

**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR**  
**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA**  
**“Dr. Antonio Núñez Jiménez”**  
**FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECHANICA**

**TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO  
DE  
MASTER EN CIENCIAS TÉCNICAS**

***Método de cálculo para el transporte de emulsión de petróleo  
crudo cubano por tuberías***

**Autor:** Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso

**Tutor:** Dr. Ing. Alberto Turro Breff  
Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor auxiliar

MOA – 2007  
“Año 49 de la Revolución”



## ***RESUMEN***

---

En el presente trabajo se realiza un estudio, relacionado con las propiedades de transporte de emulsiones preparadas con petróleo crudo cubano; con el fin de contribuir a las soluciones relacionadas a los métodos de cálculos aplicables a fluidos no newtonianos en específico. A partir del estudio reológico se hace la caracterización en cuanto al comportamiento del fluido, donde se ejemplifica el comportamiento de la viscosidad aparente con relación al gradiente de velocidad, observándose que la emulsión presenta propiedades pseudoplásticas para diferentes temperaturas. Se proponen modelos y procedimiento de cálculo apropiado para la selección y evaluación de sistemas de transporte, relacionado con las propiedades reológicas del fluido. Los modelos propuestos para la estimación de pérdidas de carga y potencia son válidos para fluidos pseudoplásticos que se transportan en régimen laminar. Como propósito del efecto económico y medioambiental relacionado al transporte de emulsiones de petróleo; se analiza las incidencias más significativas, como el consumo de energía eléctrica para el transporte y peligros a la salud humana, causados al interactuar con el petróleo.



## ***ABSTRACT***

Presently work is carried out a study, related with the estates of transport of the prepared emulsions with Cuban raw petroleum; with the purpose of contributing to the solutions related to the methods of applicable calculations to fluids non newtonianos in specific. Starting from the study reológico the characterization is made as for the behavior of the fluid, where the behavior of the apparent viscosity is exemplified with relationship to the gradient of speed being observed that the emulsion presents estates pseudoplásticas for different temperatures. They intend models and calculation procedure adapted for the selection and evaluation of systems of transport related with the estates reológicas of the fluid. The models proposed for the estimate of lost of load and it potentializes they are been worth for flowing pseudoplásticos that are transported in régime to laminar. As purpose of the economic and environmental effect related to the transport of emulsions of petroleum; it is analyzed the most significant incidences, as the electric energy consumption for the transport and dangers to the human health, caused when interacting with the petroleum.



	<b>CONTENIDO</b>	<b>Pág.</b>
	<b>Introducción</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	7
1.1-	Introducción.....	7
1.2-	Revisión Bibliografica.....	7
1.3-	Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas.....	16
1.4-	Petróleo y Emulsiones.....	18
1.4.1-	Comportamiento reológico de emulsiones.....	21
1.5-	Viscosidad de mezclas y sistemas coloidales.....	23
1.6-	Aplicación del trasporte de petróleo por tuberías.....	24
1.6.1-	Ventajas de transporte por sistemas de tubería.....	25
1.7-	Conclusiones del capítulo.....	27
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO</b> .....	28
2.1-	Introducción.....	28
2.2-	Modelos reológicos de fluidos.....	28
2.2.1-	Curvas de flujo.....	31
2.3-	Requerimientos energéticos para el transporte de fluidos no newtonianos por tuberías. Balance de energía mecánica.....	33
2.4-	Modelos matemáticos de pérdidas de presión durante el transporte de fluidos seudoplásticos.....	34
2.4.1-	Expresiones para el cálculo de pérdidas de presión por resistencias locales.....	37
2.5-	Modelo matemático para estimar la potencia necesaria en el transporte de fluidos seudoplásticos por tuberías.....	37
2.6-	Materiales y técnicas utilizadas.....	39
2.6.1-	Emulgente empleado.....	39
2.6.2-	Pruebas de reología.....	40
2.7-	Características y propiedades del petróleo crudo cubano.....	41
2.8-	Diseño de experimentos y procesamiento estadístico.....	43
2.9-	Conclusiones del capítulo.....	45
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b> .....	46
3.1-	Introducción.....	46
3.2-	Características reológicas.....	46
3.2.1-	Resultados experimentales de las propiedades reológicas.....	46
3.2.2-	Estimación de los parámetros reológicos.....	48
3.2.3-	Comportamiento seudoplástico de la viscosidad aparente.....	48
3.2.4-	Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas.....	50



3.3-	Análisis de los resultados de las pérdidas de carga.....	52
3.3.1-	Dependencia entre la pendiente hidráulica y la velocidad en tuberías circulares	52
3.3.2-	Correlación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds.....	55
3.4	Análisis del modelo de estimación de la potencia necesaria de transporte.....	56
3.5-	Conclusiones del capítulo.....	58
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>PRINCIPIOS PARA EL TRANSPORTE DE EMULSIÓN PETRÓLEO CRUDO CUBANO</b> .....	<b>60</b>
4.1-	Introducción.....	60
4.2-	Método para el diseño y evaluación de sistemas de Transporte de emulsión de petróleo cubano.....	60
4.3-	Efecto Económico de transporte.....	62
4.4-	Principios medioambientales para el transporte y manipulación de emulsión de petróleos pesados.....	65
4.5-	Conclusiones del capítulo.....	68
	<b>CONCLUSIONES GENERALES</b> .....	<b>69</b>
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>70</b>
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>71</b>
	<b>Anexos</b> .....	

### INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los principales oleoductos a nivel mundial trabajan a un 60% de su capacidad operativa. El transporte de combustible por oleoductos en Cuba a partir de 1999 hasta el 2005 ha aumentado de un 21% hasta un 24%, siendo el Oleoducto Varadero – Matanzas entre las inversiones ejecutadas, un claro reflejo del desarrollo actual de la industria petrolera cubana, que elimina la transportación de crudo por barco (Columbie, 2006).

En este escenario se produce un incremento de la producción de energía, principalmente crudo. Si se tiene en cuenta una mayor utilización de las fuentes nacionales de energía para el desarrollo energético; dado que el papel predominante lo constituye el crudo nacional, permitirá una mayor utilización de este combustible en el sector Industrial contribuyendo, a que no aumente la importación de crudo (Somoza et al., 2002).

Teniendo en cuenta lo planteado; podemos decir, que el papel de la industria cubana juega un rol importante dentro de la economía nacional. Actualmente se encuentran enfrascadas en un gran proyecto de eficiencia energética, con el objetivo de disminuir los costos en la producción. Es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que las componen, incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos y la utilización de los recursos disponibles.

El desarrollo de la ciencia y la tecnología en tal sentido, no han avanzado a profundidad en el estudio y perfeccionamiento de métodos y metodologías, apropiadas a los diferentes sistemas de transporte de crudo cubano, lo que dificulta en gran medida su diseño, selección y evaluación a nivel industrial. A pesar de las grandes limitaciones de toda índole, se busca mejorar eficazmente los procesos productivos y los medios de producción, relacionados al tema en cuestión, para lograr un resultado eficiente en beneficio del país.

La industria minero metalúrgica y centrales termoeléctricas de la región, utilizan diversas formas de transportación, cobrando la importancia primaria el transporte por sistemas de bombeo del combustible desde el puerto hasta los depósitos de las industrias y su posterior destino en las plantas. Estos sistemas de transporte difundidos mundialmente, cuando operan en los parámetros eficientes son de gran efectividad económica y medioambiental con respecto a los demás sistemas de transporte.

En el transporte a largas distancias es recomendable disminuir la viscosidad del fluido para aumentar la eficiencia de transportación. Una alternativa utilizada en otros países como Venezuela y Canadá es formar emulsiones de petróleo, obteniéndose un producto con un valor de viscosidad en un rango manejable para el transporte (Martínez et al., 2001). La investigación y desarrollo de esta tecnología es muy importante para un país que cuenta con reservas de crudos pesados que se pueden utilizar en las industrias y en particular la de generación eléctrica y la del níquel. Como principal problema en el transporte del petróleo crudo cubano y su emulsión, esta es que son fluidos de comportamiento complejo (no newtonianos que cambian su viscosidad, en función del gradiente de velocidad) los cuales requieren la determinación de los modelos reológicos que describen su comportamiento.

Por todo lo planteado, se requiere de métodos y estudios que nos permitan determinar los parámetros y propiedades de transporte de la emulsión petróleo crudo cubano, a partir de su naturaleza reológica; basados en la determinación de las pérdidas de presión en las líneas y accesorios; siendo este trabajo una tarea de aporte novedoso.

La situación actual del equipamiento instrumentación y líneas de transporte asociada a la falta de métodos y metodologías, tecnologías y procedimientos no responden a la puesta en práctica del transporte de emulsiones de petróleo pesado en agua, que contribuiría en cierta medida al funcionamiento eficiente en las instalaciones de los sistemas de transporte de puertos, plantas de Generación eléctrica y metalúrgicas.

### **En tal sentido se caracterizan por las siguientes deficiencias:**

- Desconocimiento del comportamiento de las emulsiones del crudo cubano, en función de sus propiedades y reológicas.
- Insuficiencia de datos para la proyección, selección y cálculo de los parámetros racionales de transporte de emulsiones petróleo crudo cubano.
- Las metodologías de cálculo disponible para el estimado de los parámetros indispensables de instalaciones de transporte, han sido elaboradas a partir de datos experimentales, obtenidos para sistemas particulares y no existe una metodología única para determinar los parámetros.

A partir de estas deficiencias se declara como ***situación problemática***:

La producción de petróleos pesados en Cuba, se ha incrementado fundamentalmente en el centro y occidente; se estima que las reservas ascienden a 30 millones bls. Las investigaciones que han venido realizándose desde 1985 con petróleos pesados y sus mezclas arrojan características tales como bajo grado API, alto contenido de hidrocarburos aromáticos, asfaltenos, elevado contenido de azufre, nitrógeno y la presencia de hidrocarburos altamente inestables (Om et al., 2004). Actualmente estos petróleos no pueden refinarse directamente en muchas instalaciones, siendo uno de los problemas la deposición de los asfaltenos que influyen negativamente sobre la producción, transporte y almacenamiento. Ante un clima de severas restricciones medioambientales, aparejadas con la elevación de la calidad de los productos, se necesita un profundo conocimiento de las características físico mecánicas y químicas de los petróleos pesados. Estos conocimientos permiten la selección de los equipamientos tecnológicos apropiados.

Por otra parte, se encuentra la problemática de que las teorías para la determinación de las viscosidades, propiedades reológicas y de transporte de líquidos y mezclas no conducen a un método teórico de estimación, sino a técnicas empíricas basadas en la evaluación de algunas constantes; a partir de la estructura o propiedades físicas del líquido que se trate. Los métodos se basan enteramente en el estudio y correlación de datos experimentales (Costa, 1984).

Dada la situación planteada, se resume que, existe desconocimiento de las propiedades de transporte de las emulsiones del petróleo crudo cubano, dificultando la correcta selección y diseño de los sistemas de transporte de estos combustibles; conduciendo al aumento del consumo energético e ineficiencia en las instalaciones de transporte del petróleo, dada por las inexactitudes de los métodos de cálculos utilizados, requiriéndose una investigación que permita aportes y mejoras de los métodos e índices técnicos económicos de los sistemas.

El ajuste de modelos matemáticos que representen el comportamiento de flujo y fenómenos físicos de los sistemas, la simulación con técnicas modernas de sus características y la implementación de nuevas tecnologías es el punto de partida para la eficiencia energética en el sector industrial.

El **problema científico** a investigar lo constituye:

Insuficiencia de métodos y conocimiento de las propiedades de transporte de emulsiones de petróleo crudo cubano; que imposibilita establecer el modelo de cálculo adecuado para el estudio confiable de proyección, selección y explotación de los sistemas de bombeo.

Se establece como **objeto de la investigación**:

*El sistema de flujo y propiedades de transporte de la emulsión de petróleo crudo cubano.*

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente: **hipótesis**:

Si se establecen las propiedades físico -mecánicas y reológicas de la emulsión del crudo cubano; es posible obtener un método conformado por un sistema de ecuaciones que posibilite la selección, evaluación, explotación y proyección eficiente de los sistemas de flujo.

Esta hipótesis exige conocer las principales propiedades físicas-químicas y reológicas del fluido en estudio y a partir de modelos empírico – teórico; simular las características de transporte, seleccionando los parámetros para un transporte eficiente.

Se define como **objetivo del trabajo**:

Obtener un método apropiado para la evaluación, explotación y proyección de los sistemas de transporte de la emulsión del petróleo crudo cubano o fluidos similares; basado en el establecimiento de los modelos reológicos.

Para cumplir el objetivo central, se desarrollaron los siguientes **objetivos específicos**:

- Describir las características del petróleo y las emulsiones desde el punto de vista químico y reológico; estableciendo la influencia de estos factores sobre su comportamiento.
- Realizar y analizar las investigaciones teóricas y experimentales de los principales parámetros de flujo y de transporte.
- Proponer un método de cálculo, conformado por un conjunto de ecuaciones que tengan en cuenta las características reológicas del sistema de flujo.

- Contribuir a la disminución de los costos de transportación, sobre la base de la mejora en los métodos de cálculos, con vista a mejorar la eficiencia de las instalaciones industriales.

De acuerdo al objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

- ✓ Determinar las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el cálculo de las pérdidas de presión al ser aplicadas al crudo cubano y a las emulsiones.
- ✓ Obtener por experimentación los parámetros del modelo reológicos (índice de flujo y consistencia másica).
- ✓ Simular las características de transporte del crudo cubano.
- ✓ Analizar las incidencias, económico y medioambientales del sistema de transporte de emulsión.

En relación a hipótesis y objetivo propuesto, se plantea como **novedad científica**:

- La caracterización de las propiedades de transporte de la emulsión del petróleo crudo cubano.
- El sistema de ecuaciones y correlación, derivados del modelo físico propuesto para el cálculo y evaluación de instalaciones de transporte de emulsión de petróleo crudo cubano.

Se han empleado los siguientes **métodos de investigación**:

1. Método de investigación documental y bibliográfica; para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Método de la modelación físico – matemática; basado en los principios del movimiento de fluidos no Newtonianos.
3. Método de investigación experimental; para describir y caracterizar el objeto de estudio con sus principales regularidades.
4. Método de simulación computacional de los modelos obtenidos.

### **Aportes Metodológicos**

- Se establece un método, para el cálculo, evaluación y selección de sistemas para el transporte de emulsiones de petróleo cubano; pudiendo generalizarse la aplicación de dicha metodología a otros tipos de fluidos.
- Se ilustra la necesidad de utilizar los parámetros que caracterizan el comportamiento reológico de fluidos, en el cálculo y evaluación de problemas del transporte de materiales no newtonianos por tuberías.
- Los resultados y modelos propuestos para describir el sistema, pueden ser introducido en temas de asignaturas afines de las carreras de Mecánica e Ingeniería Química y Metalurgia.

### **Valor práctico**

- La aplicación de los modelos reológicos obtenidos, permiten determinar el comportamiento del fluido, los valores de sus parámetros y estimar la viscosidad y los parámetros reológicos en función de la temperatura.
- La investigación permite disminuir los costos mediante la reducción del consumo energético y el perfeccionamiento de los métodos de cálculo para el transporte de fluidos.

---

## **MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**

---

### **1.1 – Introducción**

El marco teórico del objeto de estudio, permite detectar de forma preliminar, las diferentes características y deficiencias que existen entre las investigaciones realizadas, las teorías existentes y los múltiples elementos que están presentes en la investigación. En tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

*Establecer el estado del arte a partir, de la revisión bibliográfica relacionada al tema y ventajas del proceso en estudio, que soporten como base, la investigación del transporte de petróleo y emulsión, reafirmando las tareas y objetivos a seguir para la realización de la investigación, a partir del problema formulado.*

### **1.2 – Revisión Bibliográfica**

“La teoría de los fluidos deberá basarse necesariamente en la experimentación” (D’Alambert 1744), demostró que no existe resistencia al movimiento de un cuerpo cuando éste se mueve a través de un fluido ideal (no viscoso o invíscido), pero es obvio que esta conclusión no puede aplicarse a los cuerpos que se mueven a través de fluidos reales. Esta discrepancia entre la teoría y el experimento, que se denominó la paradoja de D’Alambert, ha sido ya resuelta. No obstante, demuestra con claridad las limitaciones de la teoría de esa época para la resolución de problema sobre fluidos.

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la hidráulica se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre lo que lo llevó al campo de la hidráulica. Además de los científicos anteriores que desarrollaron sus trabajos en Francia, sobresalieron también en Alemania Julios weibach y Gottlieb Hagen. Durante esa época, y en el aspecto teórico se destacan los científicos Lagrange, Helmholtz, Saint-Venatt, Venturi Pitot entre otros.

En Cuba no comienza un desarrollo de los estudios hidráulicos sino hasta después de la revolución en que dichos estudios constituyen una de las bases principales del progreso científico técnico de nuestro país.

En el desarrollo de la investigación se han consultado diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica ha estado dirigida en dos líneas fundamentales:

- La información relacionada con el enfoque teórico – metodológico.
- los trabajos sobre el tema de fluidos no newtonianos desde el punto de vista científico, técnico y práctico que se han efectuado en los últimos años.

El problema de los efectos viscosos (Figura 1.1) de disipación de energía, se empezó a abordar experimentalmente con flujos a baja velocidad en tuberías, independientemente en 1839 por el médico francés Jean Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero alemán Gotthif Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones de gobierno de la dinámica de fluidos se debió al ingeniero francés Claude Navier en 1827 e, independientemente, al matemático británico George Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como *ecuaciones de Navier- Stokes*.

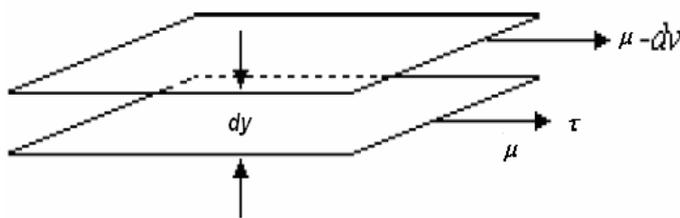


Figura 1.1. Corte entre dos planos de fluido

**Fuente:** Columbée, 2004.

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, Muchos han sido los autores que abordan esta temática; de vital importancia en el desarrollo de la investigación de fluidos; trabajos como (De la Paz et al., 2002), realiza un estudio reológico de la jalea dentífrica fluida; donde analizan las deformaciones sufridas por la formulación al aplicarle la fuerza de cizalla con un determinado gradiente de velocidad, describiéndose por medio de la curva viscosimétrica y de la de fluidez cómo se deforma el cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas, así como la determinación de sus propiedades mecánicas bajo las condiciones de deformación ensayadas. La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales en que se ensayo, se encuentra como

deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

A partir de los trabajos descritos por Caldiño et al. (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos. Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como, (pH) y diámetro medio de las partículas de arena, lo que no se tiene en cuenta.

