = m \left(\frac{3n + 1}{4n} \right) \gamma^n \quad (3.49)$$

donde τ_w es el esfuerzo de corte

$$\tau_w = \frac{D\Delta P}{4L} \quad (3.50)$$

y γ es la rata de corte calculada con poiseuille según la correspondiente geometría en consideración

$$\gamma = \frac{8V}{D} \frac{f \text{ Re}}{16} = \frac{8V}{D} (a + b) \quad (3.51)$$

- Delplace y Leuliet (1995)

Postularon que los parámetros a y b de Kozicki se pueden relacionar por la expresión

$$\frac{b}{a} = \frac{24}{\zeta} \quad (3.52)$$

donde

$$\zeta = 8(a + b) = \frac{1}{2} f \text{ Re} \quad (3.53)$$

Más tarde estos autores definieron un nuevo número de Reynolds generalizado

$$\text{Re}_g = \frac{V^{2-n} D^n \rho}{m \left[\frac{24n + \zeta}{(24 + \zeta)n} \right]^n \zeta^{n-1}} \quad (3.54)$$

Haciendo uso de esta definición el factor de fricción se puede expresar así:

$$\frac{1}{2} f \text{ Re}_g = \zeta \quad (3.55)$$

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y MODELO

Los estudios del transporte de emulsiones tienen como objetivo principal, predecir los perfiles de caída de presión de una emulsión previamente caracterizada al fluir en tuberías, optimizando el consumo de energía.

Para un sistema de transporte debe tenerse en cuenta principalmente la tubería para cuya selección es importante considerar la temperatura y presión de operación, la corrosión y el costo del material; el sistema de impulsión que está en relación directa con la altura que se tenga que elevar el fluido, con la presión requerida en la entrega, con la longitud y diámetro del tubo, con la velocidad del flujo y con las propiedades físicas del fluido, particularmente la viscosidad y la densidad y los aparatos de medición teniendo en cuenta que los principales parámetros que tienen que ser medidos son: caudal, presión y temperatura del fluido.

En este proyecto se pretende, sin hacer uso de ningún estudio de laboratorio determinar las propiedades reológicas de la emulsión que se puede presentar en una línea de flujo; estimar la viscosidad de la emulsión, la caída de presión precisa y entonces determinar la pérdida de energía que tiene el flujo de emulsiones y poder calcular la potencia necesaria de bombeo.

4.1. ELABORACIÓN DEL ALGORITMO

Hemos visto algunas de las formas de comportamiento “no ideal” que muestran las emulsiones, por ello los métodos de diseño para el flujo de estas son complejos. En el siguiente procedimiento se describirá las técnicas usadas para medir los parámetros reológicos más significativos y que son requeridos en las ecuaciones presentadas aquí.

El siguiente es el procedimiento para determinar la caída de presión que se presenta en líneas que transportan emulsiones agua en aceite de acuerdo con datos de producción obtenidos de campo.

Sean n registros de producción.

En cada registro se tienen parámetros de hidráulica: caudal, caída de presión, además datos de la tubería como diámetro, longitud y también se tienen datos de algunas propiedades del crudo.

1. Para cada línea

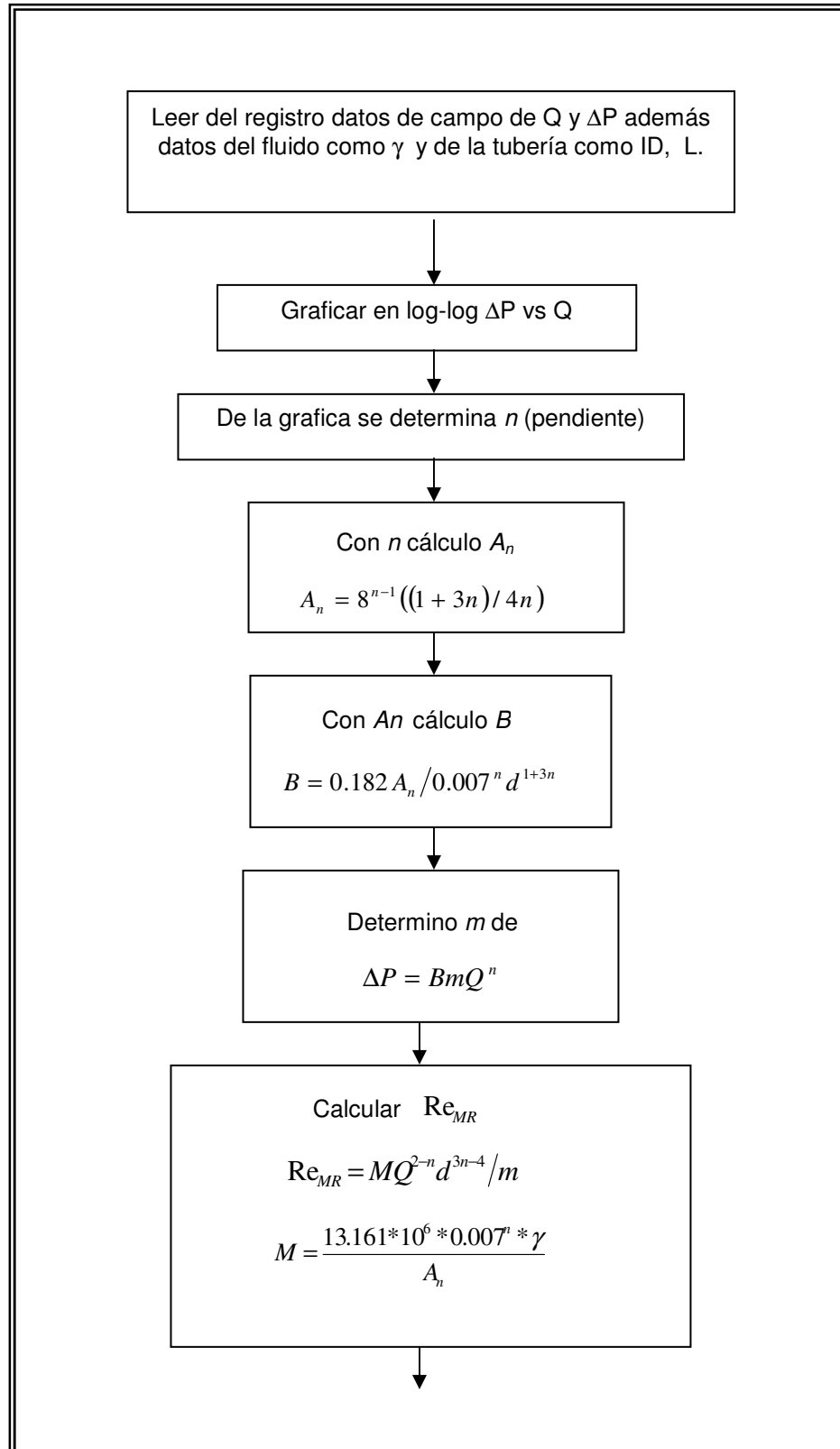
- a. Lea el registro.
- b. Determine las propiedades necesarias.
- c. Graficar en log-log ΔP vs. Q
- d. De la grafica se determina n y m
- e. Ahora ya se ha caracterizado el fluido y se puede calcular Re_{MR}
- f. Reporte el tipo de flujo.
- g. Determinar f
- h. Calcular nuevos ΔP
- i. Calcular esfuerzos de corte, velocidades de deformación
- j. Graficar reogramas.
- k. Calcular viscosidades aparentes.
- l. Graficar comportamiento reológico.

