



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
FACULTAD METALURGIA- ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al título de ingeniero mecánico

Título: *Propiedades de transporte de emulsión del petróleo crudo cubano*

Autor: Edel Megret Brooks

Tutor: *Ms.C. Héctor L. Laurencio Alfonso*

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. A partir del estudio reológico, se hace la caracterización del comportamiento del fluido, donde se ejemplifica el comportamiento de la viscosidad aparente con relación al gradiente de velocidad y se determinan los índices (n y k), observándose que la emulsión presenta propiedades pseudoplásticas para diferentes temperaturas. Quedan propuestos, modelos y procedimiento de cálculo apropiado para la selección y evaluación de sistemas de transporte, relacionado con las propiedades reológicas del fluido. Se realiza la modelación mediante el programa ANSYS que permite determinar la caída de presión que experimenta la emulsión del petróleo crudo cubano en una tubería, así como incrementar más los conocimientos acerca de la emulsión del mismo y la importancia que tiene en la industria.

ABSTRACT

In the present work, is carried out a study related with the transport properties of emulsions prepared with Cuban raw petroleum, with the purpose of contributing to the solutions related to the calculations methods applicable to non Newtonians fluids. Starting from reologic study, is made the characterization of the fluid behaviour, where the behaviour of the apparent viscosity with relationship to the gradient of speed is exemplified and the indexes (n and k) are determined, being observed that the emulsion presents pseudoplastics properties for different temperatures. They are proposed, appropriate models and procedure of calculation for the selection and evaluation of transport systems, related with the reologic properties of the fluid. It is carried out the modelling by means of the ANSYS program that allows to determine the drop of pressure that experiences the emulsion of the Cuban raw petroleum in a pipe, as well as to increase more the knowledge about the emulsion of the same and the importance that it has in the industry.

ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción	1-4
Capítulo I Marco Teórico- Metodológico de la investigación	5
1.1- Introducción.....	5
1.2- Revisión bibliográfica.....	5
1.3- Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas.	14
1.4- Petróleo y emulsión.....	17
1.4.1- Comportamiento reológico de las emulsiones.....	20
1.5- Estabilidad de las emulsiones.....	22
1.6- Viscosidad de mezclas y sistemas coloidales.....	24
1.7- Aplicaciones del transporte del petróleo y emulsiones por tuberías.....	25
1.7.1- Ventajas de transporte por sistemas de tuberías.....	26
1.8- Conclusiones del capítulo.....	28
Capítulo II Investigación Teórica Del Proceso De Transporte De Fluidos	29
2.1- Introducción.....	29
2.2- Modelos reológicos de fluido.....	29
2.2.1- Curvas de flujo.....	32
2.3- Requerimiento energético para el transporte de fluidos no newtonianos por tuberías. Balance de energía mecánica.....	34
2.4- Modelos matemáticos de pérdidas de presión durante el transporte de fluidos pseudoplásticos.....	35
2.4.1- Expresiones para el cálculo de pérdidas de presión por resistencias locales.....	38
2.4.2- Selección del diámetro de tuberías.....	38
2.5- Materiales y técnicas utilizadas.....	39
2.5.1- Emulgente empleado.....	39
2.5.2- Pruebas reológicas.....	40
2.6- Empleo de las técnicas de modelación por elementos finitos para la simulación del flujo.....	41
2.7- Características y propiedades del petróleo crudo cubano.....	42
2.8- Diseño de experimentos y procesamiento estadístico.....	43
2.9- Conclusiones del capítulo.....	45
Capítulo III Análisis de los Resultados, Influencia Técnico Económica y Medioambiental	46

3.1-	<i>Introducción.....</i>	46
3.2-	<i>Características reológicas.....</i>	46
3.2.1-	<i>Resultados experimentales de las propiedades reológicas.....</i>	47
3.2.2-	<i>Estimación de los parámetro reológicos.....</i>	48
3.2.3-	<i>Comportamiento pseudoplástico de la viscosidad aparente.....</i>	49
3.2.4-	<i>Influencia de la temperatura de las propiedades reológicas.....</i>	50
3.3-	<i>Análisis de los resultados de la perdida de carga.....</i>	53
3.3.1-	<i>Dependencia entre la pendiente hidráulica con la velocidad en tuberías circulares.....</i>	53
3.3.2-	<i>Análisis de la modelación por el método de elementos finitos.....</i>	56
3.4-	<i>Correlación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds.</i>	59
3.5-	<i>Efecto económico de transporte.....</i>	61
3.6-	<i>Recomendaciones medioambientales para el transporte y manipulación de emulsión de petróleo pesado.....</i>	64
3.6.1-	<i>Emulsiones de agua y combustible.....</i>	66
3.7-	Conclusiones del capítulo.....	68
	CONCLUSIONES GENERALES.....	69
	RECOMENDACIONES.....	70
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXOS.....	79

INTRODUCCION

El transporte de combustible por tubería representa un gran desarrollo económico para las industrias petroleras, lo que constituye una ardua labor de estudio para lograr su eficiencia durante su transportación. Desde 1999 hasta el 2005 el transporte de combustible por medio de oleoductos en Cuba ha aumentado de un 21% hasta un 24%, lo que constituye un gran desarrollo actual de la industria petrolera cubana.

El desarrollo de la ciencia y la tecnología en tal sentido, no han avanzado a profundidad en el estudio y perfeccionamiento de metodologías, apropiadas a los diferentes sistemas de transporte, para su diseño, selección y evaluación a nivel industrial. A pesar de las grandes limitaciones de toda índole, en Cuba se busca mejorar eficazmente los procesos productivos y los medios de producción.

En este escenario se produce un incremento de la producción de energía, principalmente crudo y gas. 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).

En tal sentido podemos decir que el papel de la industria cubana juega un rol importante dentro de la economía nacional, 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 disponibles. Actualmente se encuentran enfrascadas en un gran proyecto de eficiencia energética, con el objetivo de disminuir los costos en la producción.

El transporte por sistemas de bombeo del combustible cobra importancia primaria 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.

Por todo lo planteado se requiere de un estudio que nos permita determinar los parámetros de transporte de la emulsión del petróleo crudo cubano; basados en la determinación de la pérdida de presión en las líneas y accesorios.

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. 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 del níquel. Como principal problema en el transporte de emulsiones de petróleo es que son fluidos de comportamiento complejo (no newtonianos que cambian a newtonianos en función del gradiente de velocidad) los cuales requieren de la determinación de los modelos reológicos que describen su comportamiento.

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

En tal sentido se caracteriza siguiente deficiencia:

- Insuficiencia de métodos y datos para la proyección, selección y cálculo de los parámetros racionales de transporte del petróleo crudo cubano y emulsión.
- Desconocimiento del comportamiento de las emulsiones del crudo cubano, en función de sus propiedades y reológicas.

Fundamento de la investigación

Las teorías para la determinación de las viscosidades 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)

En el presente trabajo estudiaremos las propiedades de transporte y reológicas de la emulsión del petróleo crudo cubano. Estableciendo las propiedades físico – mecánicas del fluido, podemos obtener un modelo matemático de su comportamiento reológico y mediante la técnica del uso de los programas de la computación por el método de elementos finitos, podemos simular el comportamiento del fluido en una tubería, donde observaremos la variación de presión que experimenta el flujo durante su desplazamiento.

Situación problemática:

Existe desconocimiento de las propiedades de transporte de la emulsión del petróleo crudo cubano, lo que dificulta la correcta selección y diseño de los sistemas de transporte de estos combustibles; ocasionando ineficiencia en instalaciones de transporte de petróleo dada por las inexactitudes de los cálculos, requiriéndose una investigación que permita aportes y mejoras de los métodos de cálculos e índices técnicos económicos de los sistemas.

Problema:

Insuficientes conocimientos de las propiedades de transporte de la emulsión del petróleo crudo cubano, que imposibilita establecer el modelo reológico, cálculo adecuado y la simulación de sistemas de transporte.

Objeto de estudio de la investigación:

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

Hipótesis:

Si se establecen las propiedades físico -mecánicas y reológicas de la emulsión del petróleo crudo cubano, es posible obtener los parámetros reológicos que posibilite la simulación mediante técnicas computacionales del sistema de flujo.

Se define como **objetivo del trabajo:**

Establecer los modelos reológicos y comportamiento de flujo de la emulsión del petróleo crudo cubano.

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

- Describir las características químicas y reológicas de la emulsión del petróleo; y la influencia de estos factores sobre su comportamiento.
- Proponer un modelo físico – matemático del flujo teniendo en cuenta las propiedades del fluido.
- Realizar las investigaciones teóricas y simulación de los principales parámetros de flujo del sistema de transporte por el método de elementos finitos.

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

- ✓ Obtener a partir de la experimentación, los parámetros del modelo reológicos (índice de flujo y consistencia másica).
- ✓ Simular el transporte de la emulsión del petróleo crudo cubano para diferentes velocidades de transporte.
- ✓ Establecer las recomendaciones, técnico económico y medioambiental relacionado al transporte del petróleo cubano y la emulsión.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 – INTRODUCCIÓN

El objeto de estudio del presente capítulo, permite detectar de forma preliminar, las 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 emulsiones de petróleo en agua.

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 Poiseuille, interesado en la circulación de la sangre 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 Gottlieh 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: una, la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, 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*.

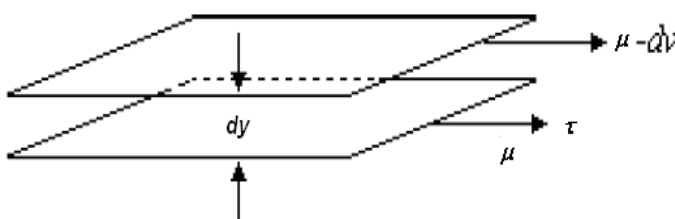


Figura 1.1. Corte entre dos planos de fluido

Refiriéndose a los fluidos 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)*, partiendo del estudio reológico de la jalea dentífrica fluida 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 visco simétrica y de la 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.

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.

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).

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 (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.

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; Vélez, 2003). 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 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 visco elásticas 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 y diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, (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), determinación de forma experimental de la pérdida de presión (ΔP) en válvulas de compuerta y globo de $\frac{1}{2}$ pulgada; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo pseudoplástico generalizado (Re) y los diferentes grados de abertura (δ).

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, (Martínez et al., 2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado. Recientemente. 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 visco elásticos 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 hidrotransporte en una instalación semi industrial 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 (λ) 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), en su tesis doctoral, presenta 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, pseudo plásticos y dilatantes en densidad variable. Para estos modelos, se obtienen resultados de existencia de solución global en tiempo en varios sentidos: solución muy débil, 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 visco elásticos, el problema de evolución, el problema estacionario y el flujo de Poiseuille en dominios cilíndricos.

Turro (2002), en su tesis doctoral estudio 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), determinó las concentraciones más efectivas de petróleo y de sustancias tensoactivas 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 tensoactivas no-iónicas al nivel de concentración de 5%".

"Las emulsiones con un 70% de petróleo pesado y 5% de sustancia tensoactiva tienen una alta fluidez porque la viscosidad se ha reducido a menos de 1/10 de la viscosidad del petróleo". La siguiente fase de este proyecto es 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, (Romo 1998).

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

Planteado la necesidad de estudiar otras formas de disminuir la viscosidad del petróleo pesado, 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, (Romo 1998).

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 asfálténicos altamente viscosos, (Maruska et al., 1987). En los últimos años, en lo que se entiende como nuevas herramientas aplicadas al estudio, caracterización y control de crudos asfálténicos 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 electro reológico de crudos, debido a la presencia de asfáltenos, 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 deposición de parafina fueron alteradas 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 asfálténicos bajo la acción de campos eléctricos. Investigando el comportamiento viscosimétrico de un crudo argentino de baja viscosidad con 7% pp. de contenido de asfáltenos, 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 asfáltenos.

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, confirmando lo observado por (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 esta muy afectada para valores moderados de la misma; a presiones muy

elevadas, la viscosidad puede aumentar considerablemente. Al parecer, este ultimo 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 pseudoplástico o plástico, debido a la formación de agregados o flóculos, o de una estructura espacial. En los trabajos de Cerpa et al. (1997); (1998); (1999), con pulpas laterititas, así como de Boger et al. (1990) 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 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. 2006).