Ivenski (1957), mediante el estudio de los regímenes de movimientos de las mezclas de materiales de la construcción por tuberías de diferentes diámetros estableció, que existe el régimen estructural en los límites de velocidades hasta 0.5 m/s, se observa el régimen estructural, que se acompaña de la rotación de los granos, lo que conlleva a la destrucción de los enlaces estructurales.

En el trabajo de Iakovlev et al. (1961), se exponen los resultados de estudios experimentales, los cuales demuestran que, el movimiento de líquidos estructurales por tuberías se caracteriza por la presencia de un núcleo del flujo, que se mueve con velocidad constante como un cuerpo compacto.

Pakrovskaya (1985), realiza un amplio estudio técnico – práctico donde abarca temas muy importantes y novedosos entre los que se destacan; características, parámetros y regímenes de transportación de hidromezclas de diferentes grados de saturación; métodos para la preparación de pulpas para el hidrotransporte, desgaste hidroabrasivo de los sistemas de tuberías durante la transportación de materiales abrasivos; fiabilidad del trabajo de las instalaciones de hidrotransporte; métodos de control y regulación de los parámetros de hidrotransporte de los golpes hidráulicos; valoración económica de la efectividad del transporte hidráulico.

En su trabajo, Barreto (1979), sobre la base de las investigaciones teórico experimental y el análisis de otros autores determinó los parámetros y estableció los regímenes

racionales de hidrotransporte de minerales de hierro y concentrados. Elaboró las recomendaciones sobre la modelación de las suspensiones, selección de los regímenes efectivos y la metodología para la determinación de los parámetros de materiales sólidos de alta densidad en flujos de alta densidad (hasta 40 % de sólido por volumen).

Se encuentra como dificultad de los tres trabajos anteriormente descritos, que los autores, no determinan las relaciones de las propiedades reológicas en sus investigaciones; lo cual dificultaría el ajuste de estas condiciones a otras condiciones de los fluidos estudiados.

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 (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971); (Foust et al., 1980); (Macedo et al., 2001). 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 (Steffe et al., 1986); (Ibarz et al., 2001); (Vélez, 2003); (Perona, 2003); (Sablani et al., 2003).

En una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar y viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes, y/o entre las partículas que se mueven en recorridos paralelos con diferentes velocidades, en la pared de la tubería las partículas se adhieren a ella y no tienen movimiento. Tanto las laminas como las partículas en movimiento en la tubería están sujetas a un esfuerzo cortante viscoso que disminuye conforme cuando se aproximan al centro de la tubería, por lo que la variación de la velocidad a través de la tubería, está totalmente determinado por el esfuerzo viscoso entre las capas o láminas imaginarias en movimiento (Welty et al., 1976); (Bandala, 2001).

Si el flujo en la tubería es turbulento, la variación de la velocidad a través del tubo no queda determinada únicamente por la viscosidad, sino que depende de las características que tenga la turbulencia, de las propiedades reológicas y viscoelásticas de los fluidos no newtonianos. La magnitud del esfuerzo cortante viscoso aumenta debido a los remolinos y

vórtices que acompañan a la turbulencia, además con paredes ásperas o rugosas, la turbulencia se incrementa aún más (Welty et al., 1976).

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama et al. (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham. En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia ( $t_0$ ) en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee et al. (1994), determinaron de forma experimental la pérdida de presión ( $\Delta P$ ) en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo pseudoplástico generalizado ( $Re$ ) y los diferentes grados de abertura ( $\delta$ ).

Suárez (1998), hace referencia a la elaboración del modelo físico – matemático del movimiento de suspensiones de serpentinita blanda por tuberías, basado en los resultados de las investigaciones de las propiedades reológicas, la determinación de las regularidades de la variación de los coeficientes de resistencia hidráulica en dependencia de la concentración másica en el intervalo de 40 a 80 % en régimen laminar; la determinación de las pérdidas específicas de presión para el movimiento de dichas suspensiones en régimen turbulento; la determinación de las ecuaciones para la obtención de la velocidad crítica y la velocidad límite de caída de los granos de serpentinita dura.

Izquierdo en su trabajo (1989), sobre la determinación de los parámetros y regímenes de hidrotransporte de mineral laterítico aplicable a las condiciones del proceso productivo de la Empresa comandante Pedro Soto Alba determinó las propiedades físico – mecánicas de las hidromezclas, formuló el modelo físico – matemático del flujo de las pulpas lateríticas; comprobó que durante el flujo dependiendo de la velocidad de las pulpas y de la concentración del sólido, se presentan los regímenes estructural, transitorio y turbulento, obtuvo las dependencias para determinar el coeficiente de resistencia hidráulica para el movimiento del régimen estructural y las pérdidas hidráulicas durante el movimiento de la hidromezcla en régimen turbulento.

Liu et al. (1998), realizaron el análisis teórico y la modelación del transporte de fluidos no newtonianos (del tipo Herschel-Bulkley, Meter y Cross), tanto en conductos como a través de medios porosos, involucrando tres factores de forma y la viscosidad como necesarios para evaluar las caídas de presión durante el flujo. Adhikari et al. (2000), incorporaron el concepto de las redes neuronales, como una nueva herramienta computacional, en el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías, para lo cual manejaron fluidos de comportamiento no newtoniano, obteniendo errores de predicción menores a 5.4% con respecto a los valores experimentales. Los coeficientes de fricción para el manejo de fluidos reoadelgazantes en diferentes accesorios de 1 pulgada, fueron medidos por Martínez et al. (2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Con el objetivo de determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido, Izquierdo et al. (2001), modeló el hidrot transporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y las propiedades reológicas de la hidromezcla. Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento ( $l$ ) y el número generalizado de Reynolds ( $Re$ ).

En el Artículo, Sánchez (2002), realiza un estudio numérico de mecánica de fluidos 2D en una contracción brusca para fluidos no newtonianos tipo ley de potencia de Ostwald-de-Waele. Se emplean dos métodos de resolución, el método de los volúmenes finitos y el método de los elementos finitos para la resolución de las ecuaciones de momentum lineal y de continuidad. En ambos métodos se estudia el comportamiento del fluido para diferentes índices de potencia.

Ortega (1995), presenta en su tesis doctoral, un estudio teórico de algunos sistemas de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de ciertas clases de fluidos no newtonianos; considera un modelo para fluidos de bingham,

seudoplasticos y dilatantes en densidad variable. Para estos modelos, se obtienen resultados de existencia de solución global en tiempo en varios sentidos: solución muy débil, débil y medida-valuada. También se estudia la cuestión de la unicidad de solución. En la segunda parte se consideran tres problemas asociados al modelo de Oldroyd para fluidos viscoelásticos: el problema de evolución, el problema estacionario y el flujo de Poiseuille en dominios cilíndricos.

Turro (2002), en su tesis doctoral estudia el hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal, planteando a partir del sistema de correlaciones derivado del modelo físico propuesto, su novedad para el cálculo y evaluación de las instalaciones de hidrotransporte, derivado de los resultados de la caracterización realizada y del sistema de ecuaciones producto del modelo físico – matemático.

Romo (1998), en base al proyecto "Formulación de emulsiones petróleo pesado - agua", determinó las concentraciones más efectivas de petróleo y de sustancias tensioactivas para formar emulsiones estables en agua. Dentro de las principales conclusiones consta la siguiente: Se ha formado emulsiones de petróleos pesados dentro del ámbito de índice de gravedad API de 15 a 20 utilizando sustancias tensioactivas no-iónicas al nivel de concentración de 5%. En este estudio se determinó, que las emulsiones con un 70% de petróleo pesado y 5% de sustancia tensioactiva tienen una alta fluidez porque la viscosidad se ha reducido a menos de 1/10 de la viscosidad del petróleo. Como última fase de este proyecto se realizó el estudio de las características reológicas de las emulsiones de petróleo pesado en agua y de su comportamiento al ser transportado a través de tuberías. En este estudio se arribaron a conclusiones importantes, en el sentido de la determinación de las propiedades reológicas y de transporte; en este proyecto no se tienen en cuenta los criterios de semejanza, importantes a la hora de extrapolar los resultados a escala industrial.

Placencia et al. (2000). Dando continuidad al proyecto anterior, realizan pruebas de formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto, se realizan pruebas de reología a diferentes condiciones de concentración de tensoactivo, temperatura y tiempo de almacenamiento. Finalmente para pruebas de flujo, se estudia el comportamiento de la emulsión con el 1% en peso de tensoactivo al ser transportada por una tubería de 1 pulgada.

Planteado la necesidad de estudiar otras formas de disminuir la viscosidad del petróleo pesado mediante la formulación de emulsiones (Martínez et al., 2001), caracterizan el comportamiento de flujo de las emulsiones en condiciones más cercanas a las reales del oleoducto partiendo de estudios realizados en laboratorio que las emulsiones de petróleo pesado en agua tienen una viscosidad 10 a 12 veces menor que la viscosidad del petróleo pesado.

Falcón et al. (1995), publican la invención de un emulgente para la preparación de emulsiones agua-combustible, este producto logra la estabilidad de las emulsiones agua-combustible y las condiciones tecnológicas en las cuales el combustible emulsionado logre el resultado más eficiente desde el punto de vista energético y ecológico.

La característica distintiva de este emulgente resulta la formulación de una mezcla convenientemente dosificada de productos de pirolisis (ácidos piroleñosos y alquitranes sodificados) y alcohol etílico en las proporciones : 1,0-1,2 alquitranes sodificados; 1,1-2,0 ácidos piroleñosos, 1,0-1,2 alcohol etílico, el emulgente resulta una mezcla de sustancias tensioactivas que añadidas en el agua se adsorben en la interfase de esta con el diesel y provocan su encapsulamiento cuando la mezcla se somete a emulsionamiento por los diferentes procedimientos conocidos.

El emulgente puede ser utilizado para emulsionar combustible diesel para combustión en cámaras cerradas (motores) o abiertas (hogares).

El avance tecnológico en la industria del petróleo se debe en buena medida a las herramientas y metodologías provistas por la física. En particular, los estudios reológicos y dieléctricos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos altamente viscosos, los que recién comienzan en (Maruska et al., 1987). En los últimos años, en lo que se entiende como nuevas herramientas aplicadas al estudio, caracterización y control de crudos asfálticos y parafínicos, la aplicación de campos eléctricos y magnéticos, ya sea por separado o combinadas sus acciones, como en el caso de plasma, aparecen como técnicas altamente promisorias. El comportamiento electrorreológico de crudos, debido a la presencia de asfaltenos, es un campo totalmente nuevo, que puede desentrañar algunas características aún desconocidas de estos últimos. La aplicación de campos eléctricos en emulsiones, puede acelerar el rompimiento de las mismas.

Lian (1999), presentó resultados de pruebas para transporte de crudo tratado magnéticamente a grandes distancias a través de oleoductos. Las pruebas se corrieron en un aparato de tratamiento magnético para varias intensidades y diferentes configuraciones del campo magnético bajo ciertas temperaturas y ratas de flujo y caída de presión.

En las pruebas se acentuaron el estudio de las variables intensidad y configuración del campo magnético, viscosidad y rata de flujo del crudo, tiempo de tratamiento y contenido de parafina en el crudo. Los resultados mostraron que las propiedades resistencia a la fricción y rata de depositación de parafina fueron alterados y que el efecto fue duradero, el proyecto fue exitoso. Se verificó que los factores más importantes en el tratamiento son la intensidad y configuración del campo magnético.

Harms et al. (1991), describen en su invención una herramienta y un método para controlar la acumulación de depósitos de parafina en la tubería de producción y líneas de flujo. La exitosa herramienta previene la obstrucción de la tubería utilizando fuerzas magnéticas para disipar las fuerzas electrostáticas de la parafina.

Wang (1991), inventó un aparato que genera una fuerte concentración de campo magnético sobre el área de flujo. En los crudos disminuye la viscosidad y suprime la acumulación de depósitos de parafina en la tubería de producción y/o líneas de flujo. El aparato no consume energía, puede ser conectado a la tubería de producción o a las varillas en sistema de bombeo mecánico.

La tecnología del plasma es apropiada para aplicaciones contra flujo, particularmente, para crudos pesados. Los crudos pesados tienen un precio bajo en el mercado. La producción y el transporte de crudos pesados tienen costos adicionales significativos. Si la tecnología del plasma se adapta a la cabeza de pozo y puede incrementar el valor API del crudo, disminuir sulfuros, nitrógeno y contenido de metales pesados, reducir parafinas en el crudo, entonces habrá aumento significativo del valor comercial para la materia sin procesar, ahorros que en el transporte, y en operaciones de la refinería.

La conversión de crudos pesados a crudos más ligeros por medio de la tecnología del plasma, se adaptaría a las refinerías actuales reduciéndose así la necesidad de construir nuevas refinerías para el tratamiento de crudos pesados. Esto trae consigo la reducción de costos a largo plazo tanto en la inversión de capitales como en los costos de mantenimiento y en los costos de operación de las plantas de refinación.

Mechetti et al. (2000) 1; Mechetti et al.(2000) 2, presentan resultados inéditos en sus estudios de comportamiento reológico de crudos asfálticos bajo la acción de campos eléctricos. Investigando el comportamiento viscosimétrico de un crudo argentino de baja viscosidad con 7% pp. de contenido de asfaltenos, encuentran una dilatancia atípica para un crudo de baja viscosidad relativa y también una anomalía termorreológica (mayor viscosidad para una mayor temperatura). La dilatancia se explica en la literatura por la presencia de partículas cargadas en suspensión coloidal, lo que podría adjudicarse, en este caso, a la presencia de asfaltenos.

Por otro lado, Mechetti et al. (2001) 4, llevaron a cabo estudios electrorreológicos de emulsiones w/o de crudos analizando el comportamiento de la viscosidad en condiciones de flujo para diferentes velocidades de deformación y diferentes intensidades de campo, observando un rompimiento rápido de la emulsión, lo que resulta de gran importancia para el proceso de extracción de agua de crudos.

Chen et al (1994), investigaron el efecto de la aplicación de un campo eléctrico alterno en la estructura de una emulsión w/o, observando la formación de largas cadenas de gotas entre electrodos, que resulta de los dipolos inducidos en las gotas de agua en presencia del campo eléctrico, similar a lo observado en fluidos electrorreológicos. Es decir que las emulsiones w/o se comportarían como fluidos electrorreológicos (Mechetti et al., 2001) 4.

### **1.3 - Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas**

La viscosidad de los líquidos a temperaturas inferiores a la normal de ebullición no está muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy elevadas la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, este último crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones, (Costa, 1984).

#### **- Efecto de las propiedades superficiales**

En las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeñan un papel muy importante. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado grandemente por

la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables, influyen sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción del Van der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales. El componente repulsivo, se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas, que rodean a las partículas (repulsión de Born).

Cuando la interacción neta es repulsiva se observa un comportamiento newtoniano de la suspensión, en cambio, cuando la interacción neta es atractiva la suspensión puede exhibir un comportamiento seudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial. En los trabajos con pulpas laterititas de Cerpa et al. (1997), Cerpa et al (1998), Cerpa et al (1999), así como de Boger et al. (1990) y con suspensiones de líquido se ilustra la relación entre los fenómenos de la Química de Superficie y la reología. No se han encontrado trabajos sobre las emulsiones de crudo cubano que traten sobre estos aspectos.

Teniendo en cuenta todo lo hasta aquí explicado, resulta evidente que los efectos de las propiedades superficiales sobre la reología de las emulsiones coloidales y petróleo es un fenómeno de carácter universal, de manera que los principios que rigen estos procesos pueden ser aplicados independientemente del tipo de petróleo que forme la dispersión.

#### **- Efecto de la temperatura.**

En general, en la mayoría de los líquidos y suspensiones se ha observado una disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura. Se ha comprobado que la disminución de la viscosidad puede deberse a dos efectos (Garcell, 1993),

- a) Disminución de la viscosidad del medio dispersante.
- b) Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de líquidos se representa bien mediante la ecuación de Andrade (Reid Y Sherwood, 1966; Laurencio et al., 2007).

$$\mu_m = C \cdot e^{B/T} \quad (1.1)$$

En la que T es la temperatura; C y B son constantes, cuyos valores dependen de las unidades de  $\mu$  y de T.

De acuerdo con la ecuación 1.1 la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura.

#### **- Efecto del pH.**

En las suspensiones con características coloidales, se manifiestan grandemente los fenómenos electrocinéticos y otras propiedades superficiales. En las suspensiones minerales, en la que la distribución de tamaño muestra altos volúmenes de partículas finas se manifiestan también estos fenómenos, los cuales son altamente dependientes del pH de la suspensión. Para pH cercanos al punto isoeléctrico, el equilibrio atracción – repulsión entre partículas se desplaza hacia la atracción debido al predominio de las fuerzas de Van der Waals. En estas condiciones la suspensión incrementa su inestabilidad y muestra los máximos valores de viscosidad, debido a la formación de estructuras más fuertes. A pH alejado del i.e.p., son más importantes las fuerzas de repulsión de carácter electrostático entre las partículas.

#### **1.4– Petróleo y emulsiones**

##### **- Origen y clasificación de los hidrocarburos**

A los Hidrocarburos, se les define como compuestos químicos de carbón (76 a 86%) e hidrógeno (14 a 24%). Elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros son hidrocarburos que forman parte de otros compuestos de hidrocarburos como gas natural y petróleo. El génesis del petróleo, se ubica en el depósito y descomposición de organismos de origen vegetal y animal, que hace millones de años quedaron atrapadas en rocas sedimentarias en ambientes marinos o próximos al mar y que fueron sometidos a enormes presiones y elevadas temperaturas. La palabra petroleum, proveniente del latín “petroleum” (petra=piedra y oleum=aceite) y significa aceite de piedra.

Se ha encontrado petróleo en todos los continentes excepto en el Antártico, sin embargo, el petróleo no se encuentra distribuido uniformemente en el subsuelo del planeta.

Al analizar petróleo de procedencias diversas, de manera general puede decirse que lo forman los siguientes elementos químicos: de 76 a 86% de carbono y de 10 a 14% de hidrógeno.

A veces contiene algunas impurezas mezcladas como oxígeno, azufre y nitrógeno. También se han encontrado huellas de compuestos de hierro, níquel, vanadio y otros metales.