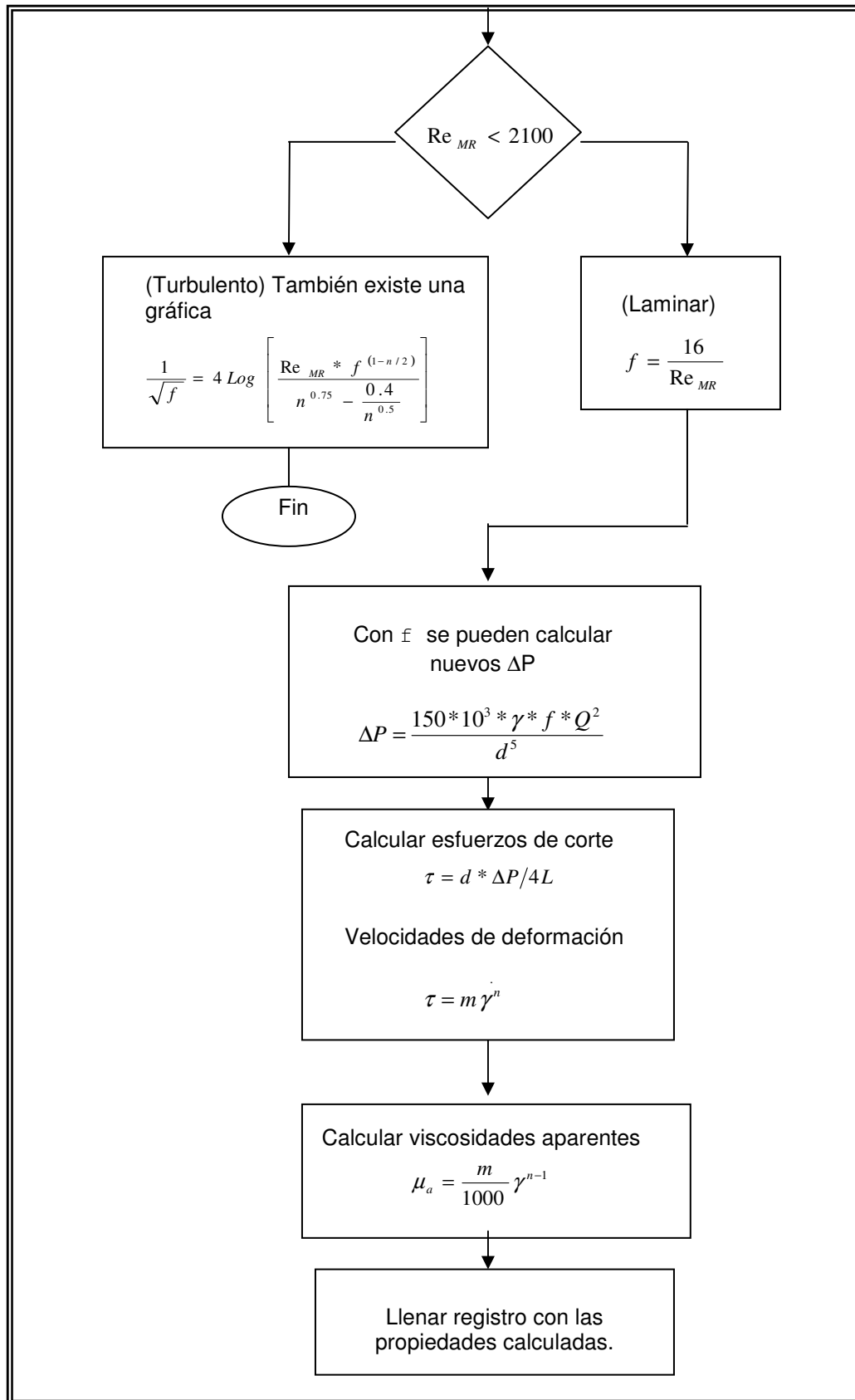
2. Llene el registro de propiedades calculadas y grafique los resultados.

3. Fin.

El anterior procedimiento se presenta de manera más detallada en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 16. Diagrama de flujo





Fuente: El autor

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

4.2.1. Datos de entrada

El programa facilita la entrada de datos y permite hacer el cálculo rápidamente. El mismo procedimiento realizado manualmente con uso de tablas, fórmulas y gráficos puede llevar mucho más tiempo a una persona acostumbrada a estos cálculos.

El programa permite la realización del cálculo sin necesidad de consultar cualquier otra fuente de información. Pero deja abierta la posibilidad de entrada de valores de esas otras fuentes.

4.2.2. Resultados

Presenta los siguientes resultados numéricos: viscosidad de la emulsión, caracterización reológica del fluido (índice de consistencia e índice de flujo); además presenta en forma de tablas cálculos de caídas de presión, regímenes de flujo, esfuerzos de corte velocidades de deformación y viscosidades aparentes.

4.2.3. Gráfico

Además de registrar en forma de tablas estos cálculos el programa muestra también en forma gráfica algunos de estos (reogramas y comportamiento de flujo).

4.3. METODOLOGIA USADA Y PRESENTACIÓN

El programa contiene un módulo principal pequeño. En el módulo principal se llama secuencialmente a diversos módulos secundarios, que fueron preparados para resolver las distintas partes del cálculo. El programa está limitado en su uso a fluidos de la ley de potencia.

La herramienta fue construida en la edición para aplicaciones del sistema de programación de Visual Basic, incluida en Microsoft Excel; y consta de 4 ventanas.

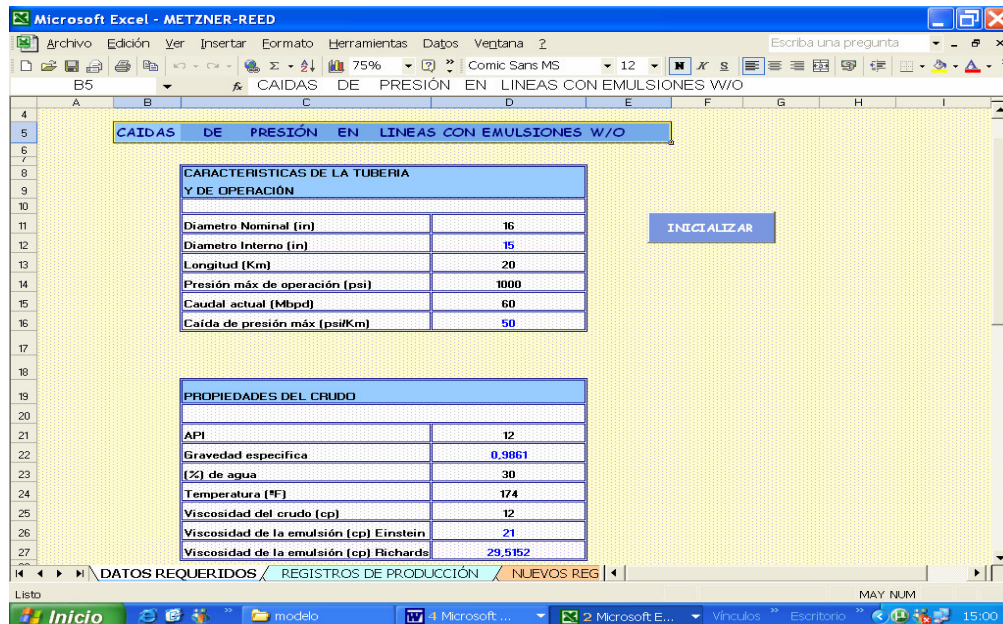
4.3.1. Ventana 1. Datos Requeridos

Esta ventana permite introducir y calcular algunos datos relativos al fluido: Gravedad API, gravedad específica, corte de agua, viscosidad del crudo, viscosidad de la emulsión, temperatura.