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

En la que T es la temperatura; C y B son constantes, cuyos valores dependen de las unidades de μ 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 otro compuesto 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 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

Clasificación del aceite de acuerdo a su densidad			
	Petróleo crudo	Densidad (gr/cm³)	Densidad (grados API)
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: Norma API, 2000.

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 29% 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.

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 se dispersa en agua, en cuyo caso el sistema se conoce como emulsiones óleos acuosas (O/W), o cuando el agua se dispersa en el aceite para formar emulsiones hidro oleosas (W/O). El combustible es una emulsión de bitumen (fase dispersa) en agua (fase continua), lo que implica que es una emulsión del tipo óleo acuosas (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 pseudo plástico (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 - Estabilidad de las emulsiones

La estabilidad de las emulsiones se evalúa principalmente con respecto al tiempo que permanece sin mostrar separación de fases cuando está sometida a condiciones similares a las que estaría sujeta en su aplicación (transporte y almacenamiento).

El proceso de separación de fases de una emulsión empieza con la flotación de las partículas más grandes, esto produce una separación de capas dentro de la emulsión de acuerdo a las densidades de las partículas. A continuación las partículas forman agregados que se mueven como una sola unidad, es decir que las partículas pierden su identidad cinética. Por último las partículas coalescen y forman partículas más grandes cada vez hasta la separación de fases o rompimiento de la emulsión. La temperatura y los esfuerzos cortantes que se presentan en el transporte por tuberías aceleran los procesos de agregación y coalescencia. De ahí la importancia que tiene el tamaño de partícula en la estabilidad de las emulsiones.

En la figura 1.2, se esquematizan los tipos más comunes de desestabilización normalmente observados en emulsiones, los cuales se discuten brevemente a continuación.

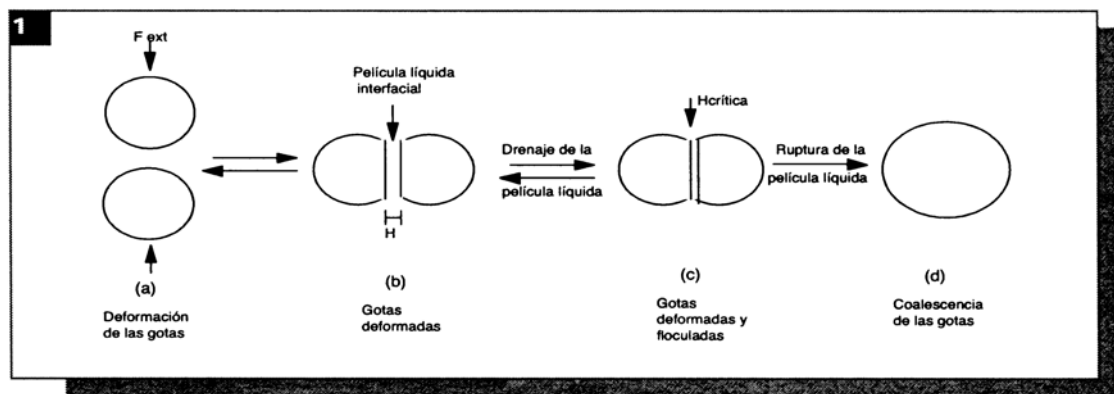


Figura 1.2: Desestabilización normalmente observados en emulsiones.

- **Floculación:** Proceso de agregación de gotas sin que éstas pierdan su identidad, y sin cambio en el diámetro promedio de las mismas. La floculación es el resultado de las atracciones de Van der Waals y de las

interacciones electrostáticas y esféricas, entre moléculas de surfactante adsorbidas sobre la superficie de gotas adyacentes.

- Sedimentación: Agregación de las gotas bajo la influencia de la gravedad, como consecuencia de una diferencia de densidad apreciable entre las fase continua y dispersa. Cuando la fuerza de gravedad excede el movimiento térmico de las gotas, se desarrolla un gradiente de concentración en el sistema, en el que las gotas más grandes se mueven a mayor velocidad hacia la superficie (si la densidad de la fase dispersa es menor que la de la continua), o hacia el fondo (si la densidad de la fase dispersa es mayor que la de la continua). En los casos extremos, las gotas se concentran en la superficie ("creaming") o en el fondo (sedimentación). En ninguna de estas situaciones, las gotas pierden su individualidad y el proceso es reversible.
- Coalescencia: Proceso de coalescencia en una emulsión, que implica la unión de varias gotas para formar otras más grandes, lo que finalmente conduce a la separación de las fases. Para que se produzca la coalescencia, es necesario que la película líquida interfacial que rodea las gotas, así como la monocapa de surfactante adsorbida sobre la superficie de las mismas sufran un completo deterioro. La coalescencia es un proceso irreversible, difícil de explicar teóricamente. Este, es monitoreado a través del diámetro promedio de las gotas.
- Inversión: Cambio de una emulsión de aceite en agua a otra de agua en aceite. La inversión puede ser promovida por varios factores entre los cuales destacan la temperatura, cambios en la formulación del sistema y efectos de tipo mecánico, entre otros.

Los factores que favorecen la estabilidad de una emulsión dependen de la naturaleza del agente emulsionante y de la elección apropiada de las condiciones de formulación y manufactura. Entre ellos se encuentran:

- 1 – Repulsiones de doble capa eléctrica
- 2 – Volumen relativamente pequeño de la fase dispersa
- 3 – Tamaño de las partículas

4 – Viscosidad alta: una viscosidad alta resalta sencillamente las velocidades de formación de nata, coalescencia, entre otras.

1.6 - 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 (τ_0) , la estructura interna sufre alteraciones mínimas y las emulsiones que tienen flujo plástico sometidas a esfuerzos constantes pequeños se vuelven visco elásticas." (Romo 1993).

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

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

Donde x_1 y x_2 son fracciones molares de los líquidos que constituyen la mezcla y μ_1 y μ_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 Pa.s.

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

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

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

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

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).

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

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

1. Viscosidad de la fase continua (μ_o)
2. Viscosidad de la fase dispersa (μ_i)
3. Temperatura
4. Intensidad del trabajo mecánico
5. Concentración de la fase dispersa (fracción de volumen ϕ)
6. Efecto electro viscoso
7. Distribución del tamaño de partícula
8. Agentes emulsificantes
9. Propiedades del petróleo
10. Contenido de sales del petróleo

1.7 - Aplicación del transporte de petróleo y emulsiones 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.

En suma, 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 procesado 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 unos cinco kilómetros por hora.

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.

1.7.1 - 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 la industria minero metalúrgica se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge 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.

El transporte por tuberías de líquidos, sólidos y gaseosos en comparación con el transporte ferroviario, la vía automotriz, etc. posee esta, una significativa ventaja:

- 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 pérdidas 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 del hidrotransporte y en el caso de transportar petróleo y emulsiones, la mayoría de estas desventajas no interviene en el proceso al no ocasionar desgastes de las tuberías.

Las investigaciones dentro del transporte hidráulico, específicamente del desplazamiento de flujos líquidos se han desarrollado 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 fluidos líquidos.
- Trabajos que buscan el enlace de la teoría con los trabajos prácticos.

1.8 - Conclusiones del capítulo

- Se hace referencia en general, a la búsqueda bibliográfica acerca de las propiedades del petróleo crudo cubano y su emulsión, en la cual diversos autores abordaron acerca de esta temática.
- Se implementaron conocimientos teóricos acerca de las ventajas que tiene el fluido al ser transportado por medio de un oleoducto que es de vital importancia para la industria en su desarrollo económico.
- El análisis de estos y muchos otros trabajos sobre este tema, nos hacen llegar a la conclusión de que la esencia física de los procesos de flujo de líquido heterogéneos es poco conocida.

CAPÍTULO II

INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL PROCESO DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

2.1 - INTRODUCCIÓN

Los conocimientos teóricos acerca del comportamiento y propiedades de flujo de emulsión del 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.

El **objetivo** del capítulo es:

Establecer la investigación teórica y modelos de flujos asociados a fluidos no newtonianos, que describan el 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, según (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988 y Díaz, 1989).

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

- Newtonianos.
- No Newtonianos.

Los modelos más difundidos de acuerdo a lo reportado (Garcell, 1988 y Turro, 2002) citado a continuación:

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 (τ) 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 en 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 fluidos 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 flujo, (adim).

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 (μ_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 2.1c).
- **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 (τ_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 2.1d).

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

Donde:

τ_0 : esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

μ_p : viscosidad plástica.

- **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 τ_0 . Siguen el modelo de Herschel – Bulkley. (Figura 2.1c).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^n \quad (2.6)$$

Los parámetros k , n , τ_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 2.6 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.

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 2.2a).

- **Reopécticos**: La viscosidad de estos aumenta con el tiempo, para un gradiente de velocidad determinado; y se comportan como materiales dilatantes. (Figura 2.2b).

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; Ferro, 2000).

2.2.1- Curvas de flujo

Al representar gráficamente la relación del esfuerzo cortante como función del gradiente de velocidad, se obtienen curvas que describen el comportamiento reológico de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, las que se denominan curvas de flujo.

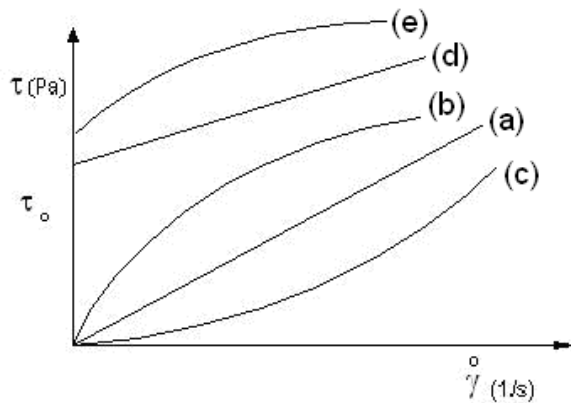


Figura 2.1: Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: Garcell, 2001.

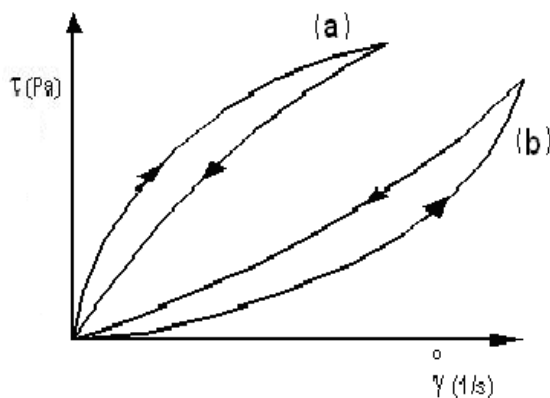


Figura 2.2: Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo: (a) Tixotrópico; (b) Reopéctico.

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 grupo, colección y que hayan sido fabricadas sustituyendo un componente por otro.

2.3- Requerimientos energéticos para el transporte de fluidos no newtonianos por tuberías. Balance de energía mecánica

Para el diseño de sistemas de tuberías se requiere conocer la relación entre los gradientes de presión ($\Delta P/L$), requeridos para lograr flujos volumétricos, (Q), en un intervalo de diferentes diámetros, (D), del tubo, a distintas temperaturas de operación y diferentes propiedades físicas de los fluidos (Garcell, 2001).

Las expresiones que relacionan las variables señaladas en el régimen laminar, para los modelos reológicos más difundidos en la literatura, así como las limitaciones que puedan tener en su precisión en los sistemas de flujo con diámetros relativamente grandes. De ahí, en los cálculos de ingeniería se prefiera hacer uso de las expresiones que relacionan el factor de fricción de Fanning con el número de Reynolds y con otros números adimensionales, tanto en régimen laminar como en turbulento.