El petróleo se encuentra en el subsuelo, impregnado de formaciones de tipo arenoso y calcáreo. Asume los tres estados físicos de la materia: sólido, líquido y gaseoso, según su composición y la temperatura y presión a que se encuentran.

En el subsuelo se encuentra por lo general encima de una capa de agua, hallándose en la parte superior una de gas.

Dependiendo del número de átomos de carbono y de la estructura de los hidrocarburos que integran el petróleo, se tienen diferentes propiedades que los caracterizan y determinan su comportamiento como combustibles, lubricantes, ceras o solventes.

Los yacimientos de aceite crudo están constituidos por hidrocarburos líquidos, a las condiciones de presión y temperatura del yacimiento, con una viscosidad menor o igual a 10,000 centipoises. Esta viscosidad es medida a la temperatura original del yacimiento y a la presión atmosférica, como un líquido estabilizado libre de gas.

Es práctica común hablar de clases de aceite crudo de acuerdo a su peso específico, y expresado en una escala normalizada por el Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum institute). Esta escala es llamada densidad API, o comúnmente conocida como grados API.

En la tabla 1.1, se muestra una clasificación del aceite crudo en términos de su densidad, aunque hay que enfatizar que la producción de diversos yacimientos productores esta asociada a un solo tipo de aceite crudo.

Tabla 1.1. Clasificación de los aceites según su densidad

<b>Clasificación del aceite de acuerdo a su densidad</b>
--

	<b>Petróleo crudo</b>	<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad (grados API)</b>
1	Extra pesado	> - 1.0	< - 10.0
2	Pesado	1.01 – 0.92	10.1 – 22.3
3	Mediano	0.91 – 0.87	22.4 – 31.1
4	Ligero	0.86 – 0.83	31.2 – 39
5	Superligero	< - 0.83	> - 39

**Fuente:** Mommer, 2004.

Para propósitos comerciales y asegurar un mejor valor económico de los hidrocarburos, los aceites crudos vendidos nacional e internacionalmente son en general mezclas de aceites de diferentes densidades.

#### - Emulsiones de petróleo

La emulsión, es un combustible líquido, en respuesta a la necesidad de explotar los yacimientos de hidrocarburos pesados y extrapesados. Consta de un 70% de bitumen natural, un 30% de agua más aditivos para estabilizar la emulsión (surfactantes). Este combustible está específicamente diseñado para uso en empresas eléctricas y sector industrial. Ha sido usado con éxito en plantas generadoras de electricidad en Canadá, Estados Unidos, Reino Unido, China, Alemania, Japón, Dinamarca, Italia y Lituania, así como en plantas de cemento, (Mommer, 2004).

Las emulsiones son sistemas dispersos o suspensiones líquido - líquido, constituidos por dos líquidos inmiscibles, en el cual la fase en suspensión (interna) denominada fase dispersa se encuentra en forma de pequeñas gotas contenidas en una fase externa denominada fase continua. Los tipos más comunes de emulsiones son aquellas en las que un aceite es se dispersa en agua, en cuyo caso el sistema se conoce como emulsiones oleoacuosas (O/W), o cuando el agua se dispersa en el aceite para formar emulsiones hidrooleosas (W/O). El combustible es una emulsión de bitumen (fase dispersa) en agua (fase continua), lo que implica que es una emulsión del tipo oleoacuosa (O/W), involucrando esto que las emulsiones tratadas a continuación serán sólo del tipo O/W. La emulsificación normalmente requiere la presencia de un tercer componente con actividad interfacial que es adsorbido en la interfase de las gotas en la fase dispersa, denominado surfactante, este facilita la formación de la emulsión y prolonga el tiempo de vida de esta, manteniendo su estabilidad.

- Surfactantes o Emulsificantes:

Los surfactantes son sustancias complejas que se emplean para disminuir la tensión interfacial entre la fase dispersa y la continua ya que cuanto menor es la tensión interfacial entre las dos fases de una emulsión, tanto más fácil es la emulsificación. Los surfactantes se dividen en iónicos y no iónicos. El surfactante iónico consta de un grupo lipófilo orgánico y un grupo hidrófilo. Los surfactantes iónicos se subdividen en aniónicos y catiónicos, según sea la naturaleza del grupo activo. Ordinariamente se considera que la porción lipófila de la molécula es la porción de actividad interfacial.

Como es de suponer, no son mutuamente compatibles los agentes aniónicos y catiónicos de actividad interfacial, pues en virtud de las cargas iónicas tienden a neutralizarse entre sí y se incapacita su actividad interfacial.

Los emulsivos no iónicos son totalmente covalentes y no tienen ninguna tendencia a la ionización. Por consiguiente, puede asociarse con otros agentes no iónicos de actividad interfacial y con agentes aniónicos o catiónicos. Los emulsivos no iónicos son mas inmunes contra la acción de electrolitos que los agentes aniónicos de actividad interfacial.

#### **1.4.1– Comportamiento reológico de emulsiones**

El comportamiento reológico de las emulsiones depende fundamentalmente del diámetro promedio de las gotas de la fase interna (bitumen) así como de la concentración de esta. Obviamente al aumentar la concentración de la fase dispersa, aumenta la viscosidad de la emulsión ya que la viscosidad del bitumen es mucho mayor que la viscosidad del agua.

Con respecto al diámetro promedio de gotas, los investigadores obtuvieron que al disminuir el diámetro promedio de gotas, ocurre un aumento pronunciado de la viscosidad de la emulsión y, esto se debe a que ocurre un elevado aumento del área interfacial lo cual promueve mayor interacción entre la fase dispersa. Al monitorear la viscosidad de diferentes emulsiones monomodales en el tiempo, se observó poca variación de esta, indicando de esta manera que las emulsiones monomodales son estables.

Por otra parte las emulsiones con distribución normal se comportan como un fluido no – Newtoniano del tipo pseudoplástico (la viscosidad disminuye al aumentar la tasa de deformación), el cual se acentúa más a medida que disminuye el diámetro promedio de gotas.

Las emulsiones de viscosidad controlada se caracterizan por poseer una distribución de diámetro de gotas bimodal. Estas emulsiones se forman mezclando en ciertas proporciones emulsiones con distribuciones de diámetros monomodales que tienen diámetros promedios bien diferenciados, generando de esta manera emulsiones que poseen características reológicas completamente diferentes a las emulsiones de partida.

Estas emulsiones se denominan "de Viscosidad Controlada" ya que la viscosidad de estas se puede controlar con un alto grado de precisión variando la relación  $D_g/D_p$  (Diámetro de gota grande a diámetro de gota pequeña).

Los cambios de viscosidad para una emulsión con un contenido total de bitumen de 70% (p/p) formada mezclando emulsiones de 4 y 20 micras de diámetro promedio de gotas se observa, que a medida que aumenta, la fracción de emulsión con un diámetro promedio de gotas de 4 micras en la mezcla, la viscosidad disminuye progresivamente, hasta alcanzar un valor mínimo a partir del cual comienza a aumentar nuevamente. El valor mínimo de viscosidad corresponde al de una mezcla que contiene aproximadamente 25% (p/p) de emulsión, con gotas de 4 micras, y 75% (p/p) de emulsión con gotas de 20 micras.

Cabe añadir que el mínimo de viscosidad observado, corresponde a un valor de viscosidad que es al menos dos órdenes de magnitud menor que el de la emulsión de partida con menor viscosidad; es decir, al de la emulsión de 20 micras de diámetro promedio de gotas. A manera de ilustración podemos decir que si la viscosidad de la emulsión de 20 micras fue de unos 2000 *mPa.s* a 30°C y 1/s, la de la mezcla, en el mínimo de viscosidad fue de 60 *mPa.s*, bajo las mismas condiciones.

La existencia de una relación en peso óptima (25% de emulsión con gotas pequeñas) entre las fracciones de gotas grandes y pequeñas, requerida para obtener la mínima viscosidad de la mezcla, se debe a que a esa relación los intersticios existentes entre las gotas grandes, se encuentran completamente ocupados por las gotas pequeñas, de forma tal que la fase continua se distribuye uniformemente por toda la emulsión. A fracciones menores de gotas pequeñas, no habrá suficiente cantidad de gotas para forzar la salida de toda el agua de los intersticios, mientras que a fracciones mayores, el número de gotas pequeñas es lo suficientemente elevado para interactuar entre sí y con las gotas grandes, lo que origina por tanto, altas viscosidades.

### 1.5- Viscosidad de mezclas y sistemas coloidales

Se ha estudiado por años la reología de los sistemas coloidales. Desafortunadamente, la mayoría de las aproximaciones matemáticas basadas en sistemas ideales, son de uso limitado para definir el comportamiento reológico de las emulsiones. La viscosidad y otras características de las emulsiones están interrelacionadas, haciendo complicado el trabajo de señalar los principales parámetros que afectan su comportamiento. 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.

"Cuando se investiga el comportamiento de las emulsiones sometidas a cizalleo por debajo de  $(\tau_0)$ , la estructura interna sufre alteraciones mínimas y las emulsiones que tienen flujo plástico sometidas a esfuerzos constantes pequeños se vuelven viscoelásticas." (Romo, 1993).

La viscosidad de mezclas binarias de líquidos misibles puede calcularse mediante la ecuación propuesta por Kendall- Monroe, (Perry et al. 1973)

$$\mu_m^{\frac{1}{3}} = x_1 \cdot \mu_1^{\frac{1}{3}} + x_2 \cdot \mu_2^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots (1.2)$$

Donde  $x_1$  y  $x_2$  son fracciones molares de los líquidos que constituyen la mezcla y  $\mu_1$  y  $\mu_2$ , la viscosidad de los líquidos puros a la temperatura de la mezcla. Esta ecuación da buenos resultados para líquidos no asociados y cuya diferencia de viscosidad no sea mayor a 15 m Pa.s.

Para suspensiones líquidos sólidos Mori y Ototake proponen la ecuación siguiente (Perry et al., 1973).

$$\mu_m = \mu_l \cdot \left( 1 + \frac{1,56 \cdot \phi_s}{0,52 - \phi_s} \right) \dots \dots \dots (1.3)$$

En la que  $\mu_l$  es la viscosidad de la fase líquida y  $\phi_s$ , la fracción volumen de sólidos. Esta ecuación es bastante precisa para valores de  $\phi_s$ , menores de 0,1. Para valores de  $\phi_s = (0,5 \dots 0,9)$  Hatschek propone la ecuación.

$$\mu_m = \mu_l \cdot \left( \frac{1}{1 - \phi_s^{\frac{1}{3}}} \right) \dots \dots \dots (1.4)$$

La viscosidad de la emulsión está relacionada a la viscosidad de la fase interna, cuando las partículas proceden como líquido, por una ecuación derivada de la ecuación propuesta por Einstein (Martínez et al., 2001).

$$\frac{\mu}{\mu_o} = 1 + 2,5 \cdot \left[ \frac{\mu_i + 0,4 \cdot \mu_o}{\mu_i + \mu_o} \right] \cdot \phi \quad (1.5)$$

Según Boussad, (1997), los principales factores que intervienen en la viscosidad de las emulsiones de petróleo son:

- Viscosidad de la fase continua ( $\mu_o$ )
- Viscosidad de la fase dispersa ( $\mu_i$ )
- Temperatura
- Intensidad del trabajo mecánico
- Concentración de la fase dispersa (fracción de volumen  $\phi$ )
- Efecto electroviscoso
- Distribución del tamaño de partícula
- Agentes emulsificantes
- Propiedades del petróleo
- Contenido de sales del petróleo

### **1.6– Aplicación del transporte de petróleo por tuberías**

En el mundo del petróleo los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el transporte del crudo. El paso inmediato al descubrimiento y explotación de un yacimiento es su traslado hacia los centros de refinación o a los puertos de embarque con destino a exportación.

La pipe-line de petróleo crudo (oleoducto), es el complemento indispensable y a veces el competidor del navío de alta mar: en efecto, conduce el petróleo del yacimiento situado a una distancia más o menos grande de tierra adentro, al puerto de embarque del yacimiento submarino a la costa más cercana; del

yacimiento directamente a la refinería o finalmente, del puerto de desembarco a la refinería.

El transporte de petróleo tiene dos momentos netamente definidos: el primero es el traslado de la materia prima desde los yacimientos hasta la refinería donde finalmente será procesada para obtener los productos derivados; el siguiente momento es el de la distribución propiamente dicha, cuando los subproductos llegan hasta los centros de consumo.

Los oleoductos troncales (o principales) son tuberías de acero cuyo diámetro puede medir hasta más de 40" y que se extienden a través de grandes distancias, desde los yacimientos hasta las refinerías o los puertos de embarque. Están generalmente enterrados y protegidos contra la corrosión mediante revestimientos especiales.

El petróleo es impulsado a través de los oleoductos por estaciones de bombeo, controlados por medios electrónicos desde una estación central, que hacen que el petróleo avance continuamente a 1.5 m/s.

La instalación de oleoductos requiere gran cantidad de estudios previos, en los cuales se tiene en cuenta todo lo que puede acortar o beneficiar el proceso de transporte. Por caso, la construcción de un oleoducto o gasoducto que puede tener que cruzar montañas, ríos o desiertos, constituye una gran tarea de ingeniería. Hoy por hoy, el sistema de transporte de hidrocarburos por tuberías resulta tan eficiente y económico que existen miles de kilómetros de ellas.

#### **1.6.1– Ventajas de transporte por sistemas de tubería**

El transporte por tuberías, consiste en el traslado de un fluido, gas o partículas del mineral suspendas en un flujo de agua a través de una tubería; este tiene una gran aplicación en la industria, en el laboreo de minas, además en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos.

En la actualidad en las industrias cubanas se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge el este tipo de transporte debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte.

La efectividad de este tipo de transporte crece principalmente debido a la imposibilidad de cambio por otro tipo, la posibilidad de simplificar la longitud de la vía de transporte por tuberías en comparación con el ferroviario y el automotor, debido, al relieve del lugar ante gastos no elevados en la preparación y homogenización de los materiales con una productividad anual de la instalación superior.

El transporte por tuberías de materiales líquidos, sólidos y gases en comparación con el transporte ferroviario, los transportadores y la vía automotriz pose esta determinada por las significativas ventajas que este presenta sobre los demás tipos de transporte:

- Garantiza un proceso tecnológico continuo disminuyendo considerablemente el volumen de las operaciones principales.
- Ausencia de formación de polvo.
- Facilidad en la variación a la dirección y superación de obstáculos.
- Ausencia de vías de transporte especiales.
- Eleva la productividad del trabajo.
- Poca necesidad en servicio personal
- Posibilita la automatización de todo el proceso de transportación.
- No existen perdidas del material durante su transportación.
- Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.
- El material puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.

La desventaja principal de este tipo de transporte pertenece a la necesidad de tener suficiente reserva de agua y la dependencia de la capacidad de tráfico de la tubería, gastos de energía, desgaste de la tubería debido a la granulometría y propiedades del material a transportar, sin embargo estas desventajas son compensadas con las ventajas y en el caso de transportar petróleos y emulsiones la mayoría de estas desventajas no interviene en el proceso.

Las investigaciones dentro del transporte hidráulico, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos se han desarrollados en tres direcciones fundamentales:

- Trabajos experimentales con la posterior generalización de resultados.
- Trabajos teóricos. En ellos se trata de hallar la expresión matemática y la aplicación física de los procesos que tienen lugar cuando se trasladan partículas sólidas suspendas en fluidos líquidos.
- Trabajos que buscan el enlace de la teoría con los trabajos prácticos.

### **1.7- Conclusiones del capítulo**

- Se hace referencia en general, al estudio de las propiedades superficiales y de flujo de suspensiones acuosas con partículas, pulpas minerales (de lateritas férricas, bentonitas, arcilla, cemento, etc.) así como los polímeros y emulsiones de combustibles pesados y extrapesados. Se ha encontrado muy poca información sobre estos aspectos para los petróleos de cuba y emulsiones preparadas con estos.
- Es insuficiente la información acerca del flujo de petróleo cubano y emulsiones a través de tuberías, de ahí la necesidad del estudio experimental de este sistema, en particular.
- La esencia física de los procesos de flujo de líquido coloidales heterogéneos es poco conocida.

## **INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO**

### **2.1- Introducción**

Los conocimientos Teórico acerca del comportamiento y propiedades de flujo de emulsión de petróleo crudo cubano, contribuyen a la selección de métodos apropiados para la resolución de problemas asociados al transporte del fluido en estudio a nivel de la industria cubana; en tal sentido el **objetivo** del capítulo es:

*Establecer la investigación teórica y modelos de flujos asociados a fluidos no newtonianos, que describan comportamiento según las propiedades de transporte de las emulsiones del petróleo crudo cubano.*

### **2.2- Modelos reológicos de fluidos**

El término reología fue sugerido en 1929 por Eugene Cook Bingham para definir la rama de la Física que tiene por objeto el conocimiento de la deformación o flujo de la materia. La reología es la ciencia del flujo y la deformación; estudia las propiedades mecánicas de los gases, líquidos, plásticos, sustancias asfálticas y materiales cristalinos.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtoniano y no newtoniano (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Díaz, 1989). A su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos. Como objetivo de este capítulo se establece, la caracterización de los principales factores y parámetros relacionados a las propiedades de transporte de fluidos complejos y en específico a los casos de estudio.

Desde el punto de vista reológico los fluidos se clasifican en dos grupos:

- Newtonianos.
- No Newtonianos.

Los modelos más difundidos, (Garcell, 1988; Turro, 2002) son los tratados en este tópico. En los *fluidos newtonianos* existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y los líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como *fluidos newtonianos*; la viscosidad de estos fluidos es

constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y del gradiente

de velocidad  $\left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right) = (\dot{\gamma})$ . (Figura 2.1-a).

$$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right) \quad (2.1)$$

Los *fluidos no newtonianos* presentan como característica fundamental el hecho de que su viscosidad es función del gradiente de velocidad, y, por tanto, cambia con la variación de dicho gradiente, aún cuando se mantenga la temperatura y otras condiciones constantes. Según la variación de la viscosidad los materiales no newtonianos se clasifican a su vez en tres grupos:

1- De viscosidad independiente del tiempo.

- **Seudoplásticos**: Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ( $\tau > 0$ ). Su curva de flujo se describe por el modelo de Ostwald de Waele (para  $n < 1$ ). (Figura 2.1-b).

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)^n \quad (2.2)$$

Donde:

n - índice de la ley de potencia, (adimensional).

K - índice de consistencia, (Pa. s).

El parámetro n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para  $n < 1$  el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante. Para  $n = 1$ , la ecuación 2.2 se transforma en la ley de Newton, siendo  $K = \mu$ . El parámetro K es el índice de consistencia, el cual da una medida del grado de viscosidad del material.