También en esta se presentan los datos relativos al sistema físico: Diámetro y longitud de la tubería, presión máxima de operación y caudal actual

El botón inicializar que se encuentra en esta ventana permite borrar los datos, para realizar nuevos cálculos.

Figura 17. Ventana 1. Datos Requeridos



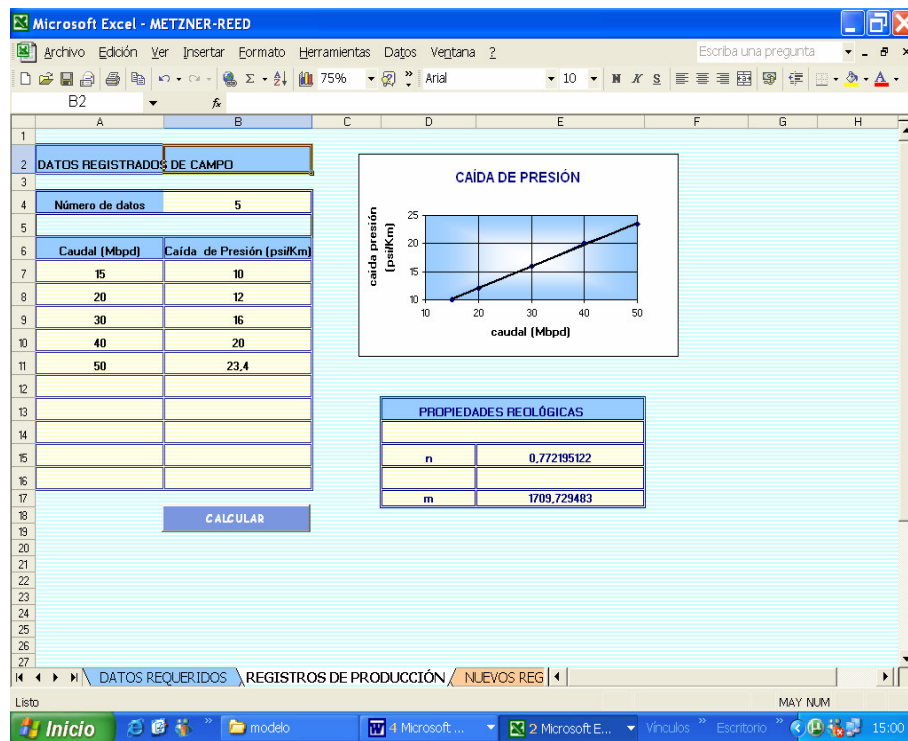
Fuente: El autor

4.3.2. Ventana 2. Registros de producción.

En esta ventana se registran los datos de producción de diferentes caudales y caídas de presión con los cuales se hará la caracterización reológica del fluido; estos datos son tabulados y también presentados en forma grafica.

El botón calcular que se encuentra en esta ventana muestra los parámetros reológicos del fluido calculados (índice de comportamiento de flujo n y consistencia m)

Figura 18. Ventana 2. Registros de Producción



Fuente: El autor

4.3.3. Ventana 3. Nuevos Registros de Producción.

En esta ventana se reportan los nuevos datos de producción calculados a diferentes caudales; en ella la herramienta describe el régimen de flujo para cada caudal y se

calculan nuevas caídas de presión si; además se reportan el número de Reynolds y el factor de fricción para cada caso.

Figura 19. Ventana. Nuevos Registros de Producción

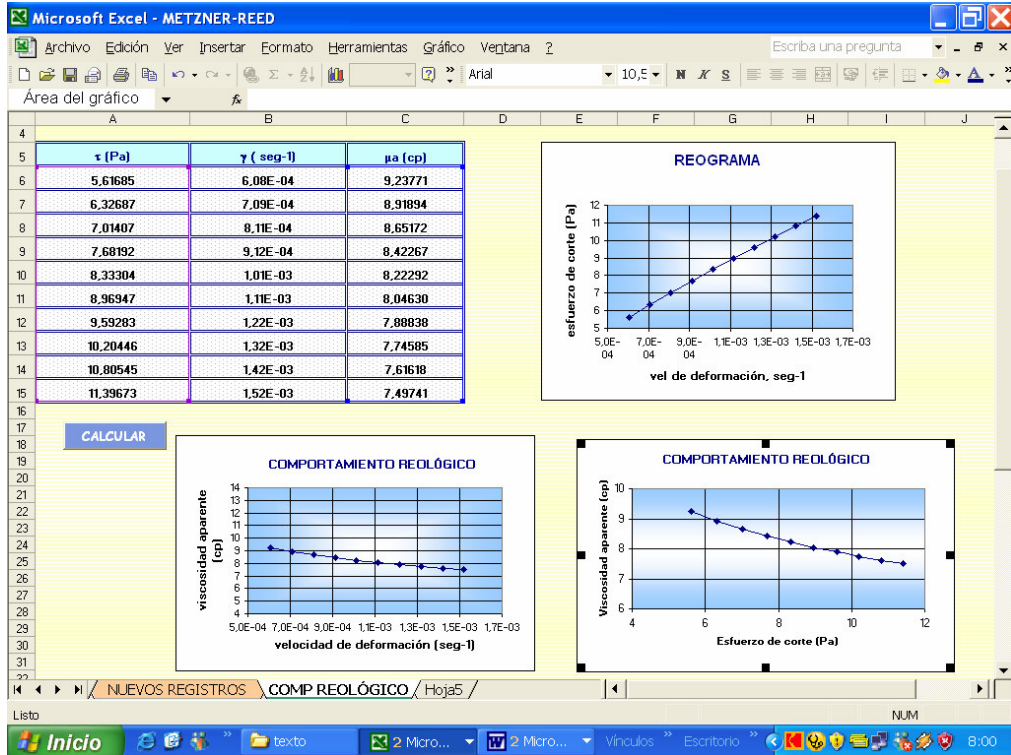
Q (Mbbpd)	Re	Regimen	f	ΔP (psi/Km)
60	399,4837	LAMINAR	0,0401	28,08426
70	482,7215	LAMINAR	0,0331	31,63435
80	568,7213	LAMINAR	0,0281	35,07034
90	657,2109	LAMINAR	0,0243	38,40959
100	747,9732	LAMINAR	0,0214	41,66520
110	840,8300	LAMINAR	0,0190	44,84734
120	935,6322	LAMINAR	0,0171	47,96416
130	1032,2532	LAMINAR	0,0155	51,02229
140	1130,583809	LAMINAR	0,0142	54,02724
150	1230,528718	LAMINAR	0,0130	56,98365

Fuente: El autor

4.3.4. Ventana 4. Comportamiento Reológico.

Esta ventana muestra los datos obtenidos y las graficas correspondientes que identifican el comportamiento reológico de la emulsión: las velocidades de deformación, esfuerzos de corte y viscosidades aparentes calculadas por la herramienta.