Una de las leyes fundamentales de la mecánica de los fluidos se expresa mediante la ecuación de balance de energía mecánica aplicada al sistema de flujo según (Skelland, 1970; Rosabal, 1988). En el caso específico del flujo no newtoniano también se aplica el balance de energía mecánica en un sistema de flujo, al cual entra el fluido por un plano (1) y sale por un plano (2). (Figura 2.3)

$$\frac{Z_1 g}{g_c} + \frac{P_1}{\rho} + Ec_1 = \frac{Z_2 g}{g_c} + \frac{P_2}{\rho} + Ec_2 + W_b + \sum F \quad (2.7)$$

Donde:

Zg : energía potencial para una altura vertical referida a un plano horizontal de referencia tomado arbitrariamente, (m^2 / s).

$\frac{P}{\rho}$: energía de presión hidrostática, (m^2 / s^2).

Ec : energía cinética media por unidad de masa, (m^2 / s^2).

W_b : trabajo por unidad de masa (como trabajo hecho por una bomba sobre el fluido, (m^2 / s^2).

ΣF : energía mecánica convertida a energía térmica como resultado de las fricciones del fluido, (m^2 / s^2).

$$\sum F = \frac{\Delta P_f}{\rho} + (\text{pérdidas locales}). \quad (2.8)$$

ΔP_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.

Para el flujo no newtoniano, los términos E_c y ΔP_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_b , para el caso de las bombas, se expresa como:

$$W_b = \frac{\Delta P_b}{\rho} = \frac{P_d - P_s}{\rho} \quad (2.9)$$

Siendo: (ΔP_b) - Incremento de presión que da 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).

$$E_c = \frac{v^2}{2\alpha g_c} \quad (2.10)$$

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

$$\alpha = \frac{(2n + 1)(5n + 3)}{3(3n + 1)^2} \quad (2.11)$$

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 distribución de esfuerzos cortantes en tubería. La ecuación de Ostwald (Ecuación. 2.2); al ser genérica, no nos llevaría a ningún resultado. Para

ello nos basaremos en los estudios de Rabinowisch-Mooney y Metzner-Reed, los cuales llegaron a unas expresiones válidas para todo fluido no newtoniano independiente del tiempo; expresiones en las cuales todos los parámetros se pueden hallar experimentalmente. Consideremos un flujo en un tubo cilíndrico de diámetro D a una temperatura constante; (Figura 2.3).

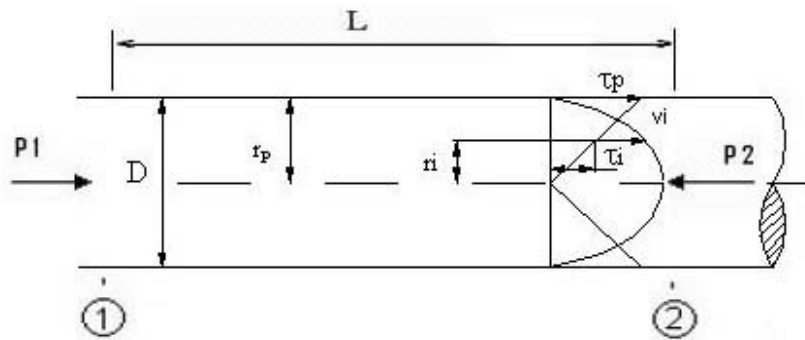


Figura 2.3: Sección de tubería que describe el flujo de un fluido no newtoniano, independiente del tiempo, por una tubería de sección circular y diámetro igual a D .

Donde:

τ_p : esfuerzo de corte en la pared del tubo.

v_i : velocidad en un punto genérico de radio r_i .

τ_i : tensión tangencial en un punto genérico de radio r_i .

D : diámetro de la tubería.

Luego de analizar las fuerzas involucradas, suponiendo que la velocidad en la pared del tubo es cero; se puede conocer todo sobre el flujo. Del análisis de la figura 2.3, se llega a una expresión del caudal en función de los esfuerzos de corte.

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{1}{\tau_w^3} \int_0^{\tau_w} \tau^2 f(\tau) d\tau \quad (2.12)$$

Integrando la ecuación (2.13), considerando un fluido pseudoplástico que cumple la ley de potencia, se tiene:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{n}{3 \cdot n + 1} \left[\frac{\tau_w}{k} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (2.13)$$

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 pseudoplásticos y dilatantes, que se ajustan al modelo de Ostwald de Waele, la expresión es:

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot v}{D} \right) \quad (2.14)$$

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.

$$\tau_p = \frac{\Delta P_f \cdot D}{4 \cdot L} \quad (2.15)$$

Donde:

ΔP : caída de presión por rozamiento, (Pa)

L: longitud de la tubería entre los puntos de toma de presión, (m)

Sustituyendo las expresiones (2.16) ecuación (2.15) y transformándose el caudal por la velocidad, se obtiene.

$$\frac{D \cdot \Delta P_f}{4 L} = k \left(\frac{3n + 1}{4n} \cdot \frac{8u}{D} \right)^n = k' \left(\frac{8u}{D} \right)^n \quad (2.16)$$

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

$$\Delta P_f = 2K \left[\frac{3n + 1}{n} \right]^n \frac{v^n L}{R^{n+1}} \quad (2.17)$$

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 pseudoplásticos 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).

$$\Delta P_f = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (2.18)$$

Donde: λ : es el coeficiente de fricción por rozamiento del fluido, (adim.)

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

2.4.1 - Expresiones para el cálculo de pérdidas de presión por resistencias locales

El factor de pérdidas locales de fricción, se puede encontrar expresado por ξ (adimensional), el cual es una función del número de Reynolds y de las relaciones geométricas del sistema de flujo. Donde.

$$\xi = \lambda \cdot \frac{L}{D} \quad (2.19)$$

Sustituyendo en la (2.19), se obtiene.

$$\Delta P_{loc} = \xi \cdot \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot \rho \quad (2.20)$$

Donde:

v: es la velocidad del fluido, (m/s).

ρ : densidad, (kg/m³).

2.4.2 - Selección del diámetro de la tubería

La elección correcta del diámetro de la tubería, tiene gran importancia técnico económica. El diámetro de la tubería se determina unívocamente por la velocidad apropiada del fluido en movimiento.

Peter's en su Texto Plant design and economics for Chemical Engineering brinda una tabla de velocidades

Tabla 2.1 velocidades económicas para el dimensionamiento de tuberías de acero

Diámetro Nominal	Velocidades recomendadas (m/s)		
	$\mu = 50cP$	$\mu = 100cP$	$\mu = 1000cP$
D			
1	0,46 – 0,9	0,30 – 0,60	0,09 – 0,18
2	0,76 – 1,07	0,46 – 0,76	0,15 – 0,24
4	1,03 – 1,52	0,76 – 1,06	0,24 – 0,36
8	2,00 – 2,3	1,22 – 1,52	0,40 – 0,35

Estos valores tratados mediante técnicas de regresión lineal de la siguiente ecuación empírica.

$$Vr = 0,133 \cdot \frac{D_N^{0,6}}{\sqrt{\mu}} \quad (2.21)$$

D_N : diámetro nominal de la tubería, (pulgadas).

μ : viscosidad, ($Pa \cdot s$)

2.5 - 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 esta 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.

2.5.1- 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 pirolisis de materiales lignocelulósicos y alcohol etílico, más conocido como emulgente P, esta 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 microemulsiones, la utilización de la combinación de STA que actúan como surfactantes y cosurfactantes, con lo cual se refuerzan condiciones físico-químicas, se incrementa el grado de auto emulsión y puede ser disminuida la agitación mecánica durante su preparación.

2.5.2- Pruebas de reología

El estudio reológico fue obtenido por medio de investigaciones realizadas en la Universidad de Oriente. El equipo utilizado en las pruebas, fue un viscosímetro rotacional de cilindros concéntricos, Rheotest 2,1 de fabricación alemana, el mismo se muestra en la figura 1 del anexo1. Este sistema de medidas es de tipo Searle, es decir el gradiente de velocidad se logra por medio de dos cilindros, uno exterior (vaso) en reposo y otro interior rotatorio (rotor), que gira con un número de revoluciones fijo o variable. El giro del cilindro interior provoca el flujo del líquido que se encuentra en la ranura anular que forman los dos cilindros. La resistencia del líquido cizallado es proporcional al momento de giro o torque, dependiente de la viscosidad. Entre el motor de accionamiento y el eje del cilindro interior está colocado un instrumento de medición del momento de giro.

Los valores de (τ) se determinan mediante la siguiente ecuación:

$$\tau = Z \cdot \alpha \quad (2.22)$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante (Pa).

Z: constante del cilindro rotor que se utiliza (Pa/cSt).

α : lectura del instrumento y que resulta proporcional a la resistencia que ejerce el fluido al giro del rotor (cSt).

Se toman como valores de γ los de la variable γ° , 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:

Cilindro S_2 $zs_1=0,577$ $zs_2=5,78$

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

2.6 - Empleo de las técnicas de modelación por elementos finitos para la simulación del flujo

La gran evolución de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido afrontar la resolución de complejos problemas físico-matemáticos cuya resolución analítica resultaría prácticamente imposible. De hecho, muchos de estos problemas hace ya años que están planteados matemáticamente, solo falta un medio adecuado para la obtención de resultados prácticos confiables.

En la actualidad, el Método de los Elementos Finitos (MEF) ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación mediante MEF, se intenta reproducir la realidad a partir de la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización.

El algoritmo desarrollado por etapas para el análisis que desarrolla el paquete ANSYS. Para este estudio, se modela un tramo de tubería recta, en la cual se

simulara la circulación del fluido con las propiedades reológicas obtenidas de la emulsión a la temperatura de 35 °C; los resultados obtenidos se comparan con los experimentales; de esta forma podremos decidir el grado de predicción de este método al aplicarlo a fluidos no newtonianos.

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, 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 desafaltenización 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.

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

Características físico – químicas del compuesto		
Índices		Resultados
<i>Densidad</i>	- ° API - kg/m ³	11,0 987
<i>Viscosidad cinemática 40 °C, cSt</i>		3158,05
<i>Temperatura de inflamación, °C</i>		79
<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

Tabla 2.2. Continuación	
Temperatura de craqueo, °C	368
Temperatura de congelación, °C	10
Temperatura de fluidez, °C	13
Composición hidrocarbonada, %	
Saturados.....	20,93
Aromáticos.....	70,73
Resinas.....	3,55
Contenido de ligeros hasta nC5, %	1,5
Níquel, ppm	56,0
Vanadio, ppm	84,0

Fuente: Om et al., 2004

- 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, para este propósito se pueden utilizar los diseños factoriales completos a tres niveles; que se determina con un arreglo de la función exponencial:

$$N = 3^K \quad (2.23)$$

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.

La confirmación de la validez de los valores experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental " X_{exp} " de la caída de presión y el valor teórico " X_{teo} " obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento.

El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot 100 \quad (2.24)$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{\text{exp}} - X_{\text{teo}}}{X_{\text{exp}}} \right| \cdot \frac{100}{n} \quad (2.25)$$

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 industriales 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 abordó acerca de la técnica experimental que se emplea para llevar a cabo el proceso de transporte de emulsión del crudo cubano.
- Se describen las propiedades características del petróleo crudo cubano lo que se refleja que el crudo pesado presenta un alto contenido de azufre y malas propiedades de transporte.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, INFLUENCIA TÉCNICO ECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL

3.1- INTRODUCCION

La comparación de los resultados experimentales con los resultados obtenidos a partir de los parámetros reológicos del fluido, mediante la simulación por elementos finitos, nos permite determinar el error puntual relacionado a la diferencia de los métodos empleados; esto proporciona el correcto análisis de los resultados e incidencias relacionadas al transporte del fluido en la industria.

Se establece como **objetivo** del capítulo

Realizar la simulación del fluido, teniendo en cuenta las propiedades reológicas, así como obtener resultados experimentales del fluido mediante gráficas, tablas y esquemas que dan una gran información para llevar a cabo el transporte de la emulsión del crudo pesado por una tubería.