Para los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente ( $\mu_a$ ). De acuerdo con la (ecuación 2.1) la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.3)$$

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (2.2) se obtiene:

$$\mu_a = K \cdot \left( \dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.4)$$

- **Dilatantes:** Sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ( $\tau > 0$ ). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para  $n > 1$ ). (Figura 2.1-c).
- **Plásticos ideales:** Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial ( $\tau_0$ ), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe. (Figura 2.1-d).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Donde:

$\tau_0$  - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

$\mu_p$  - Viscosidad plástica.

Para  $\tau_0 = 0$  la ecuación 2.5, se transforma en la ley de Newton, siendo  $\mu_p = \mu$ . La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene, combinando la ecuación 2.5 en la ecuación 2.3.

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

- **Plásticos reales:** Sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que  $\tau_0$ . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley. (Figura 2.1-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot \left( \dot{\gamma} \right)^n \quad (2.7)$$

Los parámetros  $\underline{k}$ ,  $\underline{n}$  y  $\underline{\tau}_0$ , tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para  $n = 1$ , la ecuación

2.7 se transforma en el modelo de Bingham, para  $\tau_0 = 0$ , en el modelo de Ostwald de Waele, y para  $\tau_0 = 0$  y  $n = 1$  se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 2.7 y 2.3, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \cdot \left( \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \right)^{n-1} \quad (2.8)$$

## 2- De viscosidad dependiente del tiempo

- **Tixotrópicos**: La viscosidad de estos materiales disminuye con el tiempo, cuando están sometidos a un gradiente de velocidad determinado. Se comportan reológicamente como pseudoplásticos, plásticos ideales y reales. (Figura 2.2-a).
- **Reopécticos**: La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes. (Figura 2.2-b).

## 3- Viscoelásticos ó de Maxwell:

Estos materiales exhiben propiedades viscosas y elásticas. Las sustancias viscoelásticas fluyen bajo la acción del esfuerzo cortante, pero, aunque la deformación es continua no resulta totalmente irreversible, de manera que al cesar la acción del esfuerzo cortante, el material restablece en parte su forma, semejante al comportamiento de los cuerpos elásticos sólidos. Este comportamiento se ha observado en NAPALM, en soluciones de polímeros, en masas cocidas de la industria azucarera con altos contenidos de gomas (polisacáridos), en ciertas resinas y en emulsiones de crudo cubano, de acuerdo a lo reportado por (Toose, 1995) y (Ferro, 2000).

### 2.2.1- Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad;  $\tau$  contra  $-(dv/dy)$ , se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

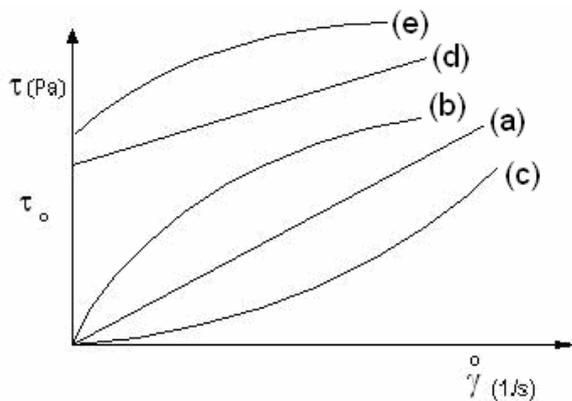


Figura 2.1. Curvas de flujo típicas: (a)- Newtonianas; (b)- Seudoplásticas; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

**Fuente:** Garcell, 2001.

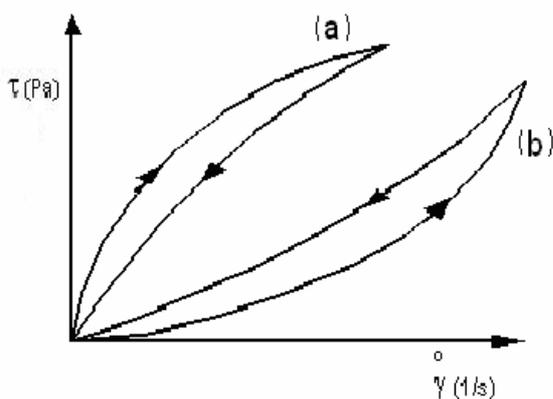


Figura 2.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

**Fuente:** Garcell, 2001.

Las curvas de flujo son útiles, fundamentalmente, en el diseño de equipos o en la evaluación de instalaciones ya construidas, por ejemplo, para determinar la caída de presión necesaria para que un material no newtoniano fluya por una tubería de diámetro conocido, para determinar si un equipo ya construido ( con el fin de transportar o elaborar un material determinado), puede ser usado con otro material diferente: para clasificar los materiales reológicamente y encontrar el modelo adecuado, para comparar características estructurales o de calidad de un mismo producto obtenido sin producciones *batch* y que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro. En el anexo 1, se pueden observar otros tipos de modelos reológicos empleados, que no se han descrito en el trabajo.



$$\sum F = \frac{\Delta P_f}{\rho} + (\text{pérdidas locales.}) \quad (2.10)$$

$\Delta P_f$  - es la caída de presión por fricción asociada con el flujo totalmente desarrollado a través del sistema de flujo.

El término  $(\Delta P_f/\rho)$  se refiere a los tramos de tuberías rectas, y por lo general, es el componente dominante en la mayoría de los sistemas de tuberías, excepto en aquellos casos en los que esos tramos sean cortos y el número de accesorios y válvulas sea grande.

Para el flujo no newtoniano, los términos  $E_c$  y  $\Delta P_f$  dependen de la naturaleza reológica del fluido, y, por tanto, de los parámetros característicos del modelo reológico que describe la curva de flujo.

El término  $W_s$ , para el caso de las bombas, se expresa como:

$$W_b = \frac{\Delta P_b}{\rho} = \frac{P_d - P_s}{\rho} \quad (2.11)$$

Siendo:  $(\Delta P_b)$  el incremento de presión de la bomba en la descarga ( $P_d$ ), en relación con la presión de succión ( $P_s$ ).

El término de energía cinética promedio por unidad de masa puede ser estimado mediante la expresión siguiente: (Garcell, 2001).

$$E_c = \frac{\langle v \rangle^2}{2\alpha g_c} \quad (2.12)$$

El coeficiente  $\alpha$  es un factor de corrección para los perfiles de velocidad, en el caso de Fluidos pseudoplásticos en régimen laminar.

$$\alpha = \frac{(2n+1)(5n+3)}{3(3n+1)^2} \quad (2.13)$$

#### **2.4- Modelos matemáticos de pérdidas de presión durante el transporte de fluidos pseudoplásticos**

El cálculo de las caídas de presión para un fluido no newtoniano en flujo permanente, estacionario, con un diámetro constante, se obtiene partiendo de un análisis de la



El gradiente de velocidad se puede expresar en función de la velocidad media del fluido en la sección recta,  $v$ , y del índice de comportamiento al flujo  $n$ . Para los líquidos seudoplásticos y dilatantes, que se ajustan al modelo de Ostwald de Waele, la expresión es:

$$\gamma = \left( \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \cdot \left( \frac{8 \cdot v}{D} \right) \quad (2.16)$$

El esfuerzo de corte en la pared de un tubo, para todo fluido no newtoniano, independiente del tiempo y de acuerdo con los estudios de Rabinowisch-Mooney, será.

$$\tau_p = \frac{\Delta P_f \cdot D}{4 \cdot L} \quad (2.17)$$

Donde:

$\Delta P$  – Caída de presión por rozamiento, ( Pa )

$L$  – Longitud de la tubería entre los puntos de toma de presión, ( m )

Combinando la ecuación 2.17 y 215 con la ecuación 2.16 y transformándose el caudal por la velocidad, se obtiene.

$$\frac{D \cdot \Delta P_f}{4 L} = k \left( \frac{3n + 1}{4n} \cdot \frac{8u}{D} \right)^n = k' \left( \frac{8u}{D} \right)^n \quad (2.18)$$

Para el Fluido que cumple la ley de potencia, la ecuación para la caída de presión sería:

$$\Delta P_f = 2K \left[ \frac{3n + 1}{n} \right]^n \frac{v^n L}{R^{n+1}} \quad (2.19)$$

Este modelo es utilizado por diversos autores, Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para la estimación de pérdidas de cargas en tuberías rectas cuando se transporta fluidos seudoplásticos y dilatantes, en particular petróleos pesados y emulsiones. En estos trabajos no se especifica el régimen de flujo en que es valido este modelo.

El término de pérdidas de presión, puede estimarse mediante la ecuación de Weisbach – Darcy; para el flujo por tuberías rectas circulares, (valida para cualquier tipo de fluido).

$$\Delta P_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.20)$$

Donde:  $\lambda$  - es el coeficiente de fricción por rozamiento del fluido, (adimensional).

Este coeficiente se obtiene de forma experimental para cada tipo de fluido.



La potencia necesaria, para transportar el petróleo estaría dada por la deducción de la ecuación 2.20, de Weisbach – Darcy asumiendo el transporte de un fluido seudoplástico.

Para cualquier fluido, la potencia necesaria en  $W$ , para su transporte por una tubería será.

$$N_n = Q \cdot \Delta P \quad (2.26)$$

Tomando al caudal  $Q$  en ( $m^3/s$ ) y la caída de presión  $\Delta P$  en (Pa)

Incorporando la ecuación 2.20, luego de transformar el caudal por la velocidad, mediante la ecuación de continuidad, se tiene que asumiendo que es un fluido seudoplástico en régimen laminar.

$$N_n = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{a'}{Re'} \cdot D \cdot L \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.27)$$

El término  $a'$ , es un coeficiente que depende del régimen del fluido y de las características propias de este; se determina de forma experimental para cada fluido (Garcell, 2001).

Sustituyendo por la expresión del número de Reynolds y la viscosidad aparente para fluido seudoplástico; nos queda.

$$N_n = \frac{\pi}{8} \cdot a' \cdot \mu_a \cdot L \cdot v^2 \quad (2.28)$$

La viscosidad aparente, quedó expresada para fluido seudoplástico por la ecuación 2.4; sustituyendo la ecuación 2.16, (expresión del gradiente de velocidad), en la ecuación 2.4 y combinándola con la ecuación 2.28, queda una ecuación de potencia necesaria para transportar fluido seudoplástico.

$$N_n = \frac{\pi}{8} \cdot a' \cdot L \cdot v^2 \cdot K \cdot \left[ \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \cdot \frac{8 \cdot v}{D} \right]^{n-1} \quad (2.29)$$

En caso de que la tubería tenga diferencia de nivel entre el punto de carga y de descarga, hay que tener en cuenta la potencia estática (una potencia necesaria adicional); debido al efecto de la diferencia de altura, en este caso será el segundo término de la ecuación siguiente:

$$N_n = \frac{\pi}{8} \cdot a' \cdot L \cdot v^2 \cdot K \left[ \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \cdot \frac{8 \cdot v}{D} \right]^{n-1} + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta Z \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot v. \quad (2.30)$$

Con esta ecuación, es cómodo determinar la potencia que se necesita para transportar un fluido seudoplástico, como: el petróleo cubano, emulsiones de petróleo y otros; es valido aclarar que se deben conocer las propiedades reológicas de fluido transportado.

## 2.6– Materiales y técnicas utilizadas

Según lo propuesto por el centro de investigaciones del petróleo de Cuba; se definió un compuesto de crudos pesados de Varadero, Jaruco y Puerto Escondido en una proporción 77%, 11,5% y 11,5% respectivamente (Isla), teniendo en cuenta los resultados esperados en el periodo 1997-2010 en los trabajos de prospección, exploración y producción de Cuba, este compuesto está en el grupo de petróleos pesados (11 ° API). En el trabajo se analiza el comportamiento reológico y de flujo del petróleo compuesto anteriormente mencionado y la emulsión en agua, formuladas con un 70 % de petróleo 29 % de agua y 1 % de tensoactivo emulgente P.

### 2.6.1- Emulgente empleado

El emulgente cubano usado para la preparación de emulsiones combustibles - agua caracterizado por la mezcla de las fracciones de alquitranes sodificados y ácido piroleñosos de la pirólisis de materiales lignocelulósicos y alcohol etílico, más conocido como emulgente P, está compuesto en las siguientes proporciones, especificadas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Componentes del emulgente P.

Componentes	% volumen	
- Alquitrán Sodificado (Espumella)	1,0 - 1,2	27 - 35
- Ácido Piroleñoso	1,1 - 2,1	30 - 46
- Alcohol Etílico	1,0 - 1,2	27 - 35

Las soluciones planteadas para emulsionar el combustible solo contemplan la utilización de un agente tensoactivo o condiciones de preparación que aseguran solo la estabilidad de la emulsión bajo el efecto de la acción mecánica (Falcón et al., 1995). Sin embargo, resulta conocido para emulsiones directas (de aceite en agua) y también en las



Se toman como valores de  $\gamma$  los de la variable  $\dot{\gamma}$ , registrados en tablas según el fabricante del equipo, y determinados a partir del comportamiento de fluidos newtonianos. Los valores de  $z$  para el cilindro utilizado son los siguientes:

$$\text{Cilindro } S_2 \quad z_{s_1}=0,577 \quad z_{s_2}=5,78$$

El control de temperatura se obtuvo utilizando un termostato a más-menos 0,5 °C de precisión con dicho instrumento se realizaron las curvas de flujo de esfuerzo contra gradiente de velocidad a diferentes valores de temperaturas.

## **2.7– Características y propiedades del petróleo crudo cubano**

Las características físico – químicas del petróleo crudo cubano (compuesto Isla), son las de un petróleo pesado, con elevado contenido de azufre de 6,19%, o sea, altamente sulfuroso, tendencia a formar abundante carbón, elevados contenidos de aromáticos y asfaltenos, (Tabla de Anexo 2); y altas viscosidades a diferentes temperaturas. El contenido de asfaltenos representa casi la quinta parte del compuesto, lo que crea graves problemas en la producción, transporte y refinación del mismo. Por esta razón, el proceso de desasfaltenización debe ser el inicio de cualquier variante tecnológica para su procedimiento. A diferencia del resto de los índices de físico – químicos, el contenido de metales tiene valores relativamente bajos en este tipo de petróleo, el cual generalmente posee un alto contenido de metales. En la Tabla 2.2 se resumen las propiedades de petróleo compuesto mencionado anteriormente.

Fracción Diesel:(280 – 343 °C). Esta fracción tiene un rendimiento muy bajo de solo 7,09%. Posee, asimismo, bajo índice de cetano, que para el diesel regular es de 42 mínimos. Este valor de índice de cetano es producto del elevado contenido de aromáticos, los cuales prevalecen los saturados. Los hidrocarburos aromáticos influyen negativamente sobre este índice, dándole al diesel baja calidad de ignición. La acidez tiene valores relativamente superiores a lo especificado para el diesel regular que es de 0,6mg KOH/g máximo, lo que indica la presencia de ácidos y compuestos de azufre que le proporcionan un carácter corrosivo a la fracción. Esto se corrobora con el ensayo de corrosión que da un resultado muy superior a lo especificado.

Tabla 2.2. Componentes y características físico – químicas del petróleo cubano

<b>Características físico – químicas del compuesto</b>		
<b>Índices</b>		<b>Resultados</b>
<i>Densidad</i>	- ° API	11,0
	- kg/m <sup>3</sup>	987
<i>Viscosidad cinemática 40°C, cSt</i>		3158,05
<i>Temperatura de inflamación, °C</i>		69
<i>Nº de acidez, mg KOH/g</i>		3,78
<i>Carbón, % m/m</i>		12,16
<i>Cenizas totales, % m/m</i>		0,06
<i>Asfaltenos, % m/m</i>		16,77
<i>Azufre, % m/m</i>		6,19
<i>Agua, % v/v</i>		0,8
<i>Sedimentos por extracción, % m/m</i>		0,05
<i>Nitrógeno</i>		0,20
<i>Sales mg/l</i>		219,37
<i>Temperatura de craqueo, °C</i>		368
<i>Temperatura de congelación, °C</i>		10
<i>Temperatura de fluidez, °C</i>		13
<i>Composición hidrocarbonada, %</i>	- Saturados	20,93
	- Aromáticos	70,73
	- Resinas	3,55
<i>Contenido de ligeros hasta nC5, %</i>		1,5
<i>Níquel, ppm</i>		56,0
<i>Vanadio, ppm</i>		84,0

**Fuente:** Om et al., 2004.

**Residuos asfálticos:** La Tabla del Anexo 4, presenta las variaciones de las propiedades de los residuos obtenidos a diferentes profundidades de destilación. Se observa que a temperaturas entre 350 – 400 °C es posible obtener asfalto de penetración 150/200 y 45/65, que se especifican en Cuba. A temperaturas superiores a 400 °C los rendimientos sufren poca variación, de ahí el poco cambio en sus características. Las temperaturas de ablandamiento son relativamente bajas al compararse con las temperaturas que se alcanzan en el pavimento; en Cuba puede alcanzar los 70 °C. Estas temperaturas de ablandamiento son características de los residuos que se obtienen de petróleos que a la

profundidad que se obtienen (temperaturas muy bajas), todavía queda gran contenido de aceites. El soplado (oxidación) de residuos corrige este inconveniente pero puede afectar su ductilidad. Por esto conviene estudiar las condiciones de operación específicas para estos residuos que deben ser poco severas por los resultados que se reportan en otros trabajos con residuos de petróleos cubanos.

### - Normas que se tienen en cuenta en el análisis de combustibles

En el análisis de combustible se tienen en cuenta una serie de normas, las cuales están regidas por los estándares de la norma Internacional ASTM, formalmente reconocida como la Sociedad Americana para Prueba y Materiales es por la que se rigen los estados americanos y sirven como base para más de 130 industrias variadas, manufactura, gestión y actividades de regulación. ASTM Internacional, provee estándares que son aceptados y usados en investigación y desarrollo, prueba de productos, sistemas de calidad y transacciones comerciales alrededor del mundo. Las normas mas utilizadas son: ASTM D 440, ASTM D 240, ASTM D 287-92, ASTM D 1298, ASTM D 95-83, ASTM D 129-95, ASTM D 95-58, ASTM D 189-95, ASTM D 482, ASTM D 445-96, ASTM D 445-96, ASTM D 93-96, IP 285, IP 143-90.

### 2.8- Diseño de experimentos y procesamiento estadístico

Las situaciones en las que se puede aplicar el DEE son muy numerosas, en los cuales se observan una o más variables experimentales dependientes o respuestas ( $y$ ) cuyo valor depende de los valores de una o más variables independientes ( $x$ ) controlables llamadas factores.