Figura 20. Ventana 4. Comportamiento Reológico



Fuente: El autor

5. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Esta herramienta fue desarrollada bajo los criterios de caracterización reológica de emulsiones agua en aceite siguiendo el método de Metzner y Reed. Para la aplicación de su metodología se corrieron en la herramienta ejercicios encontrados en la literatura. Además se cargaron los datos correspondientes al registro de producción del campo GALA.

5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS EMPLEADOS EN LA VALIDACIÓN

Los datos tomados de la literatura para validar la herramienta corresponden a valores experimentales de caída de presión para el crudo Tía Juana y se muestran en la figura 21; las propiedades del crudo y las condiciones de operación de la tubería se registran en las tablas 1 y 2.

Los otros datos empleados en la validación son datos de producción del campo GALA, el ejemplo que aquí se muestra corresponde a uno de sus pozos al que llamaremos Pozo A, tomados en el periodo comprendido entre enero de 2005 y enero de 2006, estos se muestran en las tablas 2 y 3 y en la figura 22.

Tabla 1. Propiedades del crudo Tía Juana

PROPIEDADES DEL CRUDO	
API	12
Gravedad específica	0,9861
(%) de agua	30
Temperatura (°F)	174

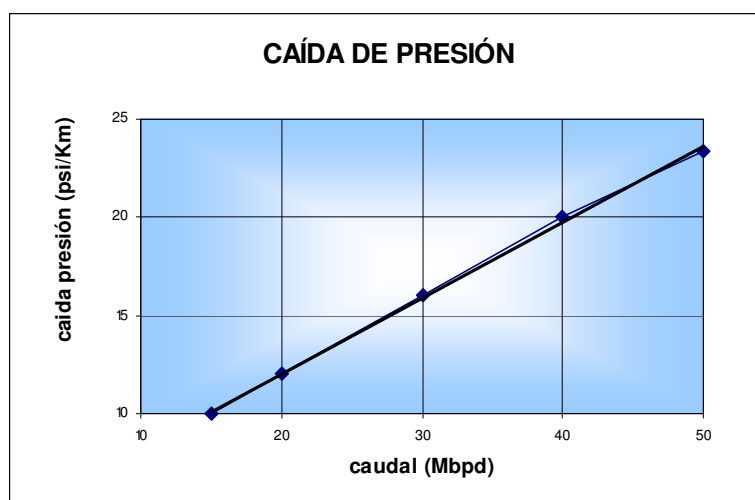
Fuente: WIRASINGHE, Errol: **Estimating Pressure Drop for Water Oil Emulsion**. Paper Oil & Gas Journal.

Tabla 2. Características de operación

CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERIA Y DE OPERACIÓN	
Diámetro Nominal (in)	16
Diámetro Interno (in)	15
Longitud (Km)	20
Presión máx. de operación (psi)	1000
Caudal actual (Mbdp)	60
Caída de presión máx. (psi/Km)	50

Fuente: WIRASINGHE, Errol: **Estimating Pressure Drop for Water Oil Emulsion**. Paper Oil & Gas Journal.

Figura 21. Caída de Presión Tía Juana



Fuente: WIRASINGHE, Errol: **Estimating Pressure Drop for Water Oil Emulsion**. Paper Oil & Gas Journal.

Tabla 3. Propiedades del crudo GALA, Pozo A

PROPIEDADES DEL CRUDO	
API	20.5
Gravedad específica	0,9309
(%) de agua	61
Temperatura (°F)	104.75

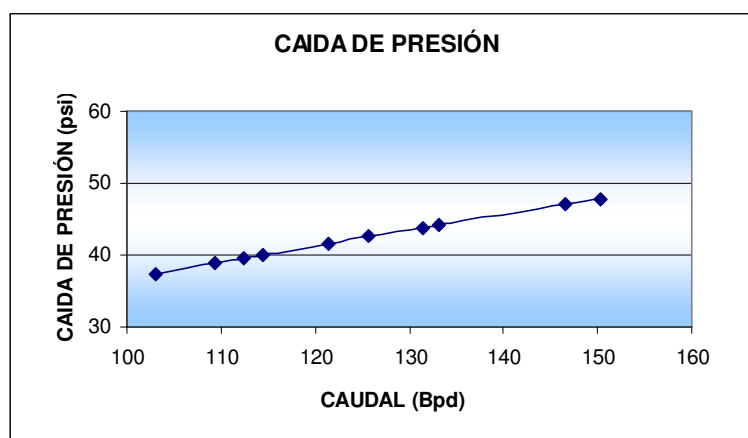
Fuente: ECOPETROL S.A.

Tabla 4. Características de operación

CARACTERÍSTICAS DE LA TUBERÍA Y DE OPERACIÓN	
Diámetro Nominal (in)	3
Longitud (Km)	14.4
Caudal actual (feb-06) (Bpd)	131.43

Fuente: ECOPETROL S.A.

Figura 22. Caída de Presión GALA, Pozo A



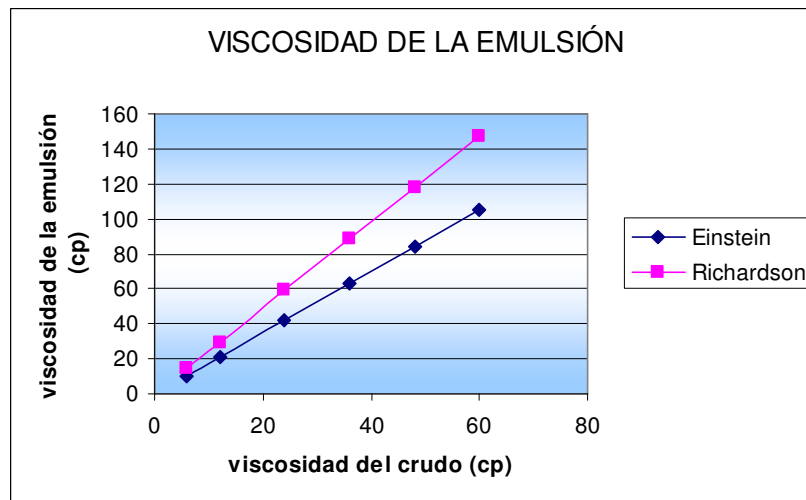
Fuente: ECOPETROL S.A.

5.2. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LOS DATOS TOMADOS DE LA LITERATURA

5.2.1. Efecto de la viscosidad del crudo

Obviamente, hay diferencias en las viscosidades de las emulsiones basadas en diversos aceites, pues hay diferencias en las viscosidades de estos. A altas temperaturas aceites de alto peso molecular son los más viscosos y así son sus emulsiones.