3.2- Características reológicas

A partir de los resultados de las propiedades reológicas de la emulsión, se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), a diferentes temperaturas. En la (tabla 3.1) se presentan las curvas de flujo ajustando los datos experimentales a partir del programa profesional Microsoft Excel, se obtuvieron los parámetros de uno de los modelos 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 tenso activo (emulgente P), se trazaron las curvas características del esfuerzo de corte contra el gradiente de velocidad (Figura. 3.1), mediante 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, τ (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

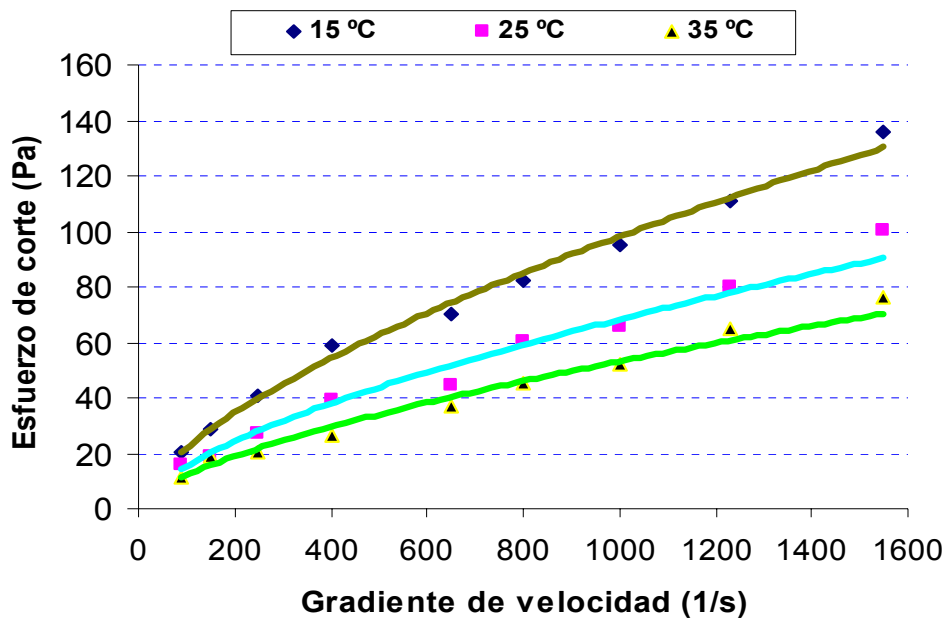


Figura 3.1. Dependencia entre el gradiente de velocidad y esfuerzo de corte para cada temperatura

Se observa en el gráfico, 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 flujo, (n).

3.2.2 - Estimación de los parámetros reológicos

Al representar gráficamente los datos experimentales de τ 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 la tabla 3.1, utilizando el Programa profesional "Microsoft Excel".

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 ²	0,998	0,971	0,972

El estadístico R² indica que el modelo explica un 97,1% como mínimo, de la variabilidad del esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad, 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. Para las muestras tomadas se pudo apreciar que con el aumento de la temperatura K disminuye.

En los datos relacionados, se puede notar que al aumentar la temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, no siendo así los del índice de flujo, que manifiestan variaciones insignificativas, con un valor promedio de 0.64.

3.2.3- Comportamiento pseudoplástico de la viscosidad aparente

Para los materiales no newtonianos, queda claro que al analizar la viscosidad, hay que tener en cuenta la influencia del gradiente de velocidad, es por ello que el concepto que debe usarse es de viscosidad aparente. Los resultados que se muestran de 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 realizar 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, μ_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; condición esta, de vital importancia al trabajar con este tipo de fluido.

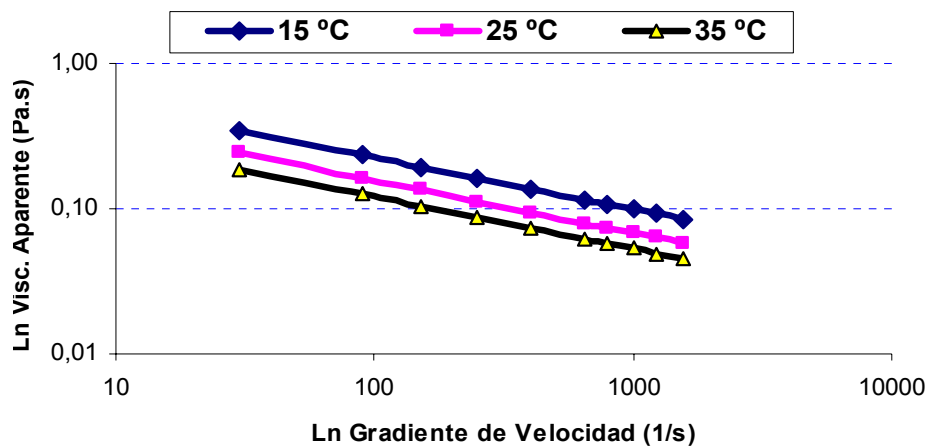


Figura 3.2. Dependencia entre el gradiente de velocidad y la viscosidad aparente

En esta figura se observa, que los valores de viscosidad aparente en el caso de las tres temperaturas (15, 25 y 35 °C) disminuyen con el aumento de la temperatura. A partir de este análisis, se obtiene 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 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 cambian muy poco con dicho incremento. Mediante el estudio realizado en la figura 3.2 se permite establecer el comportamiento de la viscosidad aparente a partir de las variaciones de las temperaturas.

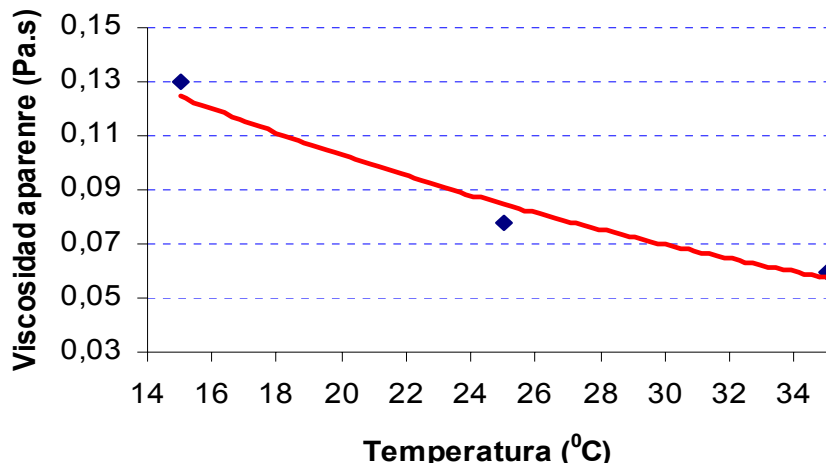


Figura 3.3. Comportamiento de la viscosidad aparente en función de la temperatura.

En la figura 3.3, se demuestra que la viscosidad y los parámetros reológicos disminuyen con el aumento de la temperatura. Este comportamiento es típico de las emulsiones directas.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de la emulsión, se representa mediante la ecuación 1.1, que se define como la ecuación de Andrade. A partir de los coeficientes relacionados en la ecuación 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.

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

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, confirmando lo citado en las literaturas referenciadas, debe tener una relación exponencial entre la temperatura y la viscosidad aparente. Esta 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 $^{\circ}\text{C}$. 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 con respecto a la temperatura (Figura 3.4) nos permite determinar el modelo que relaciona ambas variables.

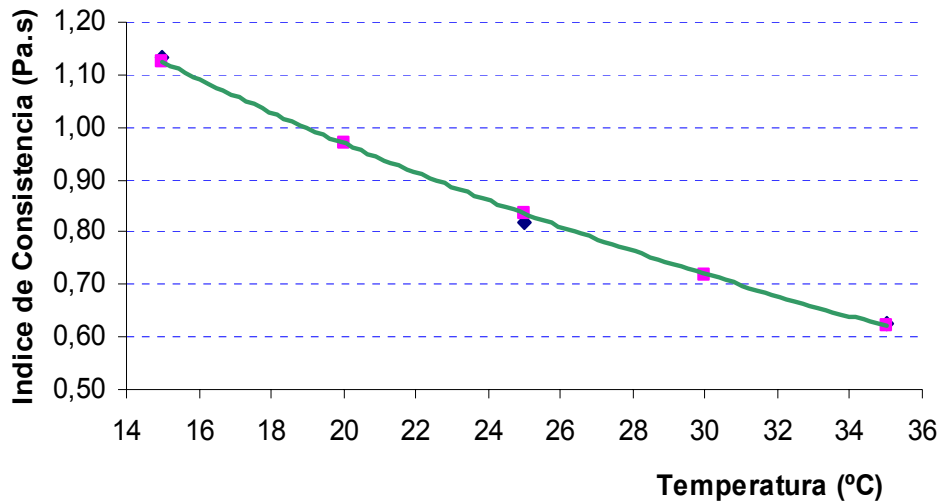


Figura 3.4. Comportamiento del índice de consistencia másica en fusión de la temperatura.

Esta figura muestra la curva generalizada que permite estimar los valores de (K) en función de la (T), a una concentración dada, lo que estima un comportamiento de 98,9 de nivel de confianza.

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 consistencia másica y definir el modelo que aparece en la ecuación,

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

Donde, t : temperatura, (°C).

La ecuación para el índice de 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 °C - 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 índice de flujo (Tabla 3.2), es poco afectados 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 se obtuvieron en una 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 (0,0254 m), 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 realizaron a una temperatura alrededor de los 30 a 35 °C.

3.3.1 - Dependencia entre la pendiente hidráulica con 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 $i = f(v)$ para el flujo de la emulsión en una tubería de una pulgada, para cada resultados se determinó el coeficiente de fricción y el número de Reynolds. El número de Reynolds, permite establecer el criterio de semejanza en diferentes condiciones de flujo y valida para fluidos seudoplástico y dilatante. Según la naturaleza reológica del fluido se determina por la ecuación 3.4.

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

En los fluidos no newtonianos, el número de Re crítico donde culmina el régimen laminar es $Re_{cr} = 2100$. El régimen de transición se extiende hasta 4000.

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, (Ecuación 2.17), que estima las caídas de presión en una tubería cuando se transporta un fluido pseudoplástico 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, 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 (λ) y el número de Re.

Tabla 3.4: Resultados de la velocidad, coeficiente de fricción y el número de Reynolds

No	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	i (Pa/m) Simulación	i (Pa/m) Experimental	Error Puntual (%)
1	0,11	0,200554	1030	1029,95	0,0048
2	0,14	0,255251	1198,47	1165,12	2,863
3	0,19	0,346412	1457,17	1446,01	0,771
4	0,2	0,364644	1513	1513,12	0,0079
5	0,3	0,546966	1951,93	1916,6	1,843
6	0,4	0,729288	2346,52	2268,1	3,458
7	0,5	0,91161	2723	2719,88	0,11
8	0,6	1,093932	3041,75	2992,4	1,649
9	0,7	1,276254	3357,14	3268,11	2,724
10	0,8	1,458576	3675	3674,39	0,016
11	0,9	1,640898	3942,95	3870	1,885
12	1	1,82322	4241	4238,46	0,059
13	1,5	2,73483	5467,7	5499,21	0,573
14	1,8	3,281796	6144,42	6108,31	0,591
15	2	3,64644	6607	6604,92	0,031

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

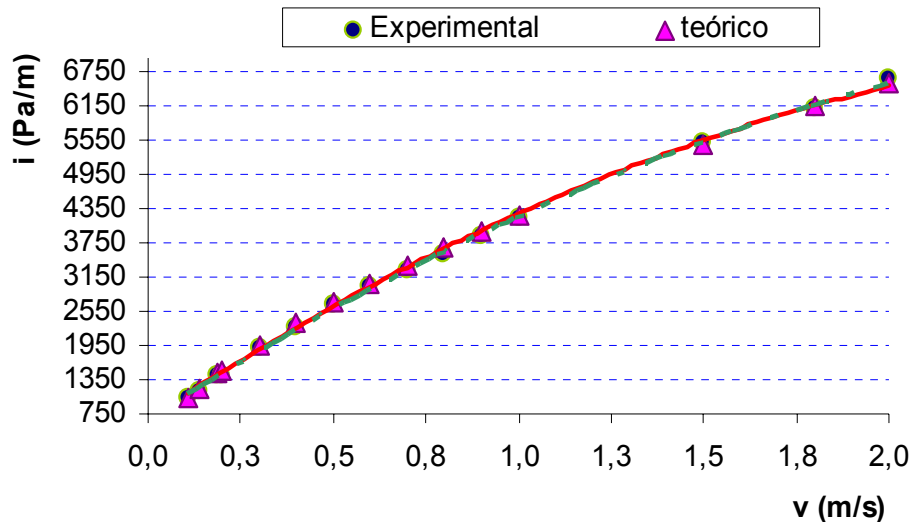


Figura 3.5. Pérdidas específicas de presión teórica y experimental en la tubería de una pulgada de diámetro.