El número de experimento cuando intervienen  $k$  factores, se pueden utilizar los diseños *factoriales completos* a tres niveles; que se determina con un arreglo de la función exponencial:

$$N = 3^k \quad (2.32)$$

Donde:

$N$ = Número de experimentos.

$K$ = Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que  $k=2$  luego, el número de experimento sería:  $N=3^2 =9$  experimentos.



El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100. \quad (2.38)$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot \frac{100}{n}. \quad (2.39)$$

Del cálculo de los errores relativos puntuales para cada uno de los diámetros de partículas se obtienen los siguientes resultados:

En la literatura (Torres, 2003) se hace un examen de los errores y sus posibles fuentes, se especifica que en cálculos de ingeniería una desviación del (20 – 25)% es satisfactoria, pues en cada error influyen los siguientes factores:

- ✓ Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser con menor precisión.
- ✓ Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- ✓ Los valores experimentales son promedios de las réplicas.
- ✓ Posibles errores de apreciación cometidos en las mediciones, por pequeñas oscilaciones que ocurren en los líquidos manométricos durante los experimentos.

## 2.9– Conclusiones del capítulo

- Quedan expuestos, los modelos matemáticos de la operación de sistemas de flujo en los procedimientos metodológicos tradicionales y los materiales y métodos que se emplean en la investigación y obtención de los parámetros energéticos del sistema.
- Se obtuvo un modelo matemático para la simulación de la potencia necesaria del fluido. Este modelo es válido para el cálculo de operación y la simulación operacional de sistemas de tuberías cuando se conocen las propiedades reológicas y de transporte del fluido empleado en las industrias de procesos.
- Se describen las propiedades características del petróleo crudo cubano; este material en un crudo pesado con alto contenido de azufre y malas propiedades de transporte.

---

**ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

---

**3.1- Introducción**

En los estudios precedentes, se ha comprobado que uno de los mayores errores que se cometen, es tratar como newtonianos a fluidos pseudo-plásticos, de aquí la importancia del análisis de estudios experimentales del comportamiento de sus propiedades de transporte, que permitan una mejor selección de los métodos de cálculo apropiados al modelo de fluido estudiado.

Como **objetivos** del capítulo se propone: analizar la influencia de los factores influyentes en el comportamiento de las emulsiones del crudo cubano, comprobando el grado de validación de los modelos propuestos en el capítulo II.

**3.2- Características reológicas**

A partir de los resultados de las propiedades reológicas de la emulsión, se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en función de la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), a diferentes temperaturas.

Con los resultados mostrados en la tabla 3.1 se construyen las curvas de flujo ajustando los datos experimentales, para ello se emplea el software profesional Microsoft Excel, se obtuvieron los parámetros del modelo matemático que relaciona la viscosidad con el gradiente de velocidad, así como, su coeficiente de correlación, quedando con el mejor ajuste el modelo de Oswald de Weale, conocido como Ley de Potencia, por ser este el más frecuente para estos tipos de fluidos (Placencia et al. 2000). Mediante el modelo se establecieron los distintos valores de las pendientes de los gráficos obtenidos; índice de consistencia e índice de flujo para cada temperatura experimentada.

**3.2.1- Resultados experimentales de las propiedades reológicas**

Para las emulsiones formuladas con un 70% de petróleo 29% de agua y 1% de tensoactivo (emulgente P), se trazaron las curvas características del esfuerzo de corte contra el gradiente de velocidad (Figura. 3.1), a partir de la lectura del reómetro para cada temperatura; determinándose, la forma típica del comportamiento reológico de la emulsión al experimentarse variaciones en la temperatura, resultados reflejados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del estudio reológico.

No	$\dot{\gamma}$ (1/s)	Esfuerzo de corte, $\tau$ (Pa)		
		15 °C	25 °C	35 °C
1	90	20,1	16,2	11,3
2	150	29,0	19,1	18,5
3	250	41,1	27,0	20,1
4	400	59,0	39,5	26,3
5	650	70,1	44,6	37,2
6	800	82,5	60,1	45,1
7	999	95,0	65,6	52,3
8	1230	111,3	80,0	65,2
9	1550	136,0	100,3	76,0

La figura 3.2 representa la dependencia entre; el gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte, para cada valor de temperatura.

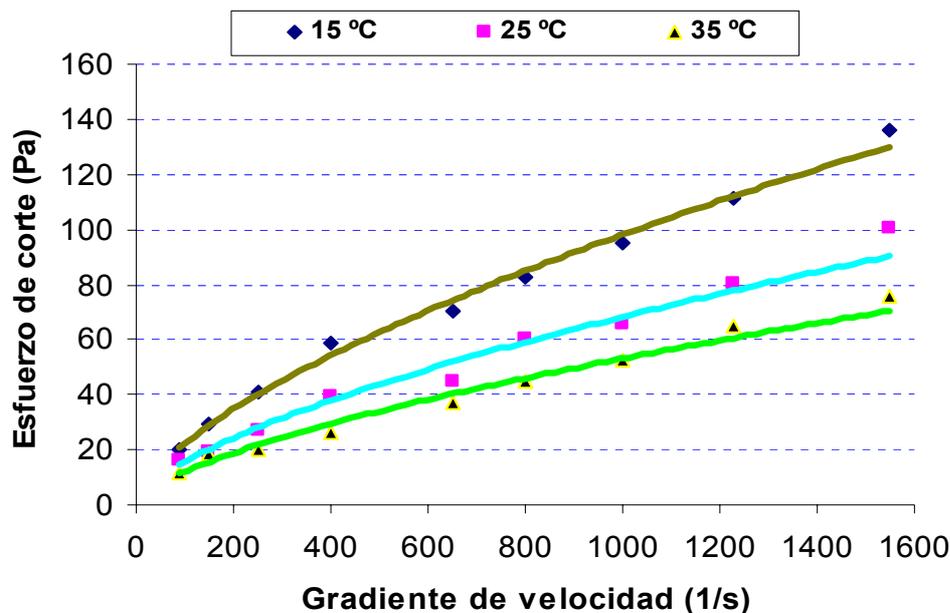


Figura 3.1: Dependencia entre el gradiente de velocidad y esfuerzo de corte

Se observa en la figura anterior, que las emulsiones estudiadas, poseen comportamiento pseudoplástico; sus datos han sido ajustados al modelo de Oswald de Waele, el cual está caracterizado por los parámetros reológicos: índice de consistencia (K) e índice de la ley de potencia (n).

### 3.2.2- Estimación de los parámetros reológicos

Al representar gráficamente los datos experimentales de  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$  se obtuvieron pseudocurvas de flujo (Figura 3.1) que, por su forma, corresponden al modelo reológico de Oswald de Weale, esto permitirá realizar el ajuste de los datos mostrados en las Tabla 3.1. El resumen del análisis estadístico se expone en la tabla 1 del Anexo 5.

En la tabla 3.2, se resumen los parámetros reológicos y los coeficientes de correlación obtenidos del ajuste del modelo reológico.

Tabla 3.2. Parámetros reológicos obtenidos y desviación media cuadrática.

No	Parámetros	Temperatura °C		
		15 °C	25 °C	35 °C
1	k(pa.s)	1,134	0,819	0,626
2	n(adim)	0,646	0,640	0,643
3	R <sup>2</sup>	0,998	0,981	0,982

El estadístico R<sup>2</sup> indica que el modelo se ajusta con un 98,1% como mínimo, de la variabilidad del esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes. El comportamiento reológico dentro de la misma muestra bajo diferentes condiciones de trabajo, fue el esperado (según Falcón et al., 1995; Placencia et al. 2000).

En los datos relacionados, se puede notar que al aumentar la temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, mientras que el índice de flujo, muestra variaciones poco significativas para el valor promedio de 0.64.

### 3.2.3- Comportamiento pseudoplástico de la viscosidad aparente

Para los materiales no newtonianos, es importante, que al analizar comportamiento de la viscosidad, se tenga en cuenta la influencia del gradiente de velocidad, es por ello que el concepto que debe usarse es el de la viscosidad aparente.

Los resultados que se muestran de la viscosidad aparente, se obtuvieron a partir de la ecuación 2.4. Empleando los resultados mostrados en la tabla 3.3 y sustituyendo en la ecuación 2.4, se grafica la viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad, lo

que permite obtener la figura 3.2, para determinar el comportamiento de la curva de viscosidad aparente en función del gradiente de velocidad.

Tabla 3.3: Resultados de la dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

no	$\dot{\gamma}$ (1/s)	Viscosidad aparente, $\mu_a$ (Pa·s)		
		15 °C	25 °C	35 °C
1	90	0,23	0,16	0,13
2	150	0,19	0,13	0,10
3	250	0,16	0,11	0,09
4	400	0,14	0,09	0,07
5	650	0,12	0,08	0,06
6	800	0,11	0,07	0,06
7	999	0,10	0,07	0,05
8	1230	0,09	0,06	0,05
9	1550	0,09	0,06	0,05

Los valores de la tabla 3.3 reflejan que la viscosidad aparente para la emulsión de petróleo cubano, no es constante; aspecto muy importante al trabajar con este tipo de fluido.

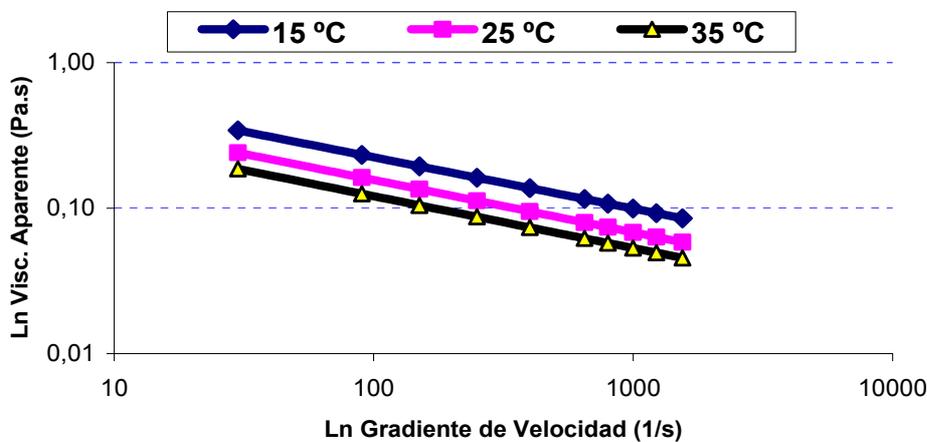


Figura 3.2: Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente.

En la figura 3.4, se observa, que los valores de viscosidad aparente en el caso de las temperaturas (15, 25 y 35 °C) disminuyen con el aumento de la temperatura. Basado en este análisis, se obtienen la dependencia de la viscosidad aparente en función de la temperatura.

### 3.2.4- Influencia de la temperatura en las propiedades reológicas

La emulsión estudiada, exhibe un comportamiento pseudoplástico, los valores del índice de consistencia,  $K$ , disminuyen con el aumento de la temperatura. La tabla 3.2 muestra que, los valores de  $n$ , para una misma emulsión varían poco con dicho incremento.

Este resultado permite establecer el comportamiento de la viscosidad aparente a partir de las variaciones de las temperaturas y establecer su variación para platear la curva que se observa en la figura 3.3.

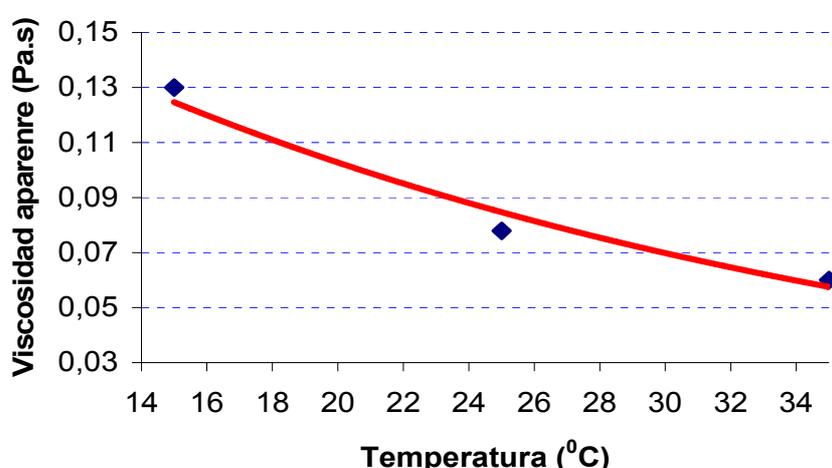


Figura 3.3. Comportamiento de la viscosidad aparente en función de la temperatura.

En la figura anterior se demuestra que la viscosidad y los parámetros reológicos disminuyen con el aumento de la temperatura. Este comportamiento es típico de las emulsiones directas (Romo, 1998; Placencia et al., 2000).

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de la emulsión, se representa mediante la ecuación 1.1, (ecuación de Andrade).

Con el empleo de los coeficientes relacionados en la ecuación 1.1, y determinado los valores de  $C = 0.22$ ,  $B = -0.039$ , y  $t \rightarrow$  Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) se determina la ecuación 3.1, que rige el comportamiento de la viscosidad aparente en función de la temperatura.

$$\mu_a = 0.22 \cdot e^{-0.039 \cdot t} \quad (3.1)$$

Con la figura 3.3 y los resultados de la ecuación 3.1 se obtienen los valores de tendencia de los puntos observados, estos tienen una relación exponencial con una probabilidad de

0.96; lo que indica el grado de exactitud, lo expuesto por otros investigadores (Garcell, 1993; Caldiño et al., 2004).

La función obtenida es útil para la obtención de la viscosidad aparente del fluido al variar la temperatura; nótese que es válida solo en el rango de temperaturas de 15 a 35 °C.

Se puede destacar que el grado de pseudoplasticidad de la emulsión, no presenta variaciones notables en el rango de temperaturas y gradientes de velocidades estudiadas.

El comportamiento del índice de consistencia másica respecto a la temperatura (Figura 3.5) nos permite determinar el modelo que relaciona ambas variables.

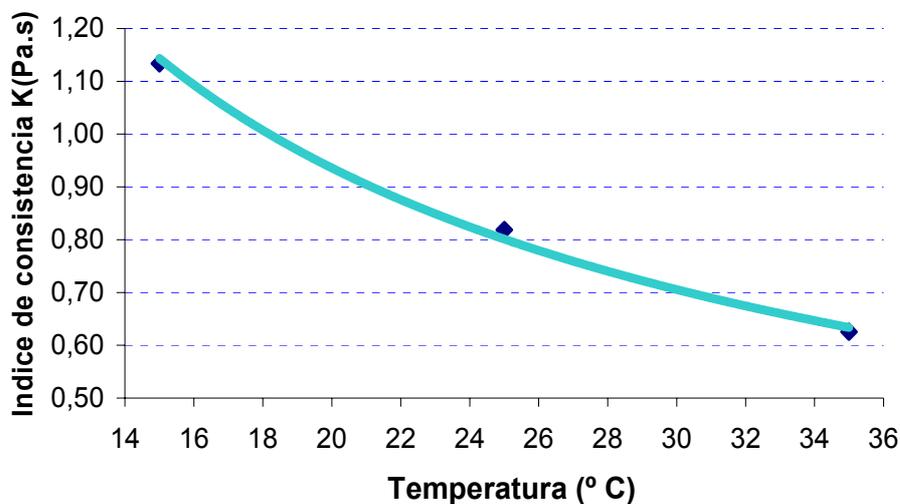


Figura 3.4. Comportamiento del índice de consistencia másica en función de la temperatura.

La figura 3.4 muestra la curva generalizada que permite estimar los valores de K como función de T, a una concentración dada, para un nivel de confianza del 98.9%.

La mayor influencia se ha reflejado en el índice de consistencia másica siendo proporcional a la viscosidad de la mezcla, además, al obtener valores de temperatura diferentes se puede determinar el valor de la consistencia másica y definir el modelo que aparece en la ecuación 3.2.

$$K = 7,54 \cdot t^{-0,697} \quad (3.2)$$

Donde:

$t$ : Temperatura (°C)

La ecuación para el índice K es obtenida para el modelo de la emulsión en las condiciones experimentales del presente trabajo, siendo válida para emulsiones formuladas con un 70

% de petróleo 29 % de agua y 1 % de tensoactivo (emulgente P) en peso y temperaturas en el rango de 15 – 35 °C.

Los resultados obtenidos del índice K (1,134; 0,819; 0,626), se corresponden con los calculados para las condiciones del tipo de fluido estudiado, lo que permite determinar que la temperatura tiene influencia sobre su comportamiento.

Esto demuestra que el índices de flujo (Tabla 3.2), es poco afectado por la concentración y por la temperatura, en los rangos señalados anteriormente para el índice K.

### 3.3- Análisis de los resultados de las pérdidas de carga

Los parámetros de las pérdidas de carga para la validación de los modelos, se obtuvieron de resultados de una investigación en instalación a escala de laboratorio. La misma consta de los siguientes elementos: un tanque, una bomba centrífuga, dos puntos de toma de presión y una tubería de una pulgada de diámetro (25,4 mm), la cual permitió determinar las pérdidas hidráulicas.

La regulación del caudal de la bomba se realiza con ayuda de una válvula de compuerta que se encuentra en la tubería de alimentación.

La pendiente hidráulica en  $(Pa/m)$ , se determina por la expresión.

$$i = \frac{\Delta P_{roz}}{L} \quad (3.3)$$

Los parámetros de transportación de la emulsión de petróleo se realizó a una temperatura alrededor de los 30 a 34 °C.

#### 3.3.1- Dependencia entre la pendiente hidráulica y la velocidad en tuberías circulares

En la tabla 3.4 aparecen los valores de los datos experimentales, los cuales fueron obtenidos a partir de la relación pendiente hidráulica y velocidad [ $i = f(v)$ ] para el flujo de la emulsión en las tubería de una pulgada, para cada resultado se determinó el coeficiente de fricción y el número de Reynolds.