Figura 23. Viscosidad de la emulsión vs. Viscosidad del crudo

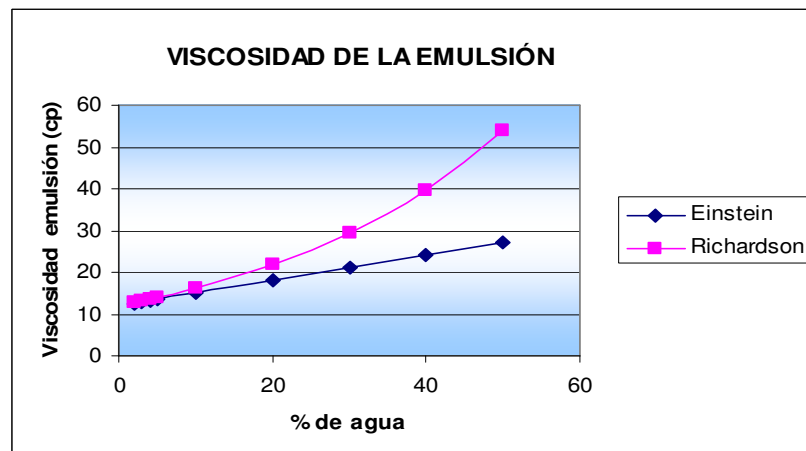


Fuente: El autor

5.2.2. Efecto del corte de agua

Un aumento en la concentración del agua da lugar generalmente siempre a una viscosidad más alta. Una viscosidad más alta significa caídas de presión más altas en el régimen laminar del flujo, pero puede tener poco o nada de efecto en régimen turbulento del flujo. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento pseudoplástico de las emulsiones evaluadas donde el carácter no newtoniano y la viscosidad aparente se incrementa con el aumento de la fase dispersa.

Figura 24. Viscosidad de la emulsión vs. % de agua



Fuente: El autor

5.2.3. Comportamiento Reológico

Las propiedades de flujo de las emulsiones son de mucho interés en muchas aplicaciones de la industria, por ejemplo en la elección de equipo de mezcla y los requerimientos de potencia para la producción de las emulsiones dependen de la reología de la emulsión. La predicción del comportamiento del transporte de emulsiones a través de tuberías requiere un conocimiento de variaciones posibles de la viscosidad con el esfuerzo de corte.

Los parámetros reológicos calculados se reportan en las tablas 3 y 4. Los datos muestran que el modelo de la ley de potencia es aplicable como modelo reológico para la emulsión evaluada.

Tabla 5. Parámetros Reológicos

PARÁMETROS REOLOGICOS	
n	0.772195
m	1709,729483

Fuente: El autor

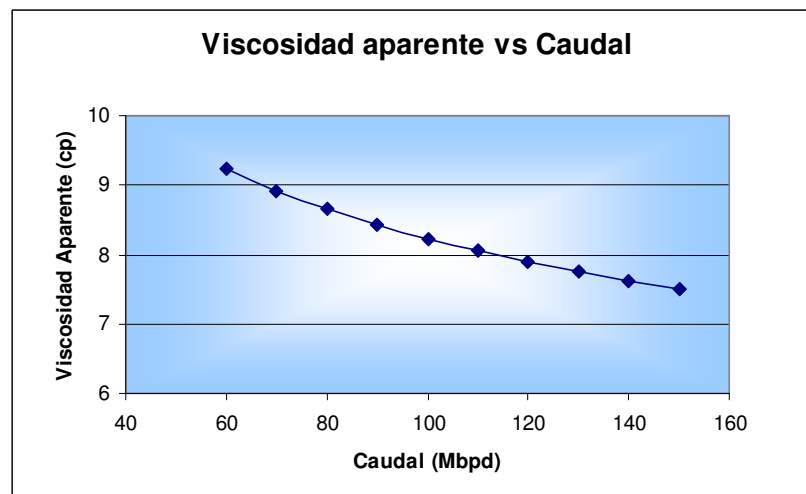
Tabla 6. Parámetros reológicos calculados

τ (Pa)	γ (seg-1)	μ_a (cp)
5,61685	6,08E-04	9,23771
6,32687	7,09E-04	8,91894
7,01407	8,11E-04	8,65172
7,68192	9,12E-04	8,42267
8,33304	1,01E-03	8,22292
8,96947	1,11E-03	8,04630
9,59283	1,22E-03	7,88838
10,20446	1,32E-03	7,74585
10,80545	1,42E-03	7,61618
11,39673	1,52E-03	7,49741

Fuente: El autor

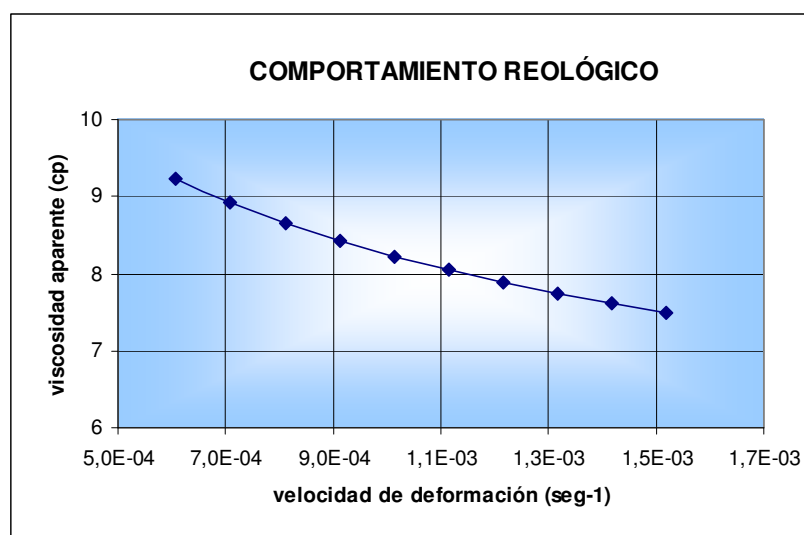
De estos datos se observa que la emulsión se comporta como un fluido pseudoplástico con un índice de flujo menor a la unidad. Lo cual permite que la viscosidad disminuya con el aumento en la velocidad de deformación, del esfuerzo de corte y aumento del caudal figuras 24,25 y 26.

Figura 25. Comportamiento de la viscosidad con el caudal



Fuente: El autor

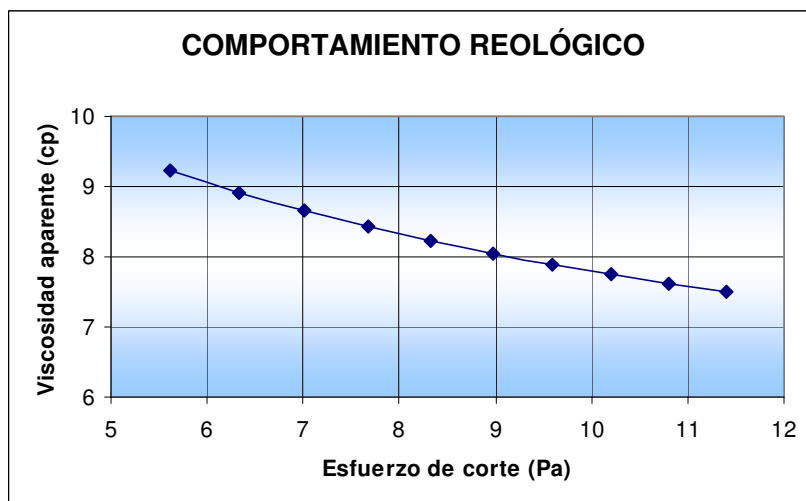
Figura 26. Comportamiento Reológico de la emulsión



