MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALURGICO DE MOA
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"
FACULTAD METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

Tesis en opción al Título de Ingeniero Mecánico

Determinación de las propiedades de transporte del Petróleo Mesa-30 destilado en la Refinería Ñico López

Autor: Leonard Saldás Paumier

Tutor: Ms.C. Héctor L. Laurencio Alfonso

MOA – 2008

"Año 50 de la Revolución"

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio, relacionado con las propiedades de transporte del petróleo crudo cubano Mesa-30; con el fin de contribuir a las soluciones relacionadas a los métodos de cálculos aplicables a fluidos no newtonianos en específico. A partir del estudio reológico se hace la caracterización en cuanto al comportamiento del fluido, donde se ejemplifica el comportamiento de la viscosidad aparente con relación al gradiente de velocidad, observándose que el crudo presenta propiedades seudoplásticas. Se proponen modelos y procedimiento de cálculo apropiado para la selección y evaluación de sistemas de transporte, relacionado con las propiedades reológicas del fluido. Los modelos propuestos para la estimación de perdidas de carga y potencia son validos para fluidos seudoplásticos que se transportan en régimen laminar. Como propósito del efecto económico y medioambiental relacionado al transporte de petróleo; se analiza las incidencias más significativas, como el consumo de energía eléctrica para el transporte y peligros a la salud humana, causados al interactuar con el petróleo.

ABSTRACT

Presently work is carried out a study, related with the estates of transport of the Mesa 30 crude oil; with the purpose of contributing to the solutions related to the methods of applicable calculations to fluids non newtonianos in specific. Starting from the study reológico the characterization is made as for the behavior of the fluid, where the behavior of the apparent viscosity is exemplified with relationship to the gradient of speed being observed that the crude oil presents estates seudoplásticas. They intend models and calculation procedure adapted for the selection and evaluation of systems of transport related with the estates reológicas of the fluid. The models proposed for the estimate of lost of load and it potentializes they are been worth for flowing seudoplásticos that are transported in régime to laminate. As purpose of the economic and environmental effect related to the transport of petroleum; it is analyzed the most significant incidences, as the electric energy consumption for the transport and dangers to the human health, caused when interacting with the petroleum.

CAPÍTULO I	**MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN**	*1*
1.1-	Introducción	*1*
1.2-	Revisión Bibliográfica	*1*
1.3-	Clasificación general de los petróleos crudos	*11*
1.4-	Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas	*12*
1.4.1-	Efecto de las propiedades superficiales	*12*
1.4.2-	Efecto de la temperatura	*14*
1.4.3-	*Efecto del pH*	*14*
1.5. -	Aplicación del trasporte de petróleo por tuberías	*15*
1.5.1-	Ventajas de transporte por sistemas de tuberías	*16*
1.6-	Propiedades físico-químicas del petróleo del Mesa-30	*18*
1.7	Descripción de la instalación	*19*
1.8-	Conclusiones	*22*
CAPÍTULO 2	*INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO PESADO*	*23*
2.1-	Introducción	*23*
2.2-	*Modelos reológicos de los fluidos*	*23*
2.2.1-	Curvas de flujo	*28*
2.3-	Modelos matemáticos para el flujo de fluidos transportados por tuberías	*29*
2.4. -	Descripción del experimento reológico	*34*
2.4.1-	Funcionamiento del reómetro	*35*
2.5-	Conclusiones del capítulo	*37*
CAPÍTULO 3	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	*38*
3.1-	Introducción	*38*
3.2-	Influencia de la temperatura en la densidad y la viscosidad del Mesa-30.	*38*
3.3-	Análisis de las características reológicas	*40*
3.3.1-	Análisis de la curva que relaciona la caída de presión (dp/dl Kpa) teórica y la experimental con la velocidad del flujo (v m/s)	*43*
3.3.2-	Re* en función del λ (coeficiente de fricción por rozamiento del fluido)	*44*
3.4-	Efecto económico de transporte	*45*
3.4.1	Costo de consumo energético para transportar el petróleo Mesa-30	*46*
3.5	**Impacto Medioambiental**	*49*
3.6	Conclusiones	*50*
	Conclusiones	*51*
	RECOMENDACIONES	*52*
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA……	*53*

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En este capítulo se desarrolla el marco teórico de este trabajo de diploma, partiendo del estudio de las investigaciones realizadas del tema, lo cual nos permite conocer varias teorías y sus deficiencias, en tal sentido se define como **objetivo** del capítulo:

Establecer el estado del arte partiendo de la revisión bibliográfica relacionada al tema y ventajas del proceso en estudio, que conformen la base de la investigación del transporte del petróleo crudo (Mesa-30) por tubería.