Tabla 3.4. Resultados de la pendiente hidráulica (i) con la velocidad, coeficiente de fricción y el número de Reynolds.

no	Velocidad (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	i (Pa/m) Teórico	i (Pa/m) Experimental	Error Puntual (%)	$\lambda$	Re
1	0,11	0,2005542	1027,06	1012,10	1,479	4,382	14,61
2	0,14	0,2552508	1198,47	1165,12	2,863	3,157	20,28
3	0,19	0,3464118	1457,17	1446,01	0,771	2,084	30,71
4	0,20	0,364644	1505,79	1448,30	3,970	1,944	32,93
5	0,30	0,546966	1951,93	1916,60	1,843	1,120	57,16
6	0,40	0,729288	2346,52	2268,10	3,458	0,757	84,54
7	0,50	0,91161	2706,75	2689,03	0,659	0,559	114,51
8	0,60	1,093932	3041,75	2992,40	1,649	0,436	146,73
9	0,70	1,276254	3357,14	3268,11	2,724	0,354	180,96
10	0,80	1,458576	3656,66	3574,30	2,304	0,295	216,99
11	0,90	1,640898	3942,95	3870,00	1,885	0,251	254,69
12	1,00	1,82322	4218,00	4187,20	0,736	0,218	293,93
13	1,50	2,73483	5467,70	5499,21	0,573	0,125	510,18
14	1,80	3,281796	6144,42	6108,31	0,591	0,098	653,75
15	2,00	3,64644	6573,03	6620,56	0,718	0,085	754,46

El número de Reynolds (Re), que permite establecer el criterio de semejanza en diferentes condiciones de flujo y valida para fluidos pseudoplástico y dilatante según la naturaleza reológica del fluido se determina por la ecuación 3.4.

$$Re = \frac{8^{1-n} D^n v^{2-n} \rho}{K} \left( \frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (3.4)$$

El Re crítico donde culmina el régimen laminar es  $Re_{cr} = 2100$ . El régimen de transición se extiende hasta 4000. En los fluidos que siguen el modelo de Ostwald de Waele, el  $Re_{cr}$  puede estimarse en función de n (Garcell, 2001), el Reynolds crítico se determina por la siguiente ecuación.

$$Re_{cr} = 2100 + 875 \cdot (1 - n) \quad (3.5)$$

Así, a medida que n disminuye, alejándose de la unidad, el régimen laminar se extiende a valores mayores de Re.

Para el análisis de los resultados de la pendiente hidráulica, se compara los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos mediante el empleo del modelo

propuesto en el capítulo precedente (Ecuación 2.19), que estima las caídas de presión en una tubería cuando se transporta un fluido seudoplástico en régimen laminar; los parámetros  $n$  y  $K$  del modelo fueron escogidos en relación a la temperatura de experimentación.

El análisis se realiza con la utilización del programa Microsoft Excel, en el mismo se realiza el procesamiento estadístico de los resultados los cuales se muestran en la tabla 5 del Anexo 6, analizándose el error del modelo propuesto.

En la tabla 3.4, se dan los resultados de pendiente hidráulica (teórica y experimental), el error puntual de la predicción de modelo, así como el coeficiente de fricción ( $\lambda$ ) y ( $Re$ ).

Con los resultados obtenidos de la tabla 3.4 se realiza el comportamiento de la pendiente hidráulica con relación a la velocidad.

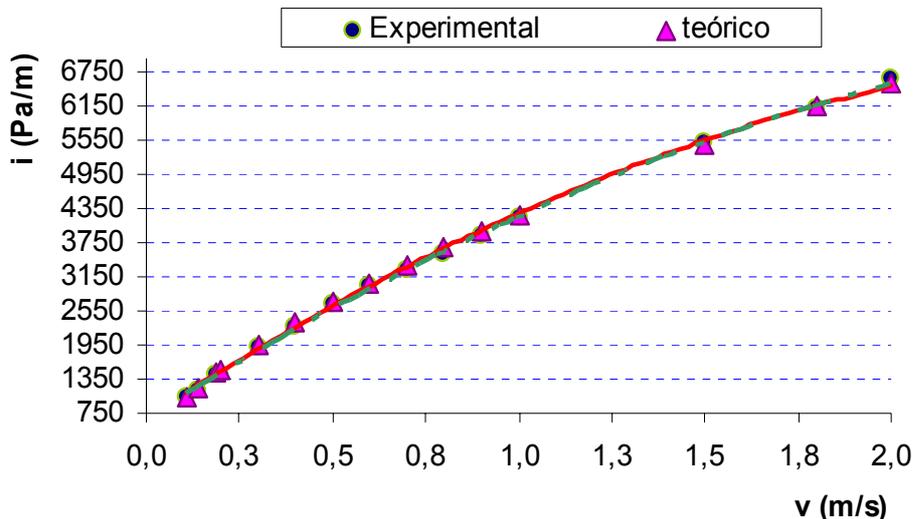


Figura 3.5. Pérdidas específicas de presión teórica y experimental en tubería circulares.

En las figura 3.5, se muestran las curvas de pérdidas específicas de presión teórica y experimental a 34 °C. En ellas se observa que durante el transporte de la emulsión se presentan, regímenes de movimiento laminar, debido a las condiciones en que se pudieron obtener los datos y el diámetro de la tubería en que se experimentó.

Del análisis del error puntual de cada experimento relacionado a la simulación del modelo, se puede destacar que a medida que aumenta la velocidad del fluido en la tubería, el error tiende a aumentar; esto se puede explicar aclarando que el modelo es sólo valido para el

régimen laminar de flujo y en algunos casos se puede aproximar al régimen de transición. En el régimen de flujo estudiado, el error puntual de modelo no superó el 3.97%, obteniendo una probabilidad de 95,7 %, lo que confirma la validez del mismo.

### 3.3.2- Correlación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds

La descripción matemática del proceso objeto de estudio queda expresada; partiendo de su descripción se deduce por;  $\lambda = f(Re)$ . Antes de expresar los resultados experimentales mediante parámetros adimensionales; se determina en cual de ellos está la magnitud buscada.

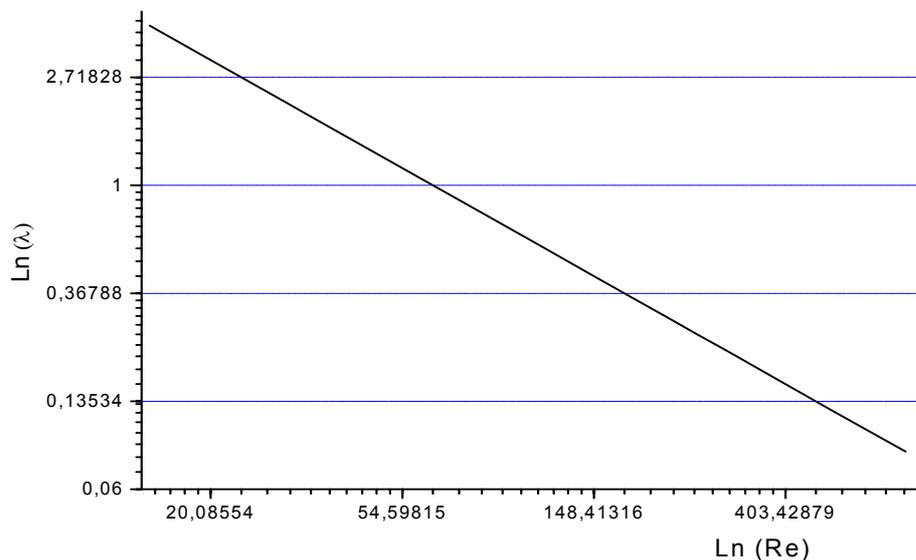


Figura 3.6. Correlación entre el factor de fricción y el número de Reynolds.

En la figura 3.6, se observa que el coeficiente de fricción es una función del Re para el régimen laminar, obtenida de los datos de la tabla 3.4. Sólo se analiza para valores bajos de Re; hasta 754, por no constar con datos experimentales fuera a esta zona.

Las magnitudes Re y  $\lambda$  se calculan con los resultados experimentales y de las mediciones. Generalmente, estos términos adimensionales se relacionan entre sí mediante la función potencial. Para fluidos seudoplásticos y dilatantes, se propone una relación del tipo de la ecuación de Blasius, cuyos coeficientes y exponentes son función del índice de flujo (n) (Garcell, 2001).

$$\lambda = \frac{a'}{\text{Re}^B} \quad (3.6)$$

Tomando los logaritmos:

$$\ln(\lambda) = \ln(A) - (B) \cdot \ln(\text{Re}) \quad (3.7)$$

$$B = \tan \theta$$

Analizando los resultados de la figura 3.6 se deduce que para el caso de la emulsión tratada, el factor de fricción ( $\lambda$ ) puede ser estimado para números de Re.

$$\lambda = \frac{64.01}{\text{Re}} \quad (3.8)$$

Esta ecuación es satisfactoria para el rango de datos experimentado la misma tuvo una correlación de 98,9 %; en el caso del régimen laminar, el coeficiente B, de la ecuación 3.6 toma el valor 1.

En el caso de los fluidos no newtonianos no existen suficientes evidencias del efecto de la rugosidad de la pared del tubo sobre el coeficiente de fricción en flujo turbulento; dado que la subcapa laminar, es mas gruesa en los fluidos no newtonianos que en los newtonianos (Darby, 2001; Ibarz et al., 2001; Macedo et al., 2001; Vélez, 2003). Es por ello que la mayoría de los autores desprecian el efecto de la rugosidad en el flujo no newtoniano, y consideran como si el flujo tuviera lugar a través de tubos lisos. En estas notas se sigue esa misma práctica.

### 3.4– Análisis del modelo de estimación de la potencia necesaria de transporte

La potencia que se necesita para transportar un fluido en una tubería a una distancia determinada, constituye el indicador económico principal en un sistema de transporte, por lo que se hace necesario un método que brinde esta información a partir de las propiedades reológicas del fluido y las condiciones de la línea de tubería. En este análisis, se propone comprobar los valores de las características teóricas y experimentales de la potencia; asegurando que el error de predicción del modelo sea mínimo, lo que posibilitará conocer si es aplicable o no al transportar emulsiones de crudo cubano.

La potencia específica expresada en ( $W/m$ ); se define por, la potencia que se necesita para transportar un fluido determinado a una distancia  $L = 1$  m, se determina por la expresión.

$$Ne = \frac{N_n}{L} \quad (3.9)$$

En esta identificación, solo se analiza el modelo propuesto (ecuación 2.29), debido a que los datos experimentales se tomaron en una tubería horizontal, de haber tenido inclinación se podía analizar además la ecuación 2.30, que tiene en cuenta la potencia por diferencia de nivel. En la tabla 3.5, se exponen los resultados del análisis.

Tabla 3.5: Resultados del análisis del modelo de potencia necesaria.

no	Velocidad (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	<i>i</i> (Pa/m) Experimental	Ne (W/m) Experimental	Ne (W/m) Teórico	Error Puntual
1	0,11	0,2005542	1012,10	0,056	0,050	11,322
2	0,14	0,2552508	1165,12	0,083	0,075	9,213
3	0,19	0,3464118	1446,01	0,139	0,123	11,602
4	0,20	0,364644	1448,30	0,147	0,134	8,656
5	0,30	0,546966	1916,60	0,291	0,260	10,714
6	0,40	0,729288	2268,10	0,459	0,417	9,244
7	0,50	0,91161	2689,03	0,681	0,601	11,738
8	0,60	1,093932	2992,40	0,909	0,810	10,921
9	0,70	1,276254	3268,11	1,159	1,044	9,891
10	0,80	1,458576	3574,30	1,448	1,299	10,300
11	0,90	1,640898	3870,00	1,764	1,576	10,656
12	1,00	1,82322	4187,20	2,121	1,870	11,818
13	1,50	2,73483	5499,21	4,178	3,640	12,869
14	1,80	3,281796	6108,31	5,568	4,911	11,806
15	2,00	3,64644	6620,56	6,706	5,830	13,062

El error puntual, en todos los casos, se encuentra por debajo del 13,06%; para el intervalo evaluado, se encontró que el modelo obtuvo un error promedio de 10.92% y una probabilidad de predicción del modelo de 77.9%, esto confirma la validez de los resultados obtenidos a partir del método; el coeficiente del modelo,  $a' = 64.01$ , (Valor obtenido de los experimentos). El resumen del procesamiento estadístico se observa en la tabla 6 del Anexo 6.

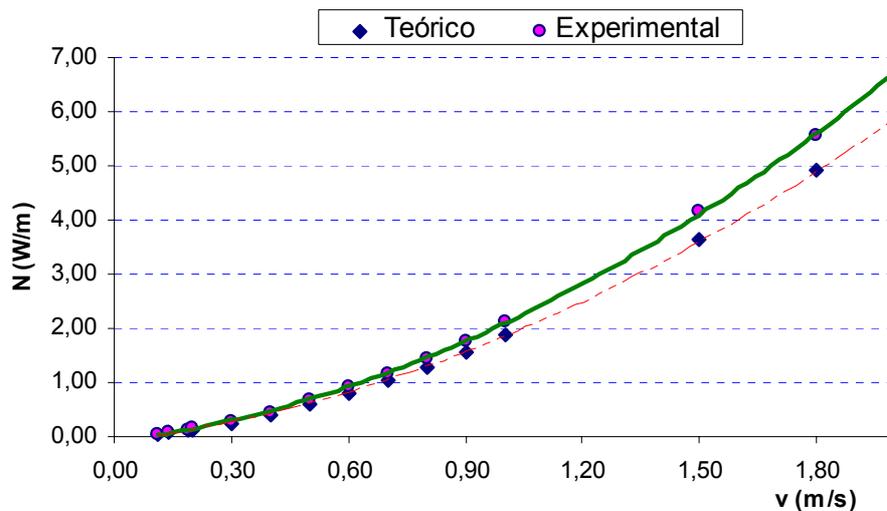


Figura 3.7. Comportamiento de la potencia en función de la velocidad

Al examinar el comportamiento del gráfico mostrado en la figura 3.7, se revela la tendencia al aumento de la potencia necesaria del sistema, cabe destacar que el coeficiente  $a'$ , se determina experimentalmente para cada régimen de flujo y cada tipo de fluido en específico. Las diferencias, entre la potencia teórica y la experimental con el aumento de la velocidad, se deben a que a medida que aumenta el número de Re, el coeficiente del modelo pierde su validez; se debe determinar este coeficiente para cada régimen de flujo.

### 3.5– Conclusiones del capítulo

- Las emulsiones de petróleo pesado en agua estudiadas presentan un comportamiento pseudoplástico, de acuerdo a los reogramas experimentales analizados. Al incrementar la temperatura, la viscosidad aparente para el caso de las tres temperaturas experimentadas (15, 25 y 35 °C) disminuye con el aumento del gradiente de velocidad.
- Los valores de índice de flujo calculados, indican que su valor se ubica entre 0.646 y 0.640, notándose la poca influencia que ejercen las variaciones de las temperaturas tratadas en el comportamiento del índice de flujo.

- Para emulsiones de petróleo con las características estudiadas, las caídas de presión pueden ser estimadas por medio de la ecuación 2.16. El error puntual del modelo es inferior al 3.97%, lo que confirma la validez del mismo.

- El modelo de cálculo de potencia necesaria obtuvo un error promedio de 10.92% con una probabilidad de 77.9 %, lo que confirma la validez del mismo, al estar entre los rangos de estimación significativa para los cálculos energéticos [según lo recomendado por diferentes autores (Torres, 2003)].



Por lo tanto, el diámetro de la tubería se determina por la velocidad apropiada del fluido en movimiento. Para líquidos viscosos, la velocidad de transportación no debe sobrepasar 1 m/s, siendo el movimiento del líquido por su propio peso, sus velocidades ordinarias son de 0,2 a 1 m/s. En el transporte a presión, mediante bombas las velocidades son de 1 a 2 m/s (Kasatkin, 1985).

#### - Incremento de energía específica del líquido en la bomba

Otro problema que suele presentarse, es la evaluación del sistema de bombeo. En estos casos se requiere comprobar si la potencia de la bomba instalada es la adecuada. La altura creada por la bomba se compone del incremento de la altura piezométrica (altura estática) y del incremento de la energía cinética específica (altura dinámica). Si los diámetros, velocidad son iguales, se cumple (Garcell, 2001):

$$H_{bomba} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}; (m) \quad (4.2)$$

$$H_{bomba} = H_{necesaria} \quad (4.3)$$

Donde:

$p_1$  - Presión en la succión de la bomba (Pa).

$p_2$  - Presión en la descarga de la bomba (Pa).

$\gamma$  - Peso específico; ( $N/m^3$ ).

La característica friccional en una tubería, cuando se transporta la emulsión de petróleo, se ajusta a la ley de potencia. Puede expresarse por el modelo (régimen laminar de flujo) (Placencia et al., 2000; Ibarz, 2001).

$$H = R \cdot Q^n \quad (4.4)$$

$$R = \frac{\left[ \frac{6 \cdot n + 2}{n} \right]^n \cdot \mu_a \cdot L \cdot 4^{n+1}}{d^{3 \cdot n + 1} \cdot \gamma \cdot \pi^n} \quad (4.5)$$

Donde:

$n$  - es el índice de la ley de potencia (adimensional).

$\mu_a$  - Viscosidad aparente en ( $Pa \cdot s$ ).

### - Potencia necesaria para transportar el fluido

La potencia necesaria para transportar el fluido ( $kW$ ), es energía que se requiere entregar por la bomba a todo flujo del líquido por segundo. De la definición se deduce que esta potencia es igual.

$$N = 10^{-3} \cdot Q \cdot \gamma \cdot H_{necesaria} \quad .(4.6)$$

Donde:

$H_{bomba}$  - Altura creada por la bomba; ( $m$ )

$\gamma$  - Peso específico; ( $N/m^3$ )

La potencia necesaria, ( $W$ ), para transportar la emulsión de petróleo u otro tipo de fluido que se ajuste a la ley de potencia, será el modelo obtenido (ecuación 2,30). Este modelo esta en función de las propiedades reologicas y de flujo del fluido y las características de la línea de tubería. El coeficiente del modelo,  $a' = 64.01$ , (Valor obtenido de los experimentos).

$$N_n = \frac{\pi}{8} \cdot a' \cdot L \cdot v^2 \cdot K \cdot \left[ \frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \cdot \frac{8 \cdot v}{D} \right]^{n-1} + \frac{\pi}{4} \cdot \Delta Z \cdot \gamma \cdot D^2 \cdot v; \quad .(4.7)$$

### 4.3- Efecto económico de transporte

Una gran parte de los gastos capitales durante el transporte, lo constituye los gastos de energía eléctrica, su economía es una de las direcciones estratégicas de la producción en la actual etapa. Una correcta selección y organización en la explotación del equipamiento de bombeo en régimen económico permite el ahorro de la energía eléctrica y aumentar la efectividad del transporte de fluidos; Teniendo siempre presente los problemas que esta puede causarle al medio circundante (Laurencio, 2004).