Fuente: El autor

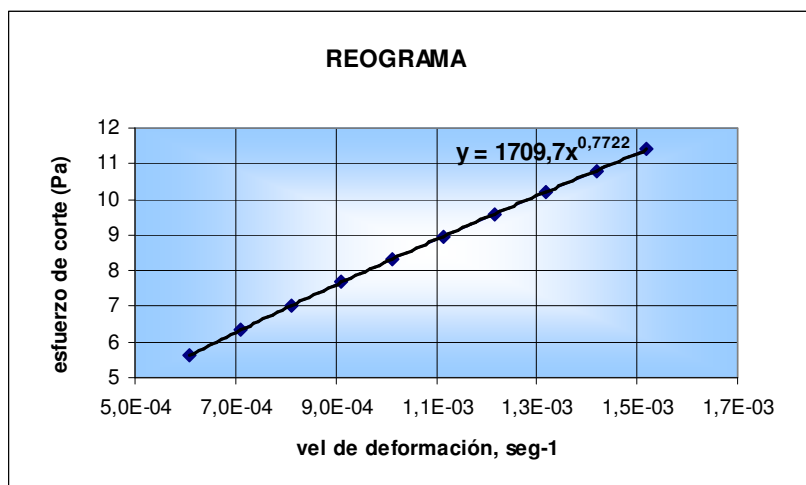
Con los datos reales de producción del campo se hizo la caracterización reológica de la emulsión y se construyó el respectivo reograma.

Figura 27. Comportamiento Reológico de la emulsión



Fuente: El autor

Figura 28. Reograma



Fuente: El autor

Del reograma se observa que la emulsión tratada esta realmente representada por el modelo Ostwald-de Waele; es decir cumple con la ley de potencia.

5.2.4. Caídas de Presión

En la tabla 7 se registran las caídas de presión calculadas para diferentes tasas de flujo. Los cálculos demostraron que incluso con caudales más altos que el actual, se estaba en conformidad con el régimen laminar del flujo. Puesto que las dimensiones del sistema de flujo no fueron variadas, debemos esperar que la viscosidad sea proporcional a la caída de presión $\Delta P/Q$ como se observa en la figura 29.

Tabla 7. Parámetros fluidodinámicos calculados

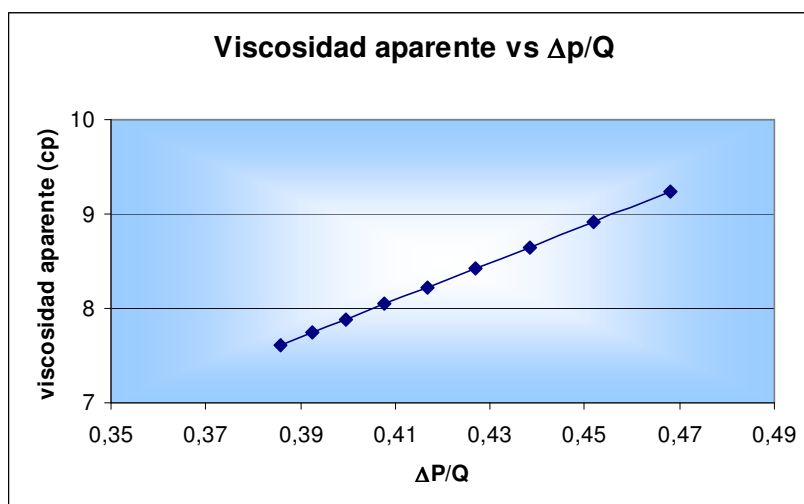
Q (Mbpd)	Re	Regimen	f	$\Delta P(\text{psi/Km})$
60	399,4837	LAMINAR	0,0401	28,08426
70	482,7215	LAMINAR	0,0331	31,63435
80	568,7213	LAMINAR	0,0281	35,07034
90	657,2109	LAMINAR	0,0243	38,40959
100	747,9732	LAMINAR	0,0214	41,66520
110	840,8300	LAMINAR	0,0190	44,84734
120	935,6322	LAMINAR	0,0171	47,96416
130	1032,2532	LAMINAR	0,0155	51,02229
140	1130,583809	LAMINAR	0,0142	54,02724
150	1230,528718	LAMINAR	0,0130	56,98365

Fuente: El autor

De los cálculos hechos luego de caracterizar el fluido se puede observar que se puede bombear más crudo, puesto que las condiciones de operación permiten una caída de presión mayor a la opera el sistema.

Las caídas de presión para un tramo recto de tubería para el flujo de emulsiones pueden ser estimadas hasta con un error del 8% a partir de sus reogramas.

Figura 29. Comportamiento de la viscosidad con la caída de presión/caudal



Fuente: El autor

5.3. ANALISIS DE RESULTADOS PARA LOS DATOS DE GALA, Pozo A

5.3.1. Comportamiento Reológico

De los datos obtenidos para este crudo se observa que al igual que el crudo Tía Juana tiene un comportamiento no newtoniano regido por la ley de potencia. El comportamiento pseudoplástico de este se puede observar en los datos obtenidos de índice de flujo el cual es menor que la unidad (tabla 8) ; y en el comportamiento de la viscosidad con respecto a los diferentes parámetros reológicos y de flujo que se observa en las figuras 30, 31 y 32.

Tabla 8. Parámetros Reológicos

PARÁMETROS REOLOGICOS	
n	0,2356
m	648,6176

Fuente: El autor

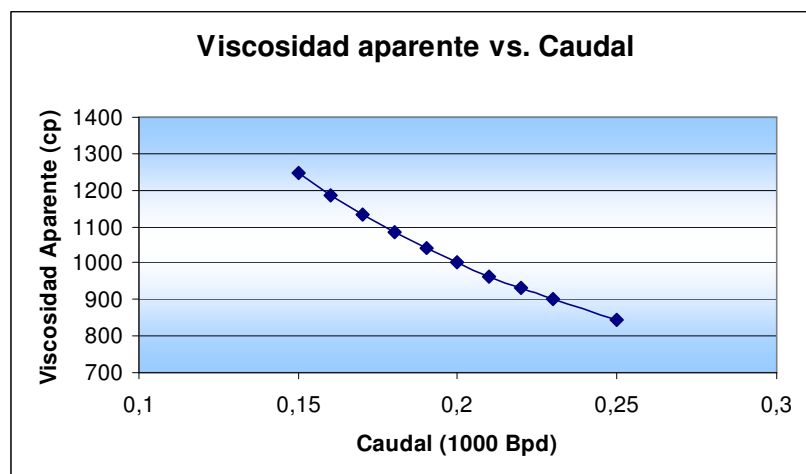
Tabla 9. Parámetros Reológicos

τ (Pa)	γ (seg-1)	μ_a (cp)
0,43920	3,52E-14	1246,65224
0,44593	3,76E-14	1186,64197
0,45235	3,99E-14	1132,90483
0,45848	4,23E-14	1084,47082
0,46436	4,46E-14	1040,56337
0,47000	4,70E-14	1000,55298
0,47543	4,93E-14	963,92366
0,48067	5,17E-14	930,24820
0,48573	5,40E-14	899,16970
0,49537	5,87E-14	843,64644