1.2. Revisión Bibliográfica

Como se ha mencionada anteriormente este trabajo se basa en el estudio de un fluido por lo que se tuvo en cuenta las teorías y experimentos más relevantes y relacionados al tema. Basándose en la experimentación:

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

Desde fines del siglo XVIII y a lo largo del siglo XIX, la hidráulica se ve enriquecida por los estudios teóricos y experimentales de Henri Darcy, por su discípulo y continuador H. Bazin y por el médico Jean Poiseulle, interesado en la circulación de la sangre lo que lo llevó al campo de la hidráulica.

Además de los científicos anteriores que desarrollaron sus trabajos en Francia, sobresalieron también en Alemania Julios Weibach y 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.

El problema de los efectos viscosos 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*.

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

La formulación diseñada resultó estable físicamente, al menos, bajo las condiciones y circunstancias experimentales en que se ensayo, se encuentra como deficiencia, que los autores no estudian el comportamiento reológico del fluido para variaciones de temperaturas; siendo esta perturbación, de gran influencia en la estructura y propiedades de los fluidos.

A partir de los trabajos descritos por Caldiño et al. (2004), se dispone de una metodología para obtener en forma simplificada, funciones reológicas de las mezclas agua arcilla que son de utilidad para alimentar modelos de cálculo de flujos naturales con altas concentraciones de sedimentos.

Se corroboró el incremento de la viscosidad con la concentración tanto para mezclas agua-arcilla como agua-arcilla-arena. Se observó y evaluó la influencia de la arena en el valor de la viscosidad; en el rango ensayado, la arena contribuyó en forma significativa a este incremento; se pudo tener en cuenta otros factores influyentes en la viscosidad de mezclas como, (pH) y diámetro medio de las partículas de arena, lo que no se tiene en cuenta.

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

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

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

En su trabajo, Barreto (1979), sobre la base de las investigaciones teórico experimental y el análisis de otros autores determinó los parámetros y estableció los regímenes racionales de hidrotransporte de minerales de hierro y concentrados. Elaboró las recomendaciones sobre la modelación de las suspensiones, selección de los regímenes efectivos y la metodología para la determinación de los parámetros de materiales sólidos de alta densidad en flujos de alta densidad (hasta 40 % de sólido por volumen).

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

El coeficiente o factor de fricción es un parámetro de diseño importante al considerar las pérdidas de energía mecánica en el transporte de fluidos a través de tuberías, ya sea para evaluar la potencia necesaria, o para estimar el diámetro del conducto, entre otros aspectos (Ibarz et al., 2001), (Vélez, 2003). Este coeficiente de fricción puede obtenerse con la pérdida de presión que se da en un segmento de tubo y/o accesorio, o bien puede evaluarse por medio de modelos, o gráficas propuestas para tal propósito (Charm, 1971); (Foust et al., 1980); (Macedo et al., 2001).

La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano y poco trabajo se ha realizado en fluidos no newtonianos independientes del tiempo (Steffe et al., 1986); (Ibarz et al., 2001); (Vélez, 2003); (Perona, 2003); (Sablani et al., 2003).

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

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

La magnitud del esfuerzo cortante viscoso aumenta debido a los remolinos y vórtices que acompañan a la turbulencia, además con paredes ásperas o rugosas, la turbulencia se incrementa aún más (Welty et al., 1976).

Para el transporte de fluidos no newtonianos, los estudios existentes son limitados, diferentes factores han sido analizados. Las caídas de presión a través de una tubería en el manejo de pasta de pescado, fueron evaluadas por Nakayama et al. (1980); determinando valores bajos en las pérdidas de energía, atribuidos a la naturaleza del comportamiento no newtoniano de tipo plástico de Bingham.

En un estudio realizado por García y Steffe (1987), se subraya la importancia que tiene la consideración del esfuerzo de cedencia o umbral de fluencia (t_0) en la correcta predicción de las pérdidas de presión en la tubería; las predicciones del coeficiente de fricción se relacionaron al índice de flujo, y a los números de Reynolds y Hedstrom. Banerjee et al. (1994), determinaron de forma experimental la pérdida de presión (ΔP) en válvulas de compuerta y globo de 12,7 mm; involucrando, el número de Reynolds al manejar fluidos de tipo seudoplástico 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, fueron medidos por Martínez et al. (2001), dicho coeficiente fue expresado como función del número de Reynolds generalizado. Perona (2003), reportó los resultados obtenidos en la transición de régimen laminar a turbulento para purés de frutas diluidos, considerando que las discrepancias observadas en su estudio, pueden atribuirse a los efectos viscoelásticos de los fluidos.