### - Costo unitario de consumo energético para transportar un m<sup>3</sup> de emulsión de petróleo

Se define como costo unitario de transporte, al costo en que se incurre al transportar un metro cúbico de un fluido, a una distancia de un metro en una hora de trabajo. El mismo se expresa por la siguiente ecuación.

$$C_T = \left( \frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \quad (4.8)$$

Donde:

$C_T$  - Costo unitario de Transportación, *CUC*

$G_b$  - Gasto horario de la bomba, *CUC*

$Q$  - Caudal del fluido transportado, *m<sup>3</sup>/h.*

$L$  - Longitud de la línea, (*m*)

### - Gasto horario de la bomba

En este análisis solo se tienen en cuenta los gastos por consumo de energía eléctrica.

$$G_b = C_{elec} \quad (4.10)$$

Donde:

$C_{elec}$  - Costo por el consumo de energía eléctrica, *CUC*

$$C_{elec} = \frac{T_a \cdot N_n \cdot K_p \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \quad (4.11)$$

Donde:

$T_a$  - Tarifa de corriente eléctrica, *0.072 CUC / kw.h.*

$N_n$  - Potencia necesaria para transportar el fluido, entregada por la bomba.

$K_p$  - Coeficiente de pérdida, *1.04.*

$t_t$  - Cantidad de horas de funcionamiento.

$\eta_m$  - Rendimiento del motor eléctrico, (%)

$\eta_b$  - Rendimiento de la bomba, (%)

En la tabla 4.1, se resume el análisis del costo de energía eléctrica que incurre al transportarse la emulsión a diferentes caudales en la tubería a escala de laboratorio, una distancia de un metro y en una hora de trabajo; para el cálculo se asumen tres rendimientos de bombeo (60; 85 y 90 %). Para el cálculo del costo, se empleo la ecuación 4.11.

Tabla 4.1: Costo en CUC; para distintos rendimientos de bombeo, al transportar la emulsión en una pulgada a una distancia de un metro.

no	Q (m/h)	C <sub>elec</sub> (CUC)		
		$\eta$ (60 %)	$\eta$ (70 %)	$\eta$ (90 %)
1	0,201	0,000006	0,000005	0,000004
2	0,255	0,000009	0,000008	0,000006
3	0,346	0,000015	0,000013	0,000010
4	0,365	0,000017	0,000014	0,000011
5	0,547	0,000032	0,000028	0,000022
6	0,729	0,000052	0,000045	0,000035
7	0,912	0,000075	0,000064	0,000050
8	1,094	0,000101	0,000087	0,000067
9	1,276	0,000130	0,000112	0,000087
10	1,459	0,000162	0,000139	0,000108
11	1,641	0,000197	0,000169	0,000131
12	1,823	0,000233	0,000200	0,000156
13	2,735	0,000454	0,000389	0,000303
14	3,282	0,000613	0,000525	0,000409
15	3,646	0,000728	0,000624	0,000485

Estos resultados, brindan en cierta medida el costo por consumo de energía para transportar la emulsión del petróleo; es de notar que los costos son ínfimamente pequeños, se debe tener en cuenta que es el costo de transportación en una distancia de un metro para una tubería de una pulgada de diámetro (0,0254 m) en una hora de trabajo. En el grafico de la figura 4.1, se observa el comportamiento del costo en función del caudal trasportado. En este gráfico se nota de forma clara en que medida infiere el aumento del rendimiento en los costos de operación.

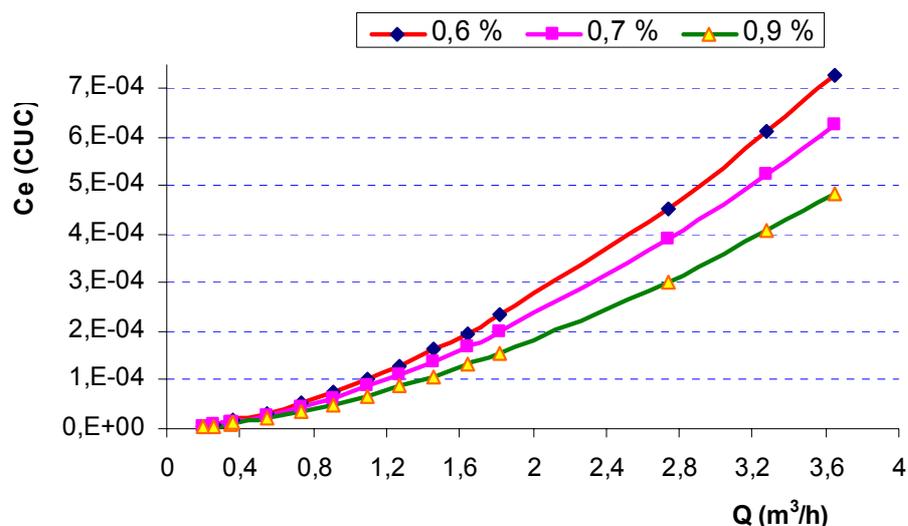


Figura 3.7. Comportamiento costo en CUC para distintos rendimientos de bombeo

#### 4.4- Principios medioambientales para el transporte y manipulación de emulsión de petróleo pesado

El impacto de las industrias de procesos y químicas al medio ambiente a nivel mundial, ha despertado una mayor conciencia ecológica y el sentir de la necesidad imperiosa de preservar la naturaleza. De ello, que en todo sistema para transporte de petróleo, es necesario tener presente la incidencia negativa al medio, las mismas se mencionan a continuación.

La protección del medio ambiente, es uno de los problemas científico - técnicos más complejos que enfrenta la humanidad actualmente. El desarrollo vertiginoso de la industria en los últimos años, ha llevado a niveles sin precedentes la contaminación de la atmósfera y las aguas con sustancias nocivas al hombre, los animales y plantas. Nuestro país, desde el triunfo de la revolución se ha desarrollado notablemente la industria, no está exento de esta problemática.

A nivel nacional, el transporte de petróleo por oleoductos en Cuba a partir de 1999 hasta el 2005 ha aumentado de un 21 hasta un 24%, siendo un claro reflejo del desarrollo actual de la industria petrolera cubana, el mismo ha actuado de significativamente en la protección al entorno.

### **- Persistencia y Biodegradación**

Tras su liberación en el entorno, el petróleo pesado se divide en pequeñas partes y no se expande con la rapidez de un petróleo menos viscoso. Cuando este se vierte en el agua será su densidad la que determine si el fuel quedará flotando sobre la superficie, si se hundirá o si permanecerá parcialmente sumergido. En el caso que flote, la pérdida de los componentes de menor peso molecular debido a su evaporación o disolución aumentará la densidad, provocando su hundimiento. Esta fracción pesada adoptará una consistencia similar a la del alquitrán y se fijará a sustratos expuestos a ella o será absorbido por materia particulada.

Las condiciones meteorológicas y la temperatura durante el periodo siguiente al vertido influyen significativamente en la *velocidad de dispersión*; las olas y el viento dispersarán el fuel dentro del agua, mientras que las altas temperaturas aumentarán la velocidad de evaporación de los hidrocarburos más ligeros. La temperatura del agua determina el alcance del impacto ambiental en caso de vertido, puesto que temperaturas altas favorecen tanto la pérdida de sus componentes más ligeros por evaporación como los procesos de degradación.

### **- Efectos humanos**

*Inhalación:* La mezcla de vapores sólo se produce cuando el fuel se encuentra a altas temperaturas, sin embargo, en condiciones normales de exposición, el riesgo es mínimo ya que, al no tener volátiles, no se pueden inhalar. No obstante, es necesario disponer de un equipo adecuado para el contacto con el fuel oil. El sulfuro de hidrógeno puede desprenderse en ciertas condiciones, como altas temperaturas. Este compuesto es altamente tóxico y los síntomas principales son: Irritación de ojos, nerviosismo, náuseas, cefaleas, insomnio y en casos severos, inconsciencia y muerte.

*Ingestión:* En caso de que ocurra se producirán náuseas y/o vómitos, también puede irritar el tracto gastrointestinal.

*Aspiración:* A causa de su alta viscosidad, la aspiración a los pulmones es sólo una remota posibilidad.

*Contacto con la piel:* A altas temperaturas pueden producirse quemaduras en caso que no se tomen precauciones y la higiene personal es pobre, existe la posibilidad de irritación en

ojos y piel y además se puede producir una dermatitis después de un contacto directo prolongado con la piel o incluso por la ropa empapada. En este caso también podría producirse acné y foliculitis. Algunos individuos pueden ser particularmente susceptibles a descamaciones en la piel y dermatitis. En casos muy raros se produce cáncer de piel, debido a los componentes cancerígenos que pueden estar presentes en el fuel oil.

#### **- Recomendaciones para la manipulación**

El almacenamiento y manipulación del petróleo pesado se efectúa en sistemas cerrados. Esto implica el empleo de tanques de almacenamiento provistos de un sistema de aislamiento, así como líneas de transferencia revestidas y provistas de un sistema de calentamiento

- Los tanques de almacenamiento situados en instalaciones terrestres, deberán estar recubiertos por paredes herméticas para evitar fugas de fuel en caso de rotura del tanque o vertido.

- Los espacios muertos en los tanques de almacenamiento se consideran espacios peligrosos y potencialmente inflamables (por la posible acumulación de gases). El equipamiento eléctrico empleado en este espacio debe cumplir las medidas de seguridad.

- Antes de entrar en el interior de un tanque, debe medirse su atmósfera con un medidor de oxígeno o un explosímetro. Además, debe comprobarse la presencia de sulfuro de hidrógeno con sensores electroquímicos o tubos indicadores.

#### **- Emulsiones de agua y petróleo**

El uso de emulsiones puede ayudar a resolver algunos de los problemas causados por la combustión del combustible. Entre otros, reducir la emisión de algunos contaminantes a la atmósfera, como las partículas inquemadas, sin perjudicar en forma significativa la eficiencia térmica de los equipos de combustión (Ocampo et al., 1997). Añade que el uso de la tecnología de emulsiones puede aplicarse a calderas que empleen el combustóleo nacional sin implicar modificaciones costosas.

Como ya se ha visto, las emulsiones presentan ciertos beneficios en su uso, sobretodo desde el punto de vista ambiental, cuando se compara con otras alternativas de combustible fósil. Sin embargo, desde el comienzo de su producción a escala comercial, ha presentado grandes dificultades para colocarse en el mercado, al punto que Bitor, la única productora del combustible se encuentra en dificultades económicas. La Orimulsión se utiliza en varios países del mundo como combustible para la producción de energía, pero su uso no ha sido tan difundido como esperaban sus productores, y esto se puede atribuir principalmente a dos factores que son: dificultades técnicas, y problemas de imagen.

Las emulsiones, cuando son utilizadas con la tecnología adecuada, representan una fuente de energía alternativa muy atractiva, sobretodo desde el punto de vista ambiental. Sin embargo, las fuentes de energía alternativas atractivas nunca son bien recibidas en el mundo del mercado energético. Las emulsiones no fueron la excepción a esto. Más que verdaderos obstáculos técnicos, han tenido que enfrentarse a poderosos intereses económicos y políticos, que no están dispuestos a compartir su posición con nadie. Esta historia se ha repetido muchas veces con otras nuevas tecnologías en el área energética, y por lo general lleva mucho tiempo y esfuerzo lograr un lugar dentro de este tan competitivo campo.

#### **4.5 – Conclusiones del capítulo**

1. Al implementarse los métodos descritos, se puede efectuar la simulación operacional del sistema para diferentes condiciones de operación, siendo esta una herramienta concreta para el análisis de explotación y diseño de sistemas de transporte industrial de fluidos.
2. Se destaca, la gran influencia que tiene el rendimiento de bombeo en el costo de transportación; aspecto este en el que se puede incidir a la hora de reducir los costos.
3. En las instalaciones de bombeo el principal agente contaminante es sulfuro de hidrógeno puede desprenderse en ciertas condiciones, como altas temperaturas, este compuesto es altamente tóxico y los síntomas principales son: Irritación de ojos, nerviosismo, náuseas, cefaleas, insomnio y en casos severos, inconsciencia y muerte.



## CONCLUSIONES GENERALES

---

- Las emulsiones de petróleo pesado, de acuerdo con los reogramas experimentales analizados, presentan un comportamiento pseudoplástico. Los valores de índice de flujo calculados, se ubican entre 0.646 y 0.640, notándose la poca influencia que ejercen las variaciones de las temperaturas experimentadas en el comportamiento del factor mencionado.
- De acuerdo con los resultados del análisis de las pérdidas de carga experimentales y teóricas, las caídas de presión para emulsiones de petróleo con las características estudiadas, se estiman mediante la ecuación 2.16. El error puntual del modelo no superó el 3,97% obteniendo una probabilidad de 95,7%, lo que confirma la validez del mismo.
- En la validación del modelo para el cálculo de potencia necesaria, se obtuvo un error promedio de 10.92%, siendo válido para el cálculo de operación de sistemas de tuberías cuando se conocen las propiedades reológicas y de transporte del fluido; para otros regímenes de flujo el error puede estar atribuido a la selección de coeficiente  $\alpha'$ .
- La simulación operacional del sistema para diferentes condiciones, es una herramienta concreta para el análisis de explotación y diseño de sistemas de transporte industrial de fluidos. La misma permite influir sobre el rendimiento de bombeo y en esencia en el costo de transportación.



## RECOMENDACIONES

---

- Considerar en futuras investigaciones, la obtención de las propiedades reológicas del petróleo crudo cubano en función de los factores que influyen en su comportamiento, que permita establecer el comportamiento de flujo según sus propiedades de transporte.
- Emplear el modelo propuesto en la ecuación 2.16, para estimar pérdidas de carga en tuberías que transporta emulsiones de petróleo crudo cubano en régimen laminar de flujo.
- Valorar el empleo de la ecuación 2.30, en los cálculos de la potencia necesaria del transporte de otro tipo de fluido de comportamiento pseudoplástico.
- Validar el modelo de cálculo propuesto de estimación de la potencia necesaria de transporte, en otros regímenes de flujo y condiciones donde se analice, la influencia de la diferencia de nivel de la tubería entre el punto de carga y la descarga.

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Adhikari B., Jindal V.K. *Artificial Neural: A New Tool for Prediction of Pressure Drop of Non-Newtonian Fluid Foods Through Tubes*. Journal of Food Engineering: 46, 43-51, 2000.
2. Banerjee T.P., M.Das y S.K. Das. *Non-Newtonian Liquid Flow Through Globe and Gate Valves*. Canadian Journal of Chemical Engineering: 72 (Abril), 207-211 (1994).
3. Bandala M. *Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos*. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México , 2001.
4. Boussad. *Reología de sistemas coloidales*, II congreso mundial de emulsiones, Bordeaux-Francia, 1997.
5. Brookfield. *Manual de Instrucciones del Viscosímetro Modelo DV-I*. Brookfield Engineering Laboratories, Inc. EU. , 1996.
6. Carpenter, R., *Magnetic Treatment for Scale, Paraffin, Carbon, etc.* in Fluids, Pacific Coast Oil Show & Conf., 1986.
7. Caldiño V. I., Salgado M. G. *Estudio experimental con mezclas agua-sedimentos orientado al cálculo de flujos de lodos y debris*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Jiutepec, Morelos, México. VII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. (2004).
8. Columbie M. O., *Estudio del transporte de fuel oil desde Mazut hasta la planta de Preparación Mineral perteneciente a la empresa "Ernesto Che Guevara"*, Tesis en Opción al título de ingeniero mecánico. ISMM, Moa, 2006. p.54
9. Cerpa A., y col., *Mineral – Content and Particle – Size Effects on the Colloidal Properties of Concentrated Lateritic Suspensions*. Clays and Clay Minerals, Vol.47, No.4, 515 – 521, 1999.
10. Cerpa, A., *Propiedades de flujo de suspensiones minerales lateríticas. Influencia de la mineralogía y de las propiedades coloido-químicas*. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Madrid, España, 1997.
11. Cerpa, A. y Garcell. L .R., *Propiedades superficiales y reológicas de suspensiones minerales lateríticas*. La Habana: Informe al evento Metalurgia 98, 1998.
12. Cerpa, A.y col., *Rheological properties of concentrated lateritic suspensions*. Prog. Colloid Polym Science, 1996, 100 (226): 6-12.

13. Charm, S., *Fundamentals of Food Engineering*. AVI Pub. Co. WestportConn.pp. 54-93, 1971.
14. Chen, T.Y., Mohammed, R.A., Bailey, A.I., Luckham, P.F., Y Taylor, S.E., *Dewatering of crude oil emulsions. Emulsion resolution by the application of an electric field, Colloids and Surfaces: Physicochemical and Engineering Aspects*, 83, 273-284, 1994.
15. Corney, J., *Magnetic Fluid Conditioner, Open Chapter in Well Treating*, The American Oil & Gas Reporter, V 34, No. 1., 1991.
16. Costa N. E., *Fenómenos de transporte*, Editorial Alambra S.A., Madrid, 1984.
17. CNE. *Programa de Desarrollo de las Fuentes Nacionales de Energía*. Comisión Nacional de Energía, 1993.
18. Darby R., *Laminar and Turbulent Pipe Flows of Non Newtonian Fluids*, in Flow Dynamics and Transport Phenomena.
19. De la Paz N. *Uso de la reología en la evaluación de la jalea dentífrica fluida*. Centro de Investigación y Desarrollo de Medicamentos, Rev Cubana Farm 2002;36(1):21-7
20. Díaz, A., *Manual de hidráulica aplicada*. Santiago de Cuba, Ediciones ISPJAM, 1990.
21. Falcón H. José; Brossard P. Luis; Carbonell M. José L.; Barreda T. Angel; Pacheco B. Pedro, *Emulgente para la preparación de emulsiones aguacombustible*. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial Certificado de Autor de Invención (45), 1995.
22. Ferro, A., *Estudio de la sustitución de las pinturas asfálticas convencionales por emulsiones de crudo cubano con emulgente P*. Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química, 2000.
23. Fredrickson A.G., *Principles and Applications of Rheology*, Prentice – Hall Inc., New York, 1964.
24. Foust A.S., L.A. Wenzel, C.W. Clump y L.B. Andersen., *Principles of Unit Operations*. John Wiley & Sons. Nueva York, EUA. pp. 541-558, 1980.
25. Garcell, L., *Características reológicas y mineralógicas de las pulpas limoníticas de Moa en períodos de sedimentación crítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería Química., 1984.
26. Garcell, L., *Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales*. *Revista Tecnología Química*, 1984, (2): 14-19.
27. Garcell L.R., Díaz A. y Surís G., *Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa*. Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1988.