Fuente: El autor

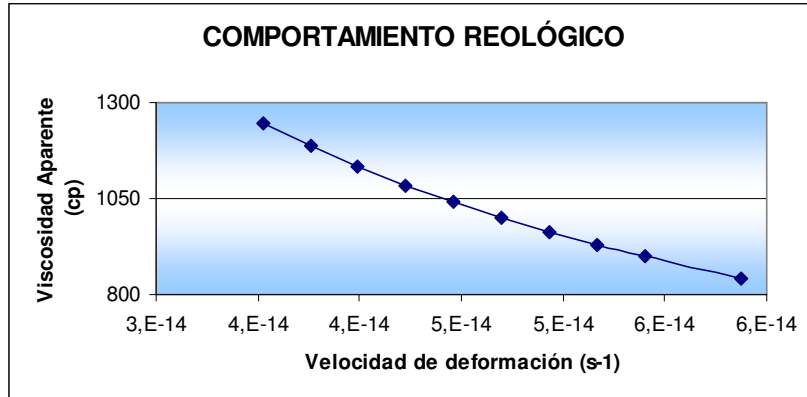
De todo esto se observa que es posible definir el modelo reológico de las emulsiones a partir de datos de caída de presión y posteriormente determinar la viscosidad en función de la velocidad de deformación.

Figura 30. Comportamiento de la viscosidad con el caudal



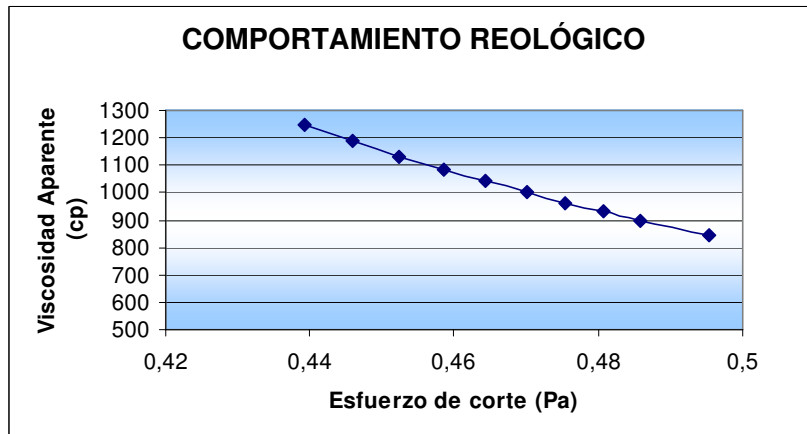
Fuente: El autor

Figura 31. Comportamiento Reológico de la emulsión



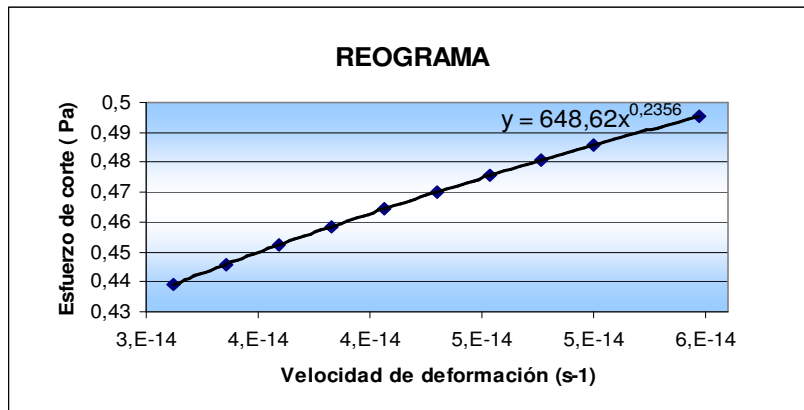
Fuente: El autor

Figura 32. Comportamiento Reológico de la emulsión



Fuente: El autor

Figura 33. Reograma



Fuente: El autor

5.3.2. Caída de Presión

Los cálculos se hicieron variando tasas de flujo para obtener nuevas caídas de presión, estos resultados se muestran en la tabla 10.

Los resultados que muestran el aumento de la caída de presión con el aumento del porcentaje de agua en la emulsión se corroboran con los datos de campo donde en el periodo de marzo de 2005 a febrero de 2006 aumento el corte de agua de 50 a 61.2% y también se presentó un aumento en la caída de presión necesaria para desplazar el fluido.

Tabla 10. Parámetros fluidodinámicos calculados

Q (Bpd)	Re	Régimen	f	$\Delta P(\text{psi/Km})$
150	21,9313	LAMINAR	0,7296	8,43269
160	24,5764	LAMINAR	0,6510	8,56188
170	27,3510	LAMINAR	0,5850	8,68504
180	30,2533	LAMINAR	0,5289	8,80278
190	33,2815	LAMINAR	0,4807	8,91562
200	36,4341	LAMINAR	0,4391	9,02401
210	39,7095	LAMINAR	0,4029	9,12833
220	43,1064	LAMINAR	0,3712	9,22892
230	46,6234	LAMINAR	0,3432	9,32608
250	54,0129	LAMINAR	0,2962	9,51108

Fuente: El autor

CONCLUSIONES

Se obtuvo una herramienta valiosa para hacer el diseño de tuberías que transportan emulsiones; con la teoría se formulo un modelo matemático que permite simular el flujo de las emulsiones considerando estas como un fluido no newtoniano, a condiciones diferentes (caudales, temperaturas, tubería, etc.) y se observo al comparar con datos experimentales que los resultados obtenidos con esta herramienta representan el comportamiento de campo.

Como resultado de este estudio, se generó una metodología práctica para el estudio del transporte de emulsiones agua en aceite por tuberías, utilizando datos del comportamiento reológico, a partir de datos de producción disponibles en todo campo. Esta metodología constituye una guía que permite determinar, caídas de presión y capacidades de equipos para el manejo de emulsiones.

Se pudo observar la relación de proporcionalidad entre la viscosidad de la emulsión y la viscosidad del aceite. Aceites de alto peso molecular son los más viscosos y así son sus emulsiones.

En general la influencia del corte de agua en la viscosidad de la emulsión para un aceite dado, temperatura y esfuerzo de corte fue encontrada y representada bien por la ecuación exponencial de Richardson. Como una relación lineal entre el logaritmo de la viscosidad relativa y el corte de agua. A bajos cortes de agua (<30% volumen) la viscosidad muestra un moderado incremento en forma lineal con el corte de agua. A altos cortes de agua hay más interacción entre las gotas por lo tanto aumenta más rápidamente la viscosidad.

La viscosidad de las emulsiones agua en aceite es mayor que la del petróleo crudo, se ha demostrado que el uso de métodos convencionales para estimar la capacidad de tuberías existentes o para diseñar tuberías nuevas es erróneo y da lugar a inversiones innecesarias.

De acuerdo a los reogramas obtenidos experimentalmente, las emulsiones de agua en petróleo que se estudiaron presentan un comportamiento no newtoniano, pseudoplástico y cumplen con la ley de potencia; la viscosidad entonces disminuye con el aumento del esfuerzo de corte.

El método presentado por Metzner y Reed que utiliza el número de Reynolds generalizado es aplicable para representar el comportamiento de las emulsiones.