En la 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 experimento.

Del análisis del error puntual de cada experimento relacionado a la simulación del modelo (ecuación 2.17), 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 solo 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 a los 3.97 %, obteniendo una probabilidad de 95,7 %, lo que confirma la validez del mismo.

3.3.2- Análisis de la modelación por el método de elemento finito

A continuación se encuentran varias simulaciones realizadas, mediante el programa asistido a la computación llamado (ANSYS), que me permite obtener la caída de presión que se experimenta en una tubería de una pulgada. Con las propiedades del fluido y a distintas velocidades de transporte, se obtuvieron valores simulados de caída de presión. Los resultados con los de la tabla 3.4

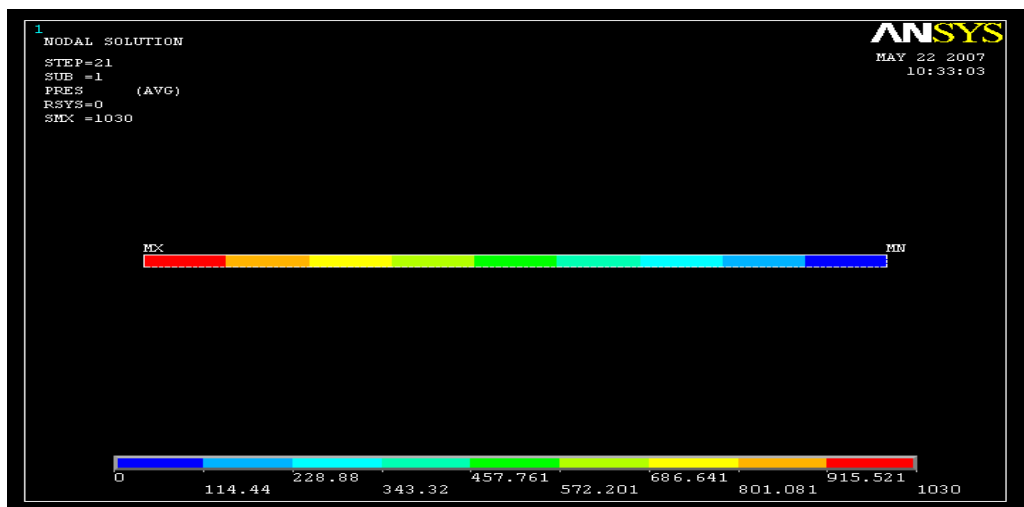


Figura 3.6.Modelo para una velocidad, ($V = 0,11$)

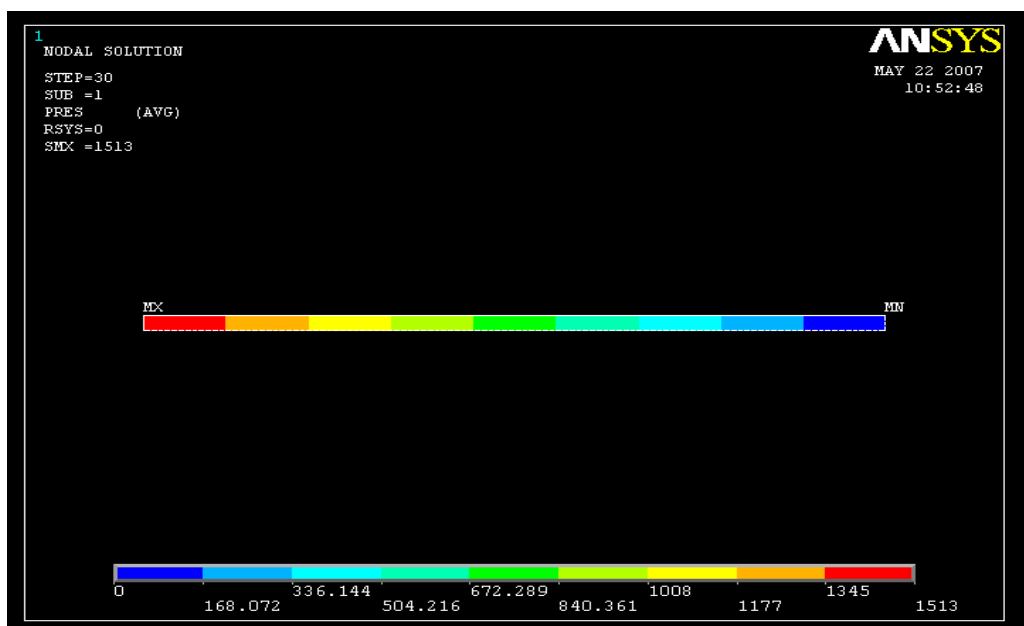
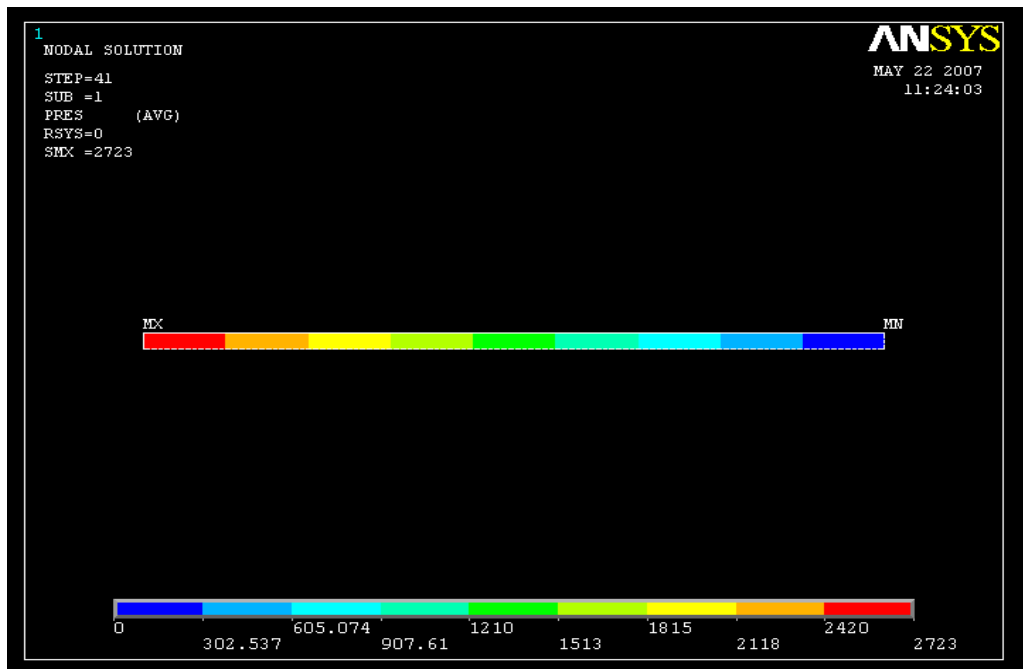
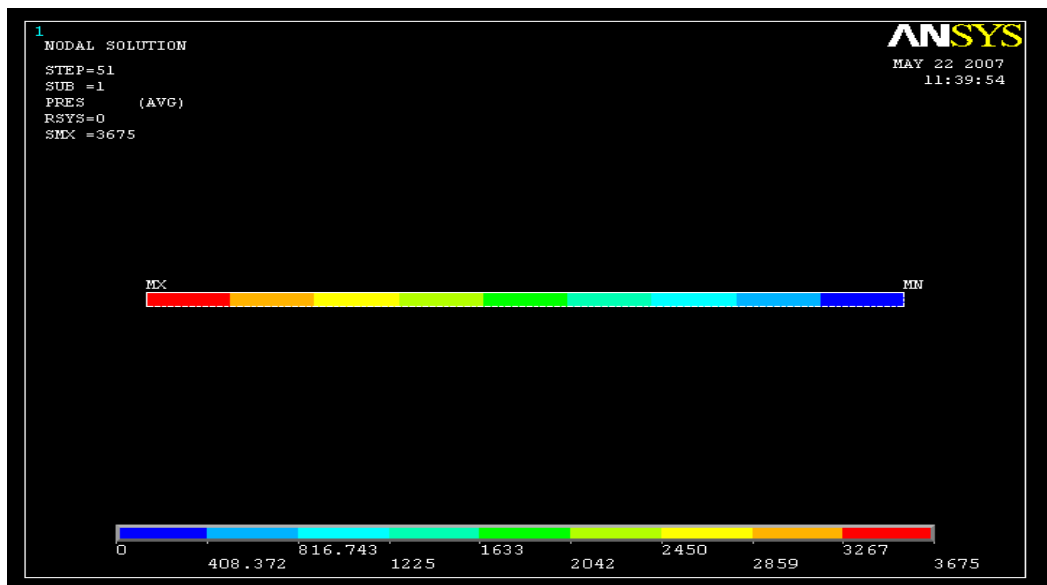
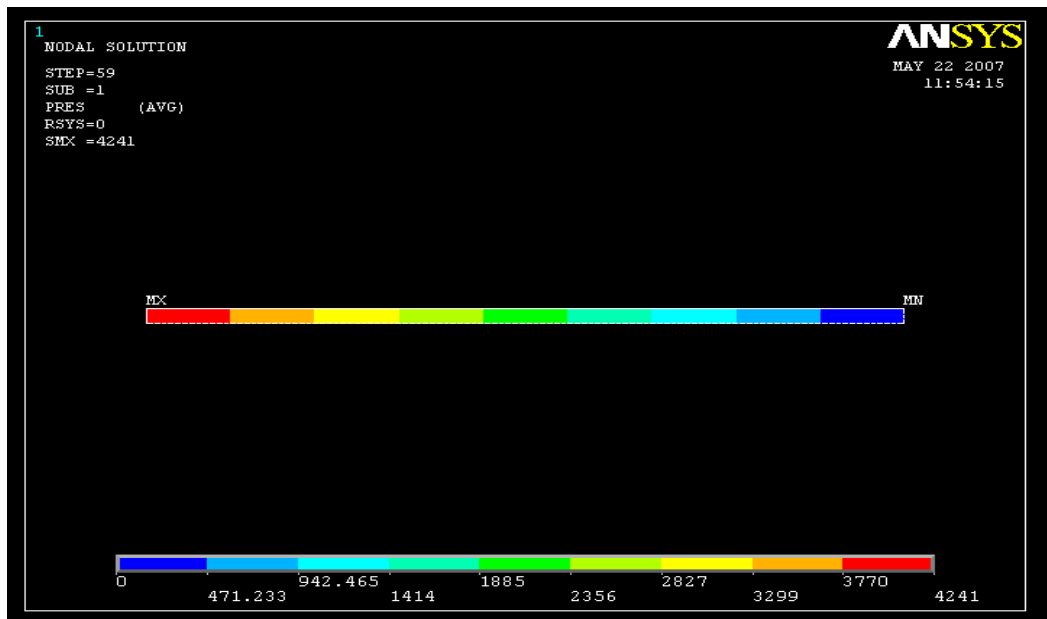
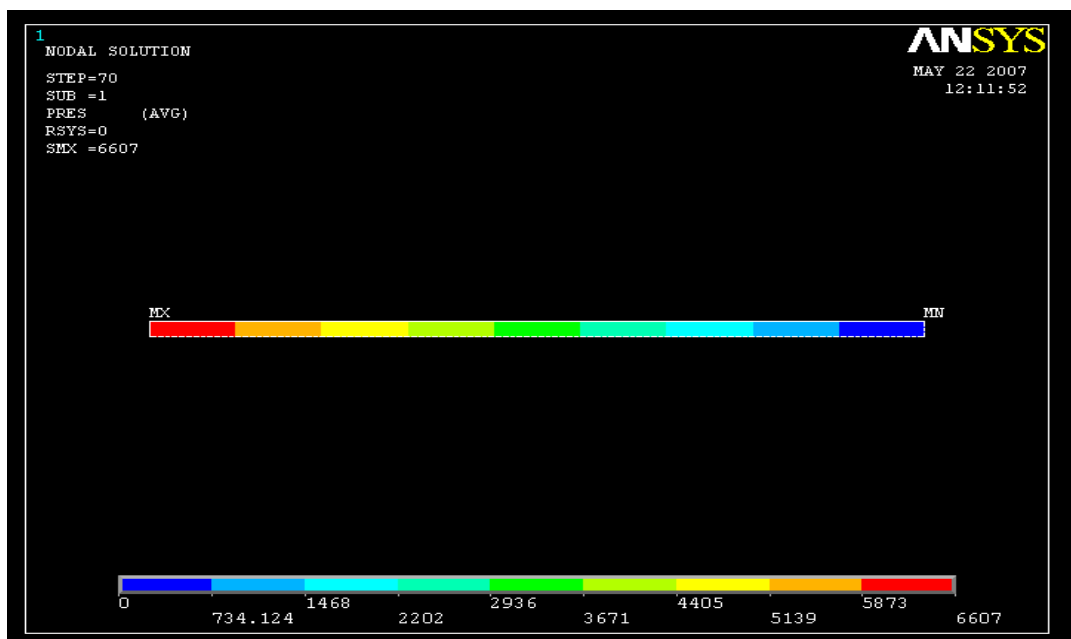