28. Garcell, L., *Caracterización reológica de la pulpa de limonita de Moa*. *Revista Tecnología química*, 1992, (1): 5-9.
29. Garcell, L., *Comportamiento reológico de la pulpa laterítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.
30. Garcell, L., *Composición mineralógica de las suspensiones de limonita de Moa, en períodos de sedimentación normal y crítica*. Informe investigativo. ISPJAM, Facultad de Ingeniería química, 1993.
31. Garcell, L., *Relación entre las características de sedimentación y granulométricos de las pulpas crudas de Moa y la presencia de determinadas fases mineralógicas*. *Revista Tecnología Química*, 1995, 15(1): 19-23.
32. Garcell L.R. y col., *Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions*, *J. Colloid Interface Sci.*, 205, 470 – 475, 1998.
33. Garcell, L., *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.
34. García E.J. y. Steffe J.F., *Comparison of Friction Factor Equations for Non-Newtonian Fluids in Pipe Flow*. *Journal of Food Process Engineering*: 9, 93-120, 1987.
35. Harms, H.L. et al., *Oil Tool and Method for Controlling Paraffin Deposits in Flow Lines and Downhole Strings*. CA PATENT 2032005, 1991.
36. Hidroquip Technologies INC. *Magnetic Treatment of Fluids*, US PATENT 5024759, 1991.
37. Iakovlev, S.V y Dalkov Y.M., *Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales*. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p.
38. Ibarz A., J. Vélez y G. Barbosa. *Transporte de Alimentos Fluidos a Traves de Tuberías*. Inéditos: 60 hojas. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
39. Ibenskii, G.B. *Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías*. Moscú: Gosstroishdat, 1957.
40. Izquierdo, P.R. *Estudio de la instalación de hidrotransporte a presión de la pulpa laterítica de la Emp. Cmdte Pedro Soto Alba*. *Revista Minería y Geología*, 1989, (3): 16-22.
41. Izquierdo P. R., Turro B. A., Nikolaev A., *Hidrotransporte del mineral laterítico en regimen estructural*. Instituto Superior Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez ,*Revista Minería y Geología* Vol . XVII I, No. 2, 2001, ISSN 0258 5979 pag. 53 – 59.
42. Kasatkin A. G., *Operaciones básicas y aparatos de la tecnología química*, tomo I, Editorial pueblo y educación, Ciudad de la Habana, Cuba, 1985.

43. Lang, L., *Power Unit Controls Scale Magnetically*, The American Oil & Gas Reporter, V 25, No. 9, 1982.
44. Laurencio A. H., *Variantes alternativas de los sistemas de hidrotransporte de las colas de la fabrica Ernesto Che Guevara*, Trabajo de diploma, ISMM, Moa, 2004, p. 86.
45. Laurencio A. H., *Influencia de la temperatura en la propiedades reológicas de emulsiones de petróleo pesado*, Artículo para publicación, ISMM, Moa 2007.
46. Leong, Y.K., BOGER D.V., *Surface Chemistry Effects on Concentrated Suspension Rheology*. *Journal. Colloid Interface Sci*, 1990, 136(1): 249 – 258.
47. Liang, C., *Experimental Study of the Effect of Magnetic Treatment on Crude Oil in a Pipeline*, Oil & Gas Storage Transp., V 9, No. 1, 1990.
48. Liquitech Holding S.A., *Apparatus for Magnetically Conditioning a Liquid*, US PATENT 4999106, 1991.
49. Liu S. y Masliyah J.H., *On Non-Newtonian Fluid Flow in Ducts and Porous Media*, *Chemical Engineering Science*: 53 (6), 1175-1201, 1998.
50. Lomas W.R. y Saul A.J., *Laboratory Work in Hydraulics*. Granada Publishing, Londres, Inglaterra. pp. 71–117, 1979.
51. Macedo C., Martínez J. y Vélez. J., *Diseño, Construcción y Validación de una Unidad Piloto Para el Manejo de Fluidos Newtonianos*. *Información Tecnológica*: 12 (6), 169-176, 2001.
52. Macedo R.C., *Manual de Prácticas de Operaciones Unitarias I*, Universidad de las Américas, Puebla. México. Inéditos, 2000.
53. Mamedkulieva, M.M. y otros, *Effect of the Intensity of Magnetic Field on Deposition of Paraffin from Petroleum*, TR Azerb Gos Nauchno-Issled Proektn Inst. Neft. Prom, Sti, V 27., 1983.
54. Martínez L.P. y Linares J.A., *Resistance Coefficients of Fittings for Power-Law Fluids in Laminar Flow*. *Journal of Food Process Engineering*: 24, 135-144, 2001.
55. Martínez D., Egüez F., *Estudio Reológico y de flujo para emulsiones de petróleo pesado en agua*, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico de PETROECUADOR, Facultad de Ingeniería Química EPN, 2001.
56. Mariaca Domínguez E., Martínez Tapia G.E., Rivera Segundo E y Moreno Tovar A., *Conversión de Asfaltenos Promovida por Energía de Ultrasonido*. Subdirección de Transformación Industrial, IMP. México.
57. Maruska H.P. y RAO, B., *Fuel Science and Technology* N°5, V2, 119-168, 1987.

58. Mechetti M., Fornés A., Maturano S. y Zapana L., *Efecto electrorreológico en crudos argentinos*, Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú. Misiones, Argentina, 2000.
59. Mechetti, M. y Zapana L., *Estudios electrorreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfaltenos*, Congreso Producción 2000 y III Workshop Latinoamericano sobre Aplicaciones de la Ciencia en la Ingeniería del Petróleo, Iguazú. Misiones, Argentina, 2000.
60. Mechetti, M. y Zapana L., *Estudio comparativo de actividad electrorreológica en petróleos argentinos*, I Encuentro Internacional de Física aplicada a la Industria del Petróleo y IV Escuela Nacional de Física de la Materia Condensada, Bucaramanga, Colombia, 2000.
61. Mechetti M., Rodríguez L., CASTAÑEDA, M. y Pelaez C., *Informe ICP*, Ecopetrol, julio 2001.
62. Mitchell, J., *Apparatus for Magnetically Treating Fluids*, US patent 4808306, 1990.
63. Momemer B., *El mito de la orimulsión: la valorización del petróleo extrapesado de la faja del Orinoco*, Oil & Gas Journal Latinoamérica, Volumen 10, numero 5, septiembre/octubre, 2004.
64. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada., *Pipe Transportation of Minced Fish Paste*. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980). Om N., Loginapaulo V. y Cavado A., *Composición de los petróleos pesados cubanos*, CEINPET, Oil & Gas Journal Latinoamérica, Volumen 10, numero 1, enero / febrero, 2004.
65. Ocampo B.R., F.M. Martínez, F.A. Tamayo y Q.E. Alarcón, *Emulsiones agua en combustóleo para reducir las emisiones de partículas inquemadas en calderas*, *Boletín IIE*, septiembre/octubre, 1997, pp. 225-231.
66. Paul, J.C., *Effect of Chemical Structure on the Conduction and Breakdown of Paraffin Oil*, Indian J. Technol., V 8, 1978.
67. Pakrovskaya, V.I., *El transporte hidráulico en la industria minera*. Moscú: Nedra, 1985, 192 p.
68. Pelaez C y Stachenco E., *Estudio del Efecto del Campo Magnético en Crudos Parafínicos por Cromatografía de Gases de Alta Resolución*, Ecopetrol – ICP, 1999.

69. Placencia A. y Martínez D., *Formulación de Emulsiones de Petróleo Pesado en Agua a Nivel Piloto y Estudio de las Pérdidas Friccionales en Tubería*, Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico PETROECUADOR. Quito – Ecuador, 2000.
70. Perry J.H., *Chemical engineers handbook*. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1984.
71. Perona P., *An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids*. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
72. Rabinovich E.Z., *Hidráulica*. Ed. MIR, Moscú, URSS. pp. 115–191, 1987.
73. Reid, R. C. y Sherwood T. K., *The properties of gases and liquids*. 2da. edición, editorial McGraw-Hillbook Company, New York, 1966.
74. Romo, L., *Emulsiones*, Editorial Universitaria, 1993.
75. Romo, L., *Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua*, Petroecuador-ESPE, convenio 96058, 1998.
76. Rosabal, J. y Garcell L., *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. Tomo I.
77. Sablani S.S. y Shayya W.H., *Neural Network Based Non-Iterative Calculation of the Friction Factor for Power Law Fluids*: 57, 327-335, 2003.
78. Sánchez M.G., *Estudio de fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos*, Revista facultad de ingeniería, U.T.A. (CHILE), VOL 10, 2002, pp. 23-34
79. Somoza J. y García A., *Escenarios macroeconómicos a largo plazo del desarrollo energético y su impacto ambiental*. INIE, Octubre, 2002.
80. Shedayev, T. CH. Y Zhao, F., *Magnetic Treatment Effect on Oil Properties*, J.Univ. Petrol. China, V 13, No. 4, 1998.
81. Steffe J.M. y R.G. Morgan., *Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods*. Food Technology. Dic.: 78-85, 1986.
82. Skelland, A.H., *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
83. Suárez M. *Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito*. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998. 117p.
84. Szymula M., Januz, W. y Jablonski, J., *Electrochemical Properties of Asphaltene Particles in Aqueous Solutions*, J. Dispersion Science and Technology, 21 (6), 785-802, 2000.

85. Tang J., *A Preliminar Investigation of the Use of Magnetic Treatment Technique in Oil Fields Development*, Oil Drilling Prod. Technol. China, V10, No. 2, 1988.
86. Tang J. y Li L., *Magnetic Field Paraffin Control Technique*, Oil Drilling Prod. Technol. China v 8 No. 5, 1986.
87. Tejeda H.D., *Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales*. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.
88. Toose E.M., *A boundery integral method for two dimentional) (non) – Newtonian drops is slow visions flow*, *Journal of Non– Newtonian Fluid Mechanics*, 1995, (2): 129 – 154.
89. Torres T. E., *Modelación y simulación del transporte neumático del mineral laterítico*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2003.
90. Turro B. A., *Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amoniaca*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154
91. Urakami K., *Magnetization Treatment Apparatus of Fluid.*, US Patent 4904381.1990.
92. Vélez J., *Apuntes de Ingeniería de Alimentos I*. Universidad de las Américas, Puebla, México. Inéditos, 2003.
93. Wang M., *Permanent-Magnet Wax-Proff Device*, US PATENT 5024271, 1991.
94. Wang B. y Dong L., *Paraffin Characteristcs of Waxy Crude Oils in China and the Methods of Paraffin Removal and Inhibition*, SPE 29954 1995.
95. Weisenbarger G., *Magnetic Fluid Conditioner*, US PATENT 4995425, 1991.
96. Welty J.R., R.E. Wilson y Wicks C.E., *Fundamentals of momentum, Heat and Mass Transfer*, Ed. J. Wiley and Sons. Nueva York, EUA. pp. 202-219, 1976.
97. Ye Y., *Applied Tests of Mechanism for Anti - Waxing by Means of Intensive Magnetism*, *Oil & Gas Storage Transpo*, China v 9 No. 2 ,1990.
98. Zhang, Y., *The Aplications of Magnetic Techology in Pipeline Transportation of crude Oil & gas Storage Transp*. China, V 8, No. 1, 1989.

## Anexo 5

**Tabla 4: Resumen estadístico reología**

Análisis de varianza de un factor		Esfuerzo de corte (t = 15°C)				
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	9	644,14	71,57111111	1493,23441		
Columna 2	9	643,713299	71,52369988	1459,93757		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variac.	Suma de cuad.	Gr. de lib.	Prom. de cuad.	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,01011521	1	0,01011521	6,8504E-06	0,997944033	4,493998063
Dentro de los grupos	23625,37585	16	1476,585991			
Total	23625,38597	17				
Análisis de varianza de un factor		Esfuerzo de corte (t = 25°C)				
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	9	452,41	50,26777778	817,450069		
Columna 2	9	448,2271	49,80300905	698,250267		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
O. de las var.	S. de cuad.	G. de lib.	Prom. de cuad.	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,97204485	1	0,97204485	0,00128263	0,97187377	4,493998063
Dentro de los grupos	12125,60269	16	757,8501682			
Total	12126,57474	17				
Análisis de varianza de un factor		Esfuerzo de corte (t = 35°C)				
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	9	351,98	39,10888889	497,7134111		
Columna 2	9	348,7874	38,75415296	425,7074844		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
O. de las var.	S. de cuad.	G. de lib.	Prom. de c.	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,566269093	1	0,566269093	0,001226459	0,972496316	4,493998063
Dentro de los grupos	7387,367164	16	461,7104478			
Total	7387,933433	17				

## **Anexo 6**

**Tabla 5: Resumen estadístico del análisis de la caída de presión.**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Columna 1	15	48595,3542	3239,69028	3155525,04		
Columna 2	15	48065,35	3204,35667	3207507,22		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>O. de las v.</i>	<i>S. de c.</i>	<i>G. de l.</i>	<i>Pr. de c.</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	9363,48227	1	9363,48227	0,00294309	0,95712103	4,195982228
Dentro de los grupos	89082451,6	28	3181516,13			
Total	89091815,1	29				

**Tabla 6: Resumen estadístico del análisis de la potencia.**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
Columna 1	15	25,7090402	1,71393601	4,43222567		
Columna 2	15	22,64	1,50933333	3,3745091		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>O. de las v.</i>	<i>S. de c.</i>	<i>G. de l.</i>	<i>P. de c.</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>V. crít. para F</i>
Entre grupos	0,31396693	1	0,31396693	0,08043489	0,77879548	4,19598223
Dentro de los grupos	109,294287	28	3,90336738			
Total	109,608254	29				

**Anexo 1**



Figura 1: Viscosímetro rotacional de rotor en medio infinito

**Clasificación simplificada de modelos reológicos**

	Materiales ideales	Pseudoplásticos		Plásticos			Dilatantes
	Newton	Ostwald	Steiger - Dry	Bingham	Casson	Otros	Ostwald
Comportamiento al flujo $\tau = f(\dot{\gamma})$							
Características $\tau = f(\dot{\gamma})$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}$	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ $n < 1$	$\dot{\gamma} = A\tau^2 + C\tau$	$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2}{\eta_c}$	$\dot{\gamma} = k(\tau - \tau_0)^n$ $n < 1$	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ $n > 1$
Viscosidad $\eta = f(\tau)$	$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$			$\mu_p = \frac{\tau - \tau_0}{\dot{\gamma}}$	$\eta_c = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2}{\dot{\gamma}}$		
Límite de fluencia $\tau_y$	0	0	0	$\tau_y = \tau - \mu_p \dot{\gamma}$	$\tau_c = (\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2$		0
Viscosidad límite $\eta_0(\dot{\gamma} \rightarrow 0)$	$\eta_0 = \eta$	$\eta_0 = \infty$	$\eta_0 = \frac{1}{C}$	$\mu_0 = \infty$	$\eta_0 = \infty$	$\eta_0 = \infty$	$\eta_0 = 0$
Representación logarítmica $\log \eta = f(\log \dot{\gamma})$							

## Anexo 2

**Tabla 1: Características físico – químicas de las fracciones destiladas a °C Temperatura**

Índices	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.
	1-100	100 - 150	150 - 190	190 -235	235 - 280	280 - 343	343 - 450
<b>API</b>	66	48,9	42	36,5	30	23	19,1
<b>Índice de refracción</b>	1,4150	1,4356	1,4502	1,4647	1,4832	1,5069	1,5187
<b>Azufre total, % m/m</b>	0,52	0,90	1,49	2,15	2,69	3,37	4,32
<b>Azufre mercaptano, % m/m</b>	0,0087	0,019	0,013	ausencia	ausencia	-	-
<b>Sulfhídrico, % m/m</b>	0,0025	0,010	0,087	ausencia	ausencia	-	-
<b>Acidez, mg KOH/g</b>	0,11	0,24	0,3	0,3	0,47	0,88	0,98
<b>Nº de yodo</b>	-	-	-	4,77	3,22	-	-
<b>Carbón Conradson, % m/m</b>	-	-	-	-	-	0,10*	0,022
<b>Cenizas totales, % m/m</b>	-	-	-	-	-	0,004	0,0027
<b>Índice de cetano</b>	-	-	-	-	38,74	38,50	-
<b>Punto de inflamación, °C</b>	-	-	-	-	-	130	154
<b>Asfaltenos, % m/m</b>	-	-	0,055	0,067	0,080	0,070	0,11

Fuente: Om et al., 2004

### Anexo3

<b>Tabla 2: Composición Hidrocarbonada del resto de las fracciones destiladas a distintas temperaturas en °C</b>					
<b>Índice</b>	<b>Temp. 150 - 190</b>	<b>Temp. 190 - 235</b>	<b>Temp. 235 - 280</b>	<b>Temp. 280 - 343</b>	<b>Temp. 343 - 450</b>
<b>Comp. hidrocarbonada, %</b>					
<i>Saturados</i>	-	31,79	44,49	41,69	33,11
<i>Aromáticos</i>	-	31,71	39,79	54,68	64,55
<i>Polares</i>	-	0,74	0,23	0,42	0,68
<b>Contenido de aromáticos por espectroscopia UV, %</b>					
<i>Monocíclicos</i>	14,85	34,72	40,29	32,41	
<i>Policíclicos</i>	0,02	1,02	3,75	10,39	
<b>Totales</b>	<b>14,87</b>	<b>35,74</b>	<b>44,04</b>	<b>42,80</b>	

**Fuente:** Om et al., 2004

#### Anexo 4

<b>Tabla 3: Características físico- químicas de los residuos</b>					
<b>Índices</b>	<b>R&gt;350 °C</b>	<b>R&gt;370 °C</b>	<b>R&gt;400 °C</b>	<b>R&gt;425 °C</b>	<b>R&gt;450 °C</b>
API	3,65	3,26	2,62	2,37	1,99
Densidad a 20 °C, g/cm <sup>3</sup>	1,0420	1,0451	1,0498	1,0514	1,0544
Penetración a 25 °C, 100g, 5s, 1x10 <sup>-1</sup>	136	76	45	37	34
Temperatura inflamación, °C	282	296	296	315	321
Temperatura ablandamiento, °C	42	50	53	57	57
<b>Prueba de envejecimiento. Calentamiento 5 horas a 163 °C</b>					
<b>*Pérdidas</b>	0,94	0,43	0,06	0,01	0,03
<b>*Penetración después del calentamiento, 1x10<sup>-1</sup></b>	51	43	25	24	21
<b>*Penetración retenida después del calentamiento,% valor original</b>	37,5	56,6	55,6	64,9	61,8
Solubilidad en tricloroetileno,%m/m	99,5	99,6	99,6	99,8	99,8
Contenido de azufre, % m/m	7,73	7,76	7,82	9,92	7,83
Carbón Coradson,% m/m	15,23	17,33	18,21	19,22	20,15
Rendimiento del residuo, % m/m	76,15	73,71	67,89	67,64	67,49

**Fuente:** Om et al., 2004