En la tubería bajo consideración no hay caída significativa de la temperatura, y si esta existe deben entonces calcularse las propiedades con el valor promedio. El aspecto más difícil de la solución del problema de emulsiones es asegurarse de que los datos de entrada representan las condiciones de funcionamiento reales.

Los estudios del transporte de emulsiones tienen como objetivo principal, predecir los perfiles de caída de presión de una emulsión previamente caracterizada al fluir en tuberías, optimizando el consumo de energía. En el presente estudio sobre el transporte de las emulsiones se obtuvieron resultados útiles para la estimación de las caídas de presión a través de tuberías en régimen laminar.

RECOMENDACIONES

Considerar en los diseños y operación de líneas los aspectos reológicos de comportamiento no newtoniano que presentan las emulsiones, los cuales permitirán tener una mayor sensibilidad de los efectos de incrementos de caudal, consumo de energía y mantenimiento de líneas.

Es recomendable que trabajos de investigación futuros se centren más en la evaluación experimental de las diferentes técnicas de medición de emulsiones disponibles para determinar su gama completa de aplicabilidad y sus limitaciones. Los trabajos experimentales que se ocupan de comparaciones de las diferentes técnicas que miden emulsiones serán los más útiles.

Realizar un conjunto de estudios teniendo en cuenta el efecto de la temperatura sobre la viscosidad y caída de presión de emulsiones, para fines de diseño, es necesario adelantar estudios reológicos que cubran todo el rango de operación del sistema de tuberías para el transporte de emulsiones.

Realizar estudios del comportamiento reológico de emulsiones agua en aceite teniendo en cuenta la influencia de la adición de desemulsificantes.

Hacer estudios adicionales en los que se considere el efecto sobre el comportamiento de las emulsiones de la inclinación de la tubería.

Se deben hacer análisis periódicos para determinar cuales son los pozos con mayor cantidad de agua y emulsión y como están variando dichas cantidades con el tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- (1) RAJINDER, Pal. **Metering of two phase liquid-liquid emulsions: a state of the art review.** Paper Industrial Engineering and Chemistry Research: June 1994. v. 33
- (2) LISSANT, Kenneth. **Emulsions and emulsions technology:** Surfactant Science Series. Part I. New York: Marcel Dekker, 1974. v. 6.
- (3) TADROS, Th. F. and VINCENT, B. **Emulsions stability.** Encyclopedia of emulsions technology. Cap 3. New York: Becher P, 1983. v. 1.
- (4) ROSEN, M. J. **Surfactants and interfacial phenomena.** 2 ed. New York: Wiley Interscience, 1989.
- (5) KOKAL, Sunil. **Crude oil emulsions: A state of the art review.** Society of petroleum Engineers. Paper SPE 77497, October 2002.
- (6) SCHUBERT, H and ARMBROSTER, H. **Principles of formation and stability of emulsions.** Chemistry engineering. v. 32, 1992.
- (7) KOKAL, Sunil. **Quantification of various factors affecting emulsion stability.** Paper SPE 56641, 1999.
- (8) KOKAL, Sunil. And WINGROVE, Martin. **Emulsion Separation Index.** Paper SPE 63165, October 2000.

- (9) MENON, V. B. and WASAN, D. T. **Demulsification**. Illinois Institute of technology. Chicago, Illinois. Encyclopedia of emulsions technology. Cap 1, USA: Becher P. 1983. v. 3
- (10) DARBY, Ronald. **Emulsions Rheology**. Texas A&M University, College Station, Texas. 1990.
- (11) SCHRAMM, G. **Introducción a la viscosimetría practica**. Gebruder HAAKE, Alemania.
- (12) SHERMAN, P. **Industrial Rheology**. Welwyn, England: Academic press. Emulsions science.
- (13) SHERMAN, P. **Rheology of emulsions**. London and New York: Academic press. Emulsions science.
- (14) EIRICH, F. **Rheology theory and applications**. New York. Academic press.
- (15) RONNINGSEN, Hans. **Correlations for predicting viscosity of W/O emulsions based on North Sea crude oils**. Paper SPE 28968. 1995
- (16) SCHRAMM, L.L. **Emulsions: fundamental and applications in the petroleum industry**. Advances in chemistry series 231, American chemical society, 1992.
- (17) SALAGER, J. L. **Propiedades de las emulsiones y su medición**. Universidad de los Andes. Mérida Venezuela. 1999
- (18) CAMY, J. P. and MARSDEN, S. S. **The Rheology of crude oil dispersions**. Paper SPE 5299. January 1975.

- (19) PILEHVARI, A. **Oil water emulsions for pipeline transport of viscous crude oils.** Paper SPE 18218. October 1988.
- (20) ROSE, S. C. and MARSDEN S. S. **The flow of North Slope crude oil and its emulsions at low temperatures.** Paper SPE 2996 October 1970.
- (21) RAJINDER, Pal. **Relative viscosity of non Newtonian concentrated emulsions of noncolloidal droplets.** Industrial Engineering and Chemistry Research, v. 39, December 2000.
- (22) SCHRAMM, L. L. **Petroleum emulsions.** Petroleum Recovery Institute. American Chemical Society, 1992.
- (23) DARBY, Ronald. **Chemical engineering fluid mechanics.** Texas A&M University. Department of chemical engineering, Texas. 1990.
- (24) BOGER, D. V. and HALMOS, A. L. **Non-Newtonian flow I: characterization of fluid behavior.** American Institute of chemical engineers. Gordon v. 2. 1991.
- (25) BIRD, R. B.; STEWARD, W. E. and LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena.** New York. Wiley and Sons. 1960.
- (26) ZAKIN, J. L.; PINAIRE, R. and BORGMEYER, M. E. **Transport of oils as oil water emulsions.** Department of chemical engineering. University of Missouri. 1979.
- (27) CHIEN, Sze-Foo. **Laboratory development of emulsions technology for pipeline transportation of viscous crude oils.** Paper SPE 21161. 1990.

- (28) BOGER, D. V. and HALMOS, A. L. **Non-Newtonian flow II: fully developed tube flow**. American Institute of chemical engineers. Gordon v. 2. 1991.
- (29) DODGE, D. W. and METZNER, A. B. **Turbulent flow of No-Newtonian systems**. Journal of American Institute of Chemical Engineers. v. 5. 1959
- (30) METZNER, A. B. **Non-Newtonian fluid flow**. Journal of American Institute of Chemical Engineers. v. 49. 1957
- (31) WOHL, Martin. **Rheology of Non Newtonian materials**. Journal of American Institute of Chemical Engineers. 1968.
- (32) GROSSO, J. L. *et al.* **Transporte de crudos pesados mediante emulsiones**. INTEVEP. 1984.
- (33) RIMMER, D. P. *et al.* **Pipeline emulsion transportation for heavy oils**. **American Chemical Society**. Calgary. 1992.
- (34) WIRASINGHE, Errol: **Estimating Pressure Drop for Water Oil Emulsion**. Paper Oil & Gas Journal, November 1980.
- (35) SESTAK, J.; ZITNY, R. and BUKOVSKY, J. **A comparison of methods for rapid calculation of frictional pressure drop and heat transfer coefficient for flow of Non Newtonian fluids in ducts with non-circular cross sections**. Department of Process Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Czech Technical University of Prague. 1998.