Figura 3.7.Modelo para una velocidad, ($V = 0,2$)

Figura 3.8. Modelo para una velocidad, ($V = 0,5$)Figura 3.9. Modelo para una velocidad, ($V = 0,8$)

Figura 3.10. Modelo para una velocidad, ($V = 1$)Figura 3.11. Modelo para una velocidad, ($V = 2$)

Con la realización de estos modelos se obtuvo la caída de presión que experimenta el fluido teniendo en cuenta los parámetros reológicos; los resultados obtenidos se encuentran en la tabla 3.4 la cual se calculan los errores puntuales al establecerse la comparación con los resultados de caída de presión experimentales.

3.4- Correlación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds

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

Tabla 3.5: Resultados de la velocidad, coeficiente de fricción y el número de Reynolds.

no	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)	λ	Re
1	0,11	0,200554	4,382	14,61
2	0,14	0,255251	3,157	20,28
3	0,19	0,346412	2,084	30,71
4	0,2	0,364644	1,944	32,93
5	0,3	0,546966	1,12	57,16
6	0,4	0,729288	0,757	84,54
7	0,5	0,91161	0,559	114,51
8	0,6	1,093932	0,436	146,73
9	0,7	1,276254	0,354	180,96
10	0,8	1,458576	0,295	216,99
11	0,9	1,640898	0,251	254,69
12	1	1,82322	0,218	293,93
13	1,5	2,73483	0,125	510,18
14	1,8	3,281796	0,098	653,75
15	2	3,64644	0,085	754,46

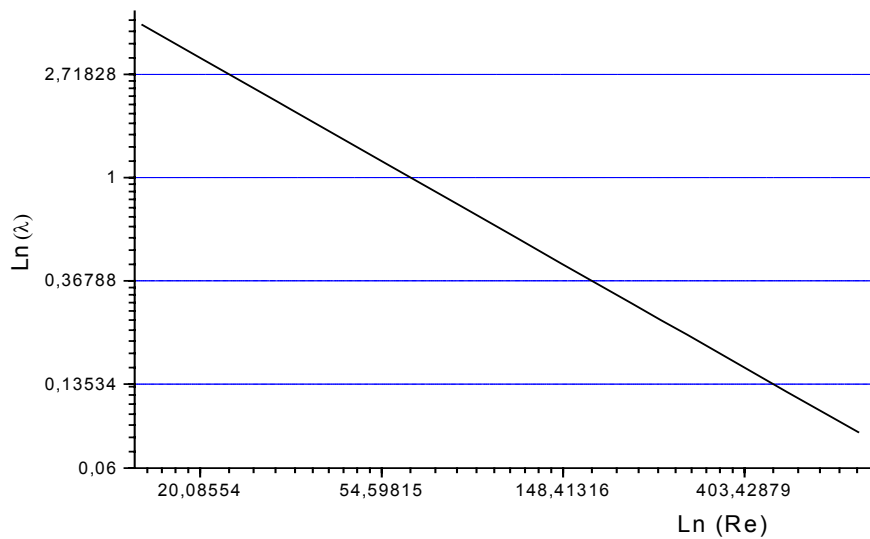


Figura 3.12: Correlación entre el factor de fricción y el número de Reynolds

En la figura 3.12, puede verse que el coeficiente de fricción es una función del Re para el régimen laminar, obtenida de los datos de la Tabla 3.4. Queda destacar, que solo se analiza para valores bajos de Re; alrededor de 754, por no constar con datos experimentales fuera de esta zona.

Las magnitudes Re y λ se calculan con los resultados experimentales y de las mediciones.

Generalmente, estos términos adimensionales se relacionan entre sí mediante la función potencial. Según, Garcell (2001); Dodge y Metzner han propuesto una relación para fluidos pseudoplásticos y dilatantes del tipo de la ecuación de Blasius, cuyos coeficientes y exponentes son función del índice de flujo (n).

$$\lambda = \frac{a'}{Re^B} \quad (3.5)$$

Tomando los logaritmos:

$$\ln(\lambda) = \ln(A) - (B) \cdot \ln(Re) \quad (3.6)$$

$$B = \tan \theta$$

Analizando los resultados de la figura 3.12 se deduce que para el caso de la emulsión tratada, el factor de fricción (λ) puede ser estimado para números de Re.

$$\lambda = \frac{64.01}{Re} \quad (3.7)$$

Esta ecuación es valida 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 la el valor de la unidad.

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.

3.5 - 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 hidráulico; Teniendo siempre presente los problemas que esta puede causarle al medio circundante (Laurencio, 2004).

a- Determinación del costo unitario de consumo energético para transportar un m³ 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.

$$C_T = \left(\frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \dots \dots \dots (3.8)$$

Donde:

C_T : costo unitario de Transportación, CUC

G_b : gasto horario de la bomba, CUC

Q : caudal del fluido transportado, m³/h.

L : longitud de la línea, (m)

b- Gasto horario de la bomba

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

$$G_b = C_{elec} \cdot \dots \dots \dots (3.9)$$

Donde:

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

$$C_{elec} = \frac{T_a \cdot N_n \cdot K_p \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \dots (3.10)$$

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.

η_m : rendimiento del motor eléctrico, (%)

η_b : rendimiento de la bomba, (%)

En la Tabla 3.6, 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 3.8.

Tabla 3.6: 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 _{elec} (CUC)		
		η (60 %)	η (70 %)	η (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 nos 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 3.13, 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.

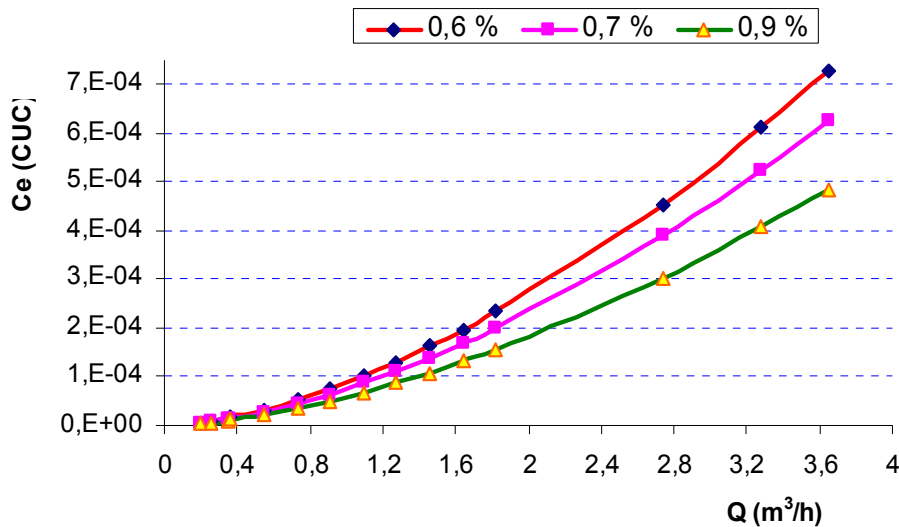


Figura 3.13: Comportamiento costo en CUC para distintos rendimientos de bombeo

3.6 - Recomendaciones medioambientales para el transporte y manipulación de emulsión de petróleo pesado

En los últimos años el impacto del 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.

1- Peligros ambientales

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, por lo que ejercen influencia sobre el medio ambiente.

2- 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.

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.

3- 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.

4- 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 exposímetro. Además, debe comprobarse la presencia de sulfuro de hidrógeno con sensores electroquímicos o tubos indicadores.

3.6.1 - Emulsiones de agua y combustible

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 combustible 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.

3.7 - Conclusiones del capítulo

- Las emulsiones de petróleo pesado presentan un comportamiento pseudoplástico. A partir del estudio se comprobó que al incrementar la temperatura de la emulsión y el gradiente de velocidad la viscosidad aparente disminuye gradual; siendo esto un aspecto importante a tener en cuenta al seleccionar las velocidades de transporte del fluido.
- Se realizó la simulación del fluido teniendo en cuenta los parámetros reológicos del mismo, se obtuvo la caída de presión que experimenta el fluido en la tubería, donde se obtiene un error permisible de cálculo que no sobrepasa el 4%, lo que confirma la validez de la aplicación del método de elementos finitos.
- 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.

CONCLUSIONES GENERALES

- Los valores de índice de flujo calculados a partir de los reogramas, 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.
- La viscosidad aparente para las tres temperaturas estudiadas (15, 25 y 35 °C) disminuye con el aumento del gradiente de velocidad, siendo este comportamiento característico en fluidos pseudoplástico.
- De acuerdo con los resultados del análisis obtenidos en la simulación mediante el ANSYS se observa, que la caída de presión es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad observando así en los modelos que para la máxima velocidad de 2 m/s la caída de presión es de 6607 N/m².
- Mediante los resultados obtenidos en la simulación y los resultados experimentales se tuvo en cuenta un error puntual donde se observa que el error no sobrepasa el 4%, lo que valida el método de simulación empleado.
- Con la aplicación de la emulsión del combustible se logra reducir la emisión de agentes contaminantes a la atmósfera.

1.8 – Comportamiento reológico de emulsiones de bitumen en agua con distribución monomodal

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. (ver [fig 1.6](#)).

Figura 1.6: Dependencia entre diámetro de gota y % de volumen.

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.

Es importante señalar que 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.