Con el objetivo de determinación del tipo de movimiento que tiene lugar cuando la hidromezcla circula a bajas velocidades con altas concentraciones de sólido, Izquierdo et al. (2001), modeló el hidrotransporte en una instalación semindustrial construida al efecto, se determinaron las propiedades físico-mecánicas del mineral y las propiedades reológicas de la hidromezcla.

Quedó demostrada la existencia del régimen estructural de movimiento para la hidromezcla, lo que la enmarca dentro de los fluidos viscoso-plásticos, y se obtuvo gráfica y analíticamente la relación entre el coeficiente de pérdida hidráulica por rozamiento (l) y el número generalizado de Reynolds (Re).

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

Ortega (1995), presenta en su tesis doctoral, un estudio teórico de algunos sistemas de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el comportamiento de ciertas clases de fluidos no newtonianos; considera un modelo para fluidos de bingham, seudoplásticos y dilatantes en densidad variable. Para estos modelos, se obtienen resultados de existencia de solución global en tiempo en varios sentidos: solución muy débil, débil y medida-valuada. También se estudia la cuestión de la unicidad de solución. En la segunda parte se consideran tres problemas asociados al modelo de oldroyd para fluidos viscoelásticos: el problema de evolución, el problema estacionario y el flujo de poiseuille en dominios cilíndricos.

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

Pedroso et al. (2000), Tomándose como base para este trabajo el modelo de *Otswald de Wele*; se obtuvo la expresión para el cálculo de la velocidad media de transporte de un fluido y los gradientes de velocidad a que son transportadas las mieles y meladuras en un conducto, permitiendo obtener el perfil universal de distribución de la velocidad a través de la sección de un conducto de sección circular en un fluido, independiente del valor del índice de flujo. Esto da la posibilidad de visualizar los diferentes tipos de perfiles de velocidad en el flujo laminar. Khatib (2006) propone un modelo matemático que correlaciona la viscosidad de fluidos seudoplásticos con el gradiente de velocidad y el índice de flujo ajustado por un coeficiente que ha sido determinado de forma experimental nombrado como, Constante de tiempo de deformación, se ha relacionado este modelo con la viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a infinito y la viscosidad cuando el gradiente de velocidad tiende a cero.

Díaz y Hechavarría, (1999) presentan una metodología para el cálculo del diámetro óptimo en régimen turbulento para cualquier tipo de fluido no newtoniano. Plantean que los costos debidos a tuberías y accesorios pueden representar una parte importante de la inversión total de una planta química. En cualquier estado de las condiciones de flujo, un incremento del diámetro de la tubería para usar incrementa los costos fijos para el sistema de tuberías, pero disminuye los costos de bombeo, lo que implica la existencia de un costo óptimo. El valor del diámetro puede determinarse combinando los principios de la dinámica de fluidos con consideraciones acerca del costo. El valor del diámetro óptimo está determinado en el punto para el cual la suma de los costos de bombeo y los costos fijos del sistema de tubería es un mínimo.

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 asfalténicos altamente viscosos, los que recién comienzan en (Maruska et al., 1987).

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

Concha et al. (2006) Se propone un modelo matemático para predecir el crecimiento de la zona de mezcla o frente de contaminación que se genera entre combustibles derivados del petróleo como consecuencia de su transporte secuencial por poliductos. La mayor dificultad para aplicar el modelo es el cálculo del coeficiente efectivo de transferencia de masa. Una aproximación analítica para el cálculo de dicho coeficiente sería sumamente complejo, motivo por el cual se han desarrollado diferentes correlaciones empíricas para su cálculo.

Resultados reportados por García et al. (2003) muestran diferencias significativas en la predicción del gradiente de presión entre modelos homogéneos cuya única diferencia es la forma de evaluar la viscosidad de mezcla. Por ejemplo, los modelos de McAdams et al. (1942) y de Cicchitti et al. (1960), presentan errores porcentuales absolutos promedios de 38% y 275%, respectivamente, al comparar los valores de gradiente de presión calculados con los experimentales. Haoulo y García (2004), observaron un marcado efecto de la densidad de mezcla en el gradiente de presión debido a los cambios de energía cinética y adicionalmente evaluaron el efecto de la viscosidad del líquido en el gradiente de presión total. Sin embargo, no evaluaron el efecto de las propiedades de mezcla en el gradiente de presión total.