1.8- Estabilidad de las emulsiones

La estabilidad estática se refiere a los cambios que sufren las emulsiones de bitumen en agua, durante su almacenamiento, el cual es reflejado por un aumento

ANEXO 1**ANEXO 2**

Características físico – químicas de las fracciones destiladas a °C Temp.							
Índices	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.
	1-100	100 - 150	150 - 190	190 -235	235 - 280	280 - 343	343 - 450
API	66	48,9	42	36,5	30	23	19,1
Índice de refracción	1,4150	1,4356	1,4502	1,4647	1,4832	1,5069	1,5187
Azufre total, % m/m	0,52	0,90	1,49	2,15	2,69	3,37	4,32
Azufre mercaptano, % m/m	0,0087	0,019	0,013	ausencia	ausencia	-	-
Sulfhídrico, % m/m	0,0025	0,010	0,087	ausencia	ausencia	-	-
Acidez, mg KOH/g	0,11	0,24	0,3	0,3	0,47	0,88	0,98
Nº de yodo	-	-	-	4,77	3,22	-	-

Carbón Conradson, % m/m	-	-	-	-	-	0,10*	0,022
Cenizas totales, % m/m	-	-	-	-	-	0,004	0,0027
Índice de cetano	-	-	-	-	38,74	38,50	-
Punto de inflamación, °C	-	-	-	-	-	130	154
Asfaltenos, % m/m	-	-	0,055	0,067	0,080	0,070	0,11

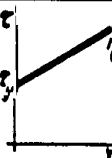
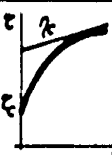
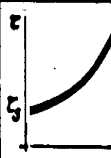
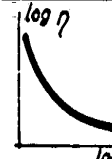
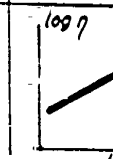
Fuente: Om et al., 2004

ANEXO 3

Composición Hidrocarbonada del resto de las fracciones destiladas a distintas temperaturas en °C					
Índice	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.	Temp.
	150 - 190	190 - 235	235 - 280	280 - 343	343 - 450
Comp. hidrocarbonada, %					
<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
Contenido de aromáticos por espectroscopia UV, %					
<i>Monocíclicos</i>	14,85	34,72	40,29	32,41	
<i>Policíclicos</i>	0,02	1,02	3,75	10,39	
Totales	14,87	35,74	44,04	42,80	

Fuente: Om et al., 2004

ANEXO 4

	Materiales ideales	Pseudoplásticos		Plásticos			Dilatantes
	Newton	Ostwald	Steiger - Orr	Bingham	Casson	Otros	Ostwald
Comportamiento al flujo $\tau = f(\dot{\gamma})$							
Características $\tau = f(\dot{\gamma})$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta}$	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ $n < 1$	$\dot{\gamma} = A \tau^b + C \cdot \tau$	$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2}{\eta_c}$	$\dot{\gamma} = K(\tau - \tau_y)^n$ $n < 1$	$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$ $n > 1$
Viscosidad $\eta = f(\tau)$	$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$			$\mu_p = \frac{\tau - \tau_y}{\dot{\gamma}}$	$\eta_c = \frac{(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_c})^2}{\dot{\gamma}}$		
Límite de fluencia τ_y	0	0	0	$\tau_y = \tau - \mu_p \cdot \dot{\gamma}$	$\tau_c = (\sqrt{\tau} - \sqrt{\eta_c} \cdot \dot{\gamma})^2$		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 5

Valores de los coeficientes de las pseudocurvas y curvas de flujo (parámetros reológicos de $(K \text{ y } \tau)$).

Estos son valores para obtener la grafica de que son curvas de flujo de esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad.

Emulsión	% de emulg	n	K	μ	τ_{00}
60 - 40 PH = 5,09	6%	0,5852	0,3876	-	-
	4%	-	-	0,0095	3,098
	3%	-	-	0,0077	2,4207
70 - 30 PH = 11,22	6%	0,6222	0,1452	-	-
	4%	0,578	0,3361	-	-
	3%	-	-	0,0123	2,3453
70 - 30 PH = 12,18	6%	0,6309	0,2205	-	-
	4%	-	-	0,0176	16,1818
60 - 40 PH = 5,09 (30°C)	6%	0,6781	0,1727	-	-
60 - 40 PH = 5,09 (40°C)	6%	-	-	0,0086	3,8718
60 - 40 PH = 11,22 (30°C)	6%	-	-	0,0102	4,7046
60 - 40 PH = 11,22 (40°C)	6%	-	-	0,0144	1,1869
70 - 30 PH = 11,22 (30°C)	6%	-	-	1,693	0,802
70 - 30 PH = 11,22 (40°C)	6%	0,7329	0,2417	-	-

En el anexo 6 estos emulgentes se utilizan en ensayo:

Estos productos se obtuvieron en una instalación de pirolisis de laboratorio compuesto de un horno eléctrico y sistemas de extracción de gases haciendo vacío condensándolos en tubos refrigerantes y trampas. También se emplearon productos obtenidos de una instalación semi industrial compuesta por un horno metálico y sistema de colección de líquidos en tres recipientes y un condensador, los agentes emulsionantes (emulgentes) utilizados fueron preparados para trabajos.

Tabla de emulgentes

ANEXO 6

N°	Emulgente y PH	Tensión superficial	Concentración	Resultados
1	Aserrin	35	6% , 4% , 3%	Emulsión directa y estable en los 3 casos
	5,09			
2	Aserrin	33	6%	Inversa y estable
	6,6			
3	Aserrin	35	6% , 4% , 3%	Emulsión directa y estable en los 3 casos
	12,18			
4	Aserrin	35	6% , 4% , 3%	Emulsión directa y estable en los 3 casos
	11,22			
5	Aserrin	36,1	6%	Inversa y estable
	6,47			
6	Bagazo	35,93	6%	No se forma
	5,48			
7	Aserrin	34	6%	Inversa y estable
	6,25			
8	Aserrin	37	6%	No se forma
	5,55			
9	Madera	-	6%	Inversa y estable
	11,84			
10	Madera	-	6%	Inversa y estable
	8,98			

Anexo# 7 que recogen valores corregidos de gradiente de velocidad

Tabla 1 - Valores reales de gradiente para la emulsión 60 - 40 con 6% de emulgente de PH = 5,09.

Gradientes	Por Kreiger	Por Oswal de Waele
95,33	97,7314	97,7314
158,9	162,9028	162,9027
286	293,2045	293,2044
476,63	488,6366	488,6364
857,93	876,5417	

Tabla 2 - Valores reales de gradiente para la emulsión 60 - 40 con 3% de emulgente de PH = 5,09.

Gradientes	Por Kreiger	Por Plastico Bingham
286	295,8535	296,8987
476,63	484,8553	487,5287
857,93	861,3008	868,8287

Tabla 3 - Valores reales de gradiente para la emulsión 70 - 30 con 6% de emulgente de PH = 12,18.

Gradientes	Por Kreiger	Por Oswal de Waele
95,33	97,3092	97,3092
158,9	162,1991	162,199
286	291,9379	291,9378
476,63	486,5257	486,5256
857,93	857,7422	875,7421

Tabla 4 - Valores reales de gradiente para la emulsión 70 - 30 con 4% de emulgente de PH = 12,18.

Gradientes	Por Kreiger	Por Plastico Bingham
476,63	459,9498	499,7685
857,93	788,9047	881,0695

Tabla 5 - Valores reales de gradiente para la emulsión 60 - 40 con 6% de emulgente de PH = 5,09 a 30°C.

Gradientes	Por Kreiger	Por Oswal de Waele
31,78	32,3147	32,3147
52,96	53,8511	53,8511
95,33	96,9339	96,9339
158,9	161,5735	161,5735
286	290,812	290,8119
476,63	484,6494	484,6493
857,93	872,3647	872,3646

Tabla 6 - Valores reales de gradiente para la emulsión 60 - 40 con 6% de emulgente de PH = 11,22 a 30°C.

Gradientes	Por Kreiger	Por Plastico Bingham
95,33	111,4592	111,3991
158,9	173,7701	174,9691
286	298,3639	302,0691
476,63	484,2886	492,6991
857,93	852,0552	873,999

Tabla 7 - Valores reales de gradiente para la emulsión 70 - 30 con 6% de emulgente de PH = 11,22 a 40°C.

Gradientes	Por Kreiger	Por Oswal de Waele
286	289,6895	289,6895
476,63	482,7787	482,7787
857,93	868,9977	868,9976

Anexo 8**Tabla 1- 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 9**Tabla 2 - Resumen estadístico del análisis de la caída de presión.**

Tabla 2 Resumen estadístico del análisis de la calidad de proceso

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	15	48595,3542	3239,69028	3155525,04		
Columna 2	15	48065,35	3204,35667	3207507,22		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
O.de las v.	S.de c.	G.de l.	Pr. de c.	F	Probabilidad	Valor crítico para F
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 3 - Resumen estadístico del análisis de la potencia.

Tabla 6. Resumen estadístico del análisis de la potencia.						
Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Columna 1	15	25,7090402	1,71393601	4,43222567		
Columna 2	15	22,64	1,50933333	3,3745091		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
O. de las v.	S.de c.	G. de l.	P. de c.	F	Probabilidad	V.crít. para F
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				

del diámetro promedio de gotas acompañado de un aumento de la viscosidad de esta.

En la figura 1.7, se esquematizan los tipos más comunes de desestabilización normalmente observados en emulsiones, los cuales se discuten brevemente a continuación.

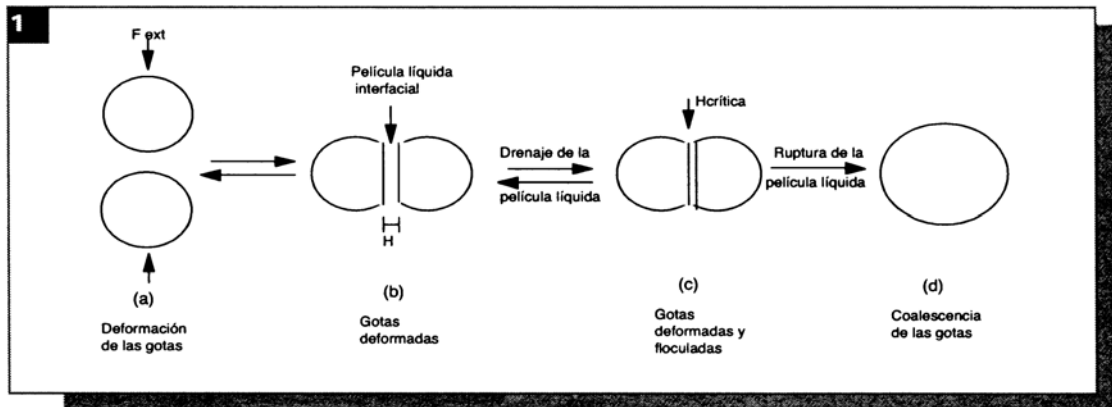


Figura 1.7: Desestabilización normalmente observados en emulsiones.

- **Floculación:** Proceso de agregación de gotas sin que éstas pierdan su identidad, y sin cambio en el diámetro promedio de las mismas. La floculación es el resultado de las atracciones de Van der Waals y de las interacciones electrostáticas y esféricas, entre moléculas de surfactante adsorbidas sobre la superficie de gotas adyacentes.
- **Sedimentación:** Agregación de las gotas bajo la influencia de la gravedad, como consecuencia de una diferencia de densidad apreciable entre las fases continua y dispersa. Cuando la fuerza de gravedad excede el movimiento térmico de las gotas, se desarrolla un gradiente de concentración en el sistema, en el que las gotas más grandes se mueven a mayor velocidad hacia la superficie (si la densidad de la fase dispersa es menor que la de la continua), o hacia el fondo (si la densidad de la fase dispersa es mayor que la de la continua). En los casos extremos, las gotas se concentran en la superficie ("creaming") o en el fondo (sedimentación).

En ninguna de estas situaciones, las gotas pierden su individualidad y el proceso es reversible.

- **Coalescencia:** Proceso de coalescencia en una emulsión, que implica la unión de varias gotas para formar otras más grandes, lo que finalmente conduce a la separación de las fases. Para que se produzca la coalescencia, es necesario que la película líquida interfacial que rodea las gotas, así como la monocapa de surfactante adsorbida sobre la superficie de las mismas sufran un completo deterioro. La coalescencia es un proceso irreversible, difícil de explicar teóricamente. Este, es monitoreado a través del diámetro promedio de las gotas.
- **Inversión:** Cambio de una emulsión de aceite en agua a otra de agua en aceite. La inversión puede ser promovida por varios factores entre los cuales destacan la temperatura, cambios en la formulación del sistema y efectos de tipo mecánico, entre otros.

1.1 - Emulgente para la preparación de emulsiones agua-combustible

Se conoce una cantidad considerable de compuestos que pueden ser absorbidos en las interfases Líquidos u otras fases no miscibles regulando su dispersión. A las sustancias conteniendo estos compuestos se les denomina sustancias tensioactivas (STA) y se utilizan para mantener la estabilidad de emulsiones espumas y otros casos similares.

En el caso de las fracciones combustibles obtenidas del petróleo y el agua, en la absorción de la STA influyen el tipo de emulsión (de aceite en agua o de agua en aceite) el grado de dispersión (tamaño de gotas de la fase dispersa) estabilidad y características reológicas de la emulsión y otras propiedades. Hernández (1992).

Las emulsiones combustibles acuosas requieren de una serie de propiedades para el nuevo "combustible emulsionado" y que pueden resumirse en:

- Formar una emulsión homogénea en las cuales las gotas de agua posean el menor tamaño posible.

- Lograr la estabilidad de las gotas (su encapsulado) de manera que impidan la coalescencia y en lo posible la floculación, pero que se produzca la "explosión" con el incremento brusco de la temperatura en la cámara de combustión.
- Mantener la viscosidad del combustible en los límites exigidos.
- Evitar en lo posible las condiciones que den lugar al incremento de la corrosión y desgaste en la alimentación del combustible en la combustión.
- Disminuir la toxicidad de los gases resultantes de la combustión así como la formación de residuales sólidos.

En las patentes No. 3850586 de EUA y No. 1362878 de Inglaterra para la obtención de combustible gelificado (emulsionado) se utilizan compuestos aminos de ácido grasos como único agente.

Algunas sustancias tensioactivas utilizadas en investigaciones son no - iónicas y sus nombres, comerciales son WITCONOL e IGEPAL. Su estructura química está compuesta por una cadena de moléculas de óxido de etileno unidas en la posición α de un radical nonilfenil y con un grupo OH en el carbono Ω que la da una característica polar a la cadena.

Considerando que estas cadenas coordinadas con un grupo OH actúa como medio polar, es lógico que la energía polarizante de los tensioactivos con 6 moléculas de oxido de etileno, sea mucho mayor que para los que tienen cadenas largas. Para las series WITCONOL e IGEPAL a medida que aumenta el número de moléculas de óxido de etileno, aumentan también la tensión superficial, mientras que la concentración micelar crítica (cmc) disminuye.

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 mas conocido como emulgente P, esta compuesto en las siguientes proporciones:

Tabla 1.1: Componentes del emulgente P.

Componentes	%
-------------	---

Alquitrán Sodificado (Espumella)	1,0 - 1,2	27 - 35
Acido 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 tensioactivo o condiciones de preparación que aseguran solo la estabilidad de la emulsión bajo el efecto de la acción mecánica. Sin embargo, resulta conocido para emulsiones directas (de aceite en agua) y también en las microemulsiones, la utilización de la combinación de STA que actúan como surfactantes y cosurfactantes, con lo cual se refuerzan condiciones físico-químicas, se incrementa el grado de autoemulsión y puede ser disminuida la agitación mecánica durante su preparación.

La acción surfactante y co-surfactante se encuentra determinada en este caso por la estructura de las moléculas de la STA, siendo un factor importante la longitud de la cadena carbonatada.

Las emulsiones preparadas con el emulgente mantienen alta estabilidad y evitan la coalescencia de las gotas de agua por tiempo prolongado. El emulgente puede ser utilizado para la preparación de emulsiones acuosas de diferentes fracciones del petróleo como gas oil (diesel), querosina, fuel oil, otros. El emulgente puede trabajar con la presencia de aditivos que regulan diferentes propiedades de la emulsión, por ejemplo, la adición de fuel-oil, aceite, petróleo crudo y otros que aumenten la estabilidad y viscosidad de emulsiones de fracciones ligeras (ejemplo querosina, gasoleos) por la presencia de parafenos y/o resinas, la adición de electrólitos o reguladores de pH con los que varían condiciones de estabilidad u otros.

Las ventajas que ofrece este producto pueden resumirse en las siguientes:

- Se logra un emulgente a partir de productos abundantes, con posibilidades de producción en grandes magnitudes y bajo costo.

- Con el mismo se preparan emulsiones estables durante un período de tiempo largo en lo referente a la coalescencia del agua y aunque se produce floculación, esta resulta reversible bajo la acción de agitación suave o la introducción de aire.
- Están presentes compuestos orgánicos que se combustionan y como elemento inorgánico solo el sodio en pequeñas proporciones. Ello unido a las características de los fenoles y alcoholes hace disminuir los efectos incrustantes, corrosivos, etc.
- La emulsión puede prepararse en diversos tipos de equipos emulsificadores y en gran medida logra características autoemulsionantes.
- La emulsión preparada con el emulgente presenta viscosidad que no difiere significativamente de la del combustible diesel esta puede ser variada con diferentes aditivos y con la tecnología de preparación de la emulsión.

REFERENCIAS

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 coloide-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., Dewatwring 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. 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.
22. Fredrickson A.G., *Principles and Applications of Rheology*, Prentice – Hall Inc., New York, (1964).
23. 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).
24. 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
25. Garcell, L., *Determinación de parámetros reológicos en pulpas minerales que se comportan como plásticos reales*. *Revista Tecnología Química*, 1984, (2): 14-19.
26. 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).
27. Garcell, L., *Caracterización reológica de la pulpa de limonita de Moa*. *Revista Tecnología química*, 1992, (1): 5-9.
28. Garcell, L., *Comportamiento reológico de la pulpa laterítica*. Trabajo investigativo. ISPJAM, Facultad Ingeniería Química, 1993.
29. 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.
30. 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.
31. Garcell L.R. y col., *Interfacial and Rheological Characteristics of Maghemite Aqueous Suspensions*, *J. Colloid Interface Sci.*, 205, 470 – 475, (1998).
32. Garcell, L., *Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas*. Apuntes para una monografía, 2001, (2): 1 – 40.

33. 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).
34. Harms, H.L. et al., *Oil Tool and Method for Controlling Paraffin Deposits in Flow Lines and Downhole Strings*. CA PATENT 2032005. 1991.
35. Hydroquip Technologies INC. Magnetic Treatment of Fluids, US PATENT 5024759, 1991.
36. Iakovlev, S.V y Dalkov Y.M., *Transporte de calizas y sedimentos de aguas residuales*. Moscú: Gosstroishdat, 1961. 232 p.
37. 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).
38. Ibenskii, G.B. *Transporte de las mezclas de materiales para la construcción por tuberías*. Moscú: Gosstroishdat, 1957.
39. 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.
40. 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.
41. Kasatkin A. G., *Operaciones básicas y aparatos de la tecnología química*, tomo I, Editorial pueblo y educación, Ciudad de la Habana, Cuba, 1985.
42. Lang, L., *Power Unit Controls Scale Magnetically*, The American Oil & Gas Reporter, V 25, No. 9, 1982.
43. Leong, Y.K., BOGER D.V., *Surface Chemistry Effects on Concentrated Suspensión Rheology*. Journal. Colloid Interface Sei, 1990, 136(1): 249 – 258.
44. 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.

45. Liquitech Holding S.A., *Apparatus for Magnetically Conditioning a Liquid*, US PATENT 4999106, 1991.
46. Liu S. y Masliyah J.H., *On Non-Newtonian Fluid Flow in Ducts and Porous Media*, Chemical Engineering Science: 53 (6), 1175-1201 (1998).
47. Lomas W.R. y Saul A.J., *Laboratory Work in Hydraulics*. Granada Publishing, Londres, Inglaterra. pp. 71–117 (1979).
48. 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).
49. Macedo R.C., *Manual de Prácticas de Operaciones Unitarias I*, Universidad de las Américas, Puebla. México. Inéditos (2000).
50. 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.
51. 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).
52. 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).
53. 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.
54. Maruska H.P. y RAO, B., *Fuel Science and Technology* N°5, V2, 119-168, 1987.
55. 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.
56. 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.
57. 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.
58. Mechetti M., Rodríguez L., CASTAÑEDA, M. y Pelaez C., *Informe ICP*, Ecopetrol, julio 2001.
59. Mitchell, J., *Apparatus for Magnetically Treating Fluids*, US PATENT 4808306, 1990.
60. Nakayama T., E. Niwa y I. Hamada., *Pipe Transportation of Minced Fish Paste*. Journal of Food Science: 45 (4), 844-847 (1980).
61. Paul, J.C., *Effect of Chemical Struture on the Conduction and Breadkdown of Paraffin Oil*, Indian J. Technol., V 8, 1978.
62. Pakrovskaya, V.I., *El transporte hidráulico en la industria minera*. Moscú: Niedra, 1985. 192 p.
63. Pelaez C y Stachenco E., *Estudio del Efecto del Campo Magnético en Crudos Parafínicos por Cromatografía de Gases de Alta Resolución*, Ecopetrol – ICP, 1999.
64. 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.
65. Perry J.H., *Chemical engineers handbook*. 6 editions. New York: McGraw Hill Book, 1984.
66. Perona P., *An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids*. Journal of Food Engineering: 60, 137-145 (2003).
67. Rabinovich E.Z., *Hidráulica*. Ed. MIR, Moscú, URSS. pp. 115–191 (1987).
68. Reid, R. C. y Sherwood T. K., *The properties of gases and liquids*. 2da. edición, editorial Mc. Graw-Hillbook Company, New York, 1966.
69. Romo, L., *Emulsiones*, Editorial Universitaria, 1993.

70. Romo, L., *Formulación de emulsiones de petróleos pesados en agua*, Petroecuador-ESPE, convenio 96058, 1998
71. Rosabal, J. y Garcell L., *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. Tomo I.
72. 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).
73. 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
74. Somoza J. y García A., *Escenarios macroeconómicos a largo plazo del desarrollo energético y su impacto ambiental*. INIE, Octubre 2002.
75. Shedayev, T. CH. Y Zhao, F., *Magnetic Treatment Effect on Oil Properties*, J.Univ. Petrol. China, V 13, No. 4, 1998.
76. Steffe J.M. y R.G. Morgan., *Pipeline Design and Pump Selection for Non-Newtonian Fluid Foods*. Food Technology. Dic.: 78-85 (1986).
77. Skelland, A.H., *Non-Newtonian Flow and Heat Transfer*. La Habana: Instituto Cubano del Libro, 1970.
78. Suárez M. *Determinación de los parámetros del hidrotransporte de las pulpas del mineral serpentinito*. Tesis de doctorado. ISMMM, Facultad Metalurgia Electromecánica, 1998. 117p.
79. 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.
80. Tang J., *A Preliminary Investigation of the Use of Magnetic Treatment Technique in Oil Fields Development*, Oil Drilling Prod. Technol. China, V10, No. 2, 1988.
81. Tang J. y Li L., *Magnetic Field Paraffin Control Technique*, Oil Drilling Prod. Technol. China v 8 No. 5, 1986.
82. Tejeda H.D., *Efecto del deslizamiento efectivo en viscosímetros rotacionales*. Trabajo de diploma, ISJAM, 1985.

83. Toose E.M., *A boundary integral method for two dimensional (non) – Newtonian drops in slow viscous flow*, *Journal of Non– Newtonian Fluid Mechanics*, 1995, (2): 129 – 154.
84. Turro B. A., *Estudio del Hidrotransporte de las Colas en el Proceso Carbonato Amónico*, Tesis en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. ISMM, Moa, 2002. p.154
85. Urakami K., *Magnetization Treatment Apparatus of Fluid.*, US Patent 4904381.1990.
86. Vélez J., *Apuntes de Ingeniería de Alimentos I*. Universidad de las Américas, Puebla, México. Inéditos (2003).
87. Wang M., *Permanent-Magnet Wax-Proof Device*, US PATENT 5024271, 1991.
88. Wang B. y Dong L., *Paraffin Characteristics of Waxy Crude Oils in China and the Methods of Paraffin Removal and Inhibition*, SPE 29954 1995.
89. Weisenbarger G., *Magnetic Fluid Conditioner*, US PATENT 4995425, 1991.
90. 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).
91. Ye Y., *Applied Tests of Mechanism for Anti - Waxing by Means of Intensive Magnetism*, *Oil & Gas Storage Transp.*, China v 9 No. 2 1990.
92. Zhang, Y., *The Applications of Magnetic Technology in Pipeline Transportation of crude Oil & gas Storage Transp.* China, V 8, No. 1, 1989.

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.
- Investigar más acerca de las emulsiones de combustibles la cual el empleo del mismo es de gran importancia para la transportación de fluidos de alta viscosidad.
- Emplear el modelo propuesto en la ecuación 2.17, para estimar perdidas de carga en tuberías que transporta emulsiones de petróleo crudo cubano en régimen laminar de flujo.
- Tener en cuenta el programa ANSYS, para la realización de trabajos donde se necesite modelar sistemas de flujos; este puede brindar una mayor información y exactitud del proceso que deseara simular.