Benítez et al. (2004) analizan la influencia de los aditivos A, B y M en las propiedades físicas del crudo cubano. Los resultados muestran que existe influencia en el por ciento de carbón, cenizas, densidad, viscosidad y valor calórico, alejándose, para algunas concentraciones, de las normas establecidas para estos parámetros. En cuanto a punto de inflamación y por ciento de agua, no existe influencia de los aditivos. Las propiedades físicas del combustible con las muestras de aditivo, presentan cierta variación respecto al combustible solo, lo que es un aspecto importante por tener en cuenta. Algunas presentan una tendencia a aumentar mientras que otras tienden a comportarse alrededor de un valor deseado.

Falcón et al. (2006) Este artículo describe algunos resultados de un estudio llevado a cabo sobre la estabilidad de las mezclas aceite de combustible Diesel. La estabilidad se evalúa por propiedades macroscópicas tales como viscosidad y densidad. También se estudió el efecto de los agentes tensioactivos en estas mezclas. La estratificación de las muestras se tuvo en cuenta durante el almacenaje.

Dentro de los trabajos reportados sobre la influencia de las propiedades reológicas en el comportamiento de la característica operacional de bombas centrifugas se han reportado numerosos trabajos que han colaborado en el desarrollo de esta esfera de la ciencia. Según lo planteado por Turiño (1996) no existe una teoría que permita predecir el comportamiento exacto de una bomba centrifuga cuando manipula un fluido viscoso, pues teóricamente hasta el presente ha sido imposible tener en cuenta la influencia de la viscosidad en los parámetros de trabajo de la bomba y en la forma de sus características.

El método más simple de los parámetros de funcionamiento (Carga, Flujo, Potencia y Eficiencia) y de reconstrucción de las características al variar la viscosidad se basa en el empleo de coeficientes de corrección específico para cado fluido, obtenidos por vía experimental.

Santos y Martín (1999) a partir de un análisis estadístico de la forma de la característica de trabajo de un equipo de bombeo de tipo centrífugo, obtiene modelos que recalculan los coeficientes a, b y c de la ecuación anterior con la velocidad específica con un nivel de confianza de un 95 %.

Para fluidos no newtonianos la literatura científico-técnica no reporta coeficientes de corrección, por lo que se ha generalizado erróneamente la aplicación del símil de viscosidad de estos fluidos con los newtonianos según lo refiere Turiño (1996), lo cual ocasiona errores de pronóstico de la curva de funcionamiento de la bomba centrifuga.

1.3. Clasificación general de los petróleos crudos

Cada yacimiento de petróleo está constituido por una mezcla de miles de hidrocarburos diferentes, formados por la asociación de átomos de carbono e hidrógeno, cuyo origen todavía es mal conocido; a esta mezcla se agregan cantidades variables de sustancias que contienen azufre, nitrógeno y oxígeno: de los más de 1.500 campos petrolíferos conocidos, no se han encontrado aún dos crudos exactamente iguales.

Según la predominación de uno de los compuestos característicos, se pueden clasificarlos petróleos en:

1- Crudos parafínicos, presentan una proporción elevada de hidrocarburos tipo CnH particularmente parafinas y ceras naturales.

2- Crudos nafténicos, con una cantidad más grande de naftenos, hidrocarburos de la serie anulares o cíclicos.

3- Crudos aromáticos, en los que se encuentran hidrocarburos bencénicos CnH.

4- Crudos sulfurosos, que contienen sulfuro de hidrógeno y mercaptanos formados por la fijación de azufre sobre un hidrocarburo.

5- Crudos particulares, como los crudos bituminosos, que son los crudos de muy bajo contenido en azufre, y los crudos polucionados por ácidos, metales (vanadio, níquel, arsénico), sales, agua salada, etc.

Por otro lado, algunos hidrocarburos raros o ausentes en el petróleo bruto son sintetizados por cracking o por hidrogenación y se encuentran en los productos petrolíferos después del refino y en petroquímica; tales son las olefinas o hidrocarburos etilénicos CnH con doble enlace entre los átomos de carbono, los hidrocarburos aromáticos o el acetileno.

Para dilucidar la naturaleza compleja del petróleo crudo y sus derivados, se han tenido que poner a punto procedimientos que permiten determinar la composición y las características físico-químicas de los diferentes productos, después estudiar su comportamiento, primero por ensayos de simulación en laboratorio, después en el curso de su utilización real ulterior. En particular métodos de análisis muy rigurosos se han desarrollado y normalizado, primero en Estados Unidos, después en el mundo entero, para asegurar que la calidad de los derivados del petróleo está definida de manera incontestable antes de ser entregados para su consumo.

1.4. Factores que influyen sobre el comportamiento y propiedades reológicas de los fluidos

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 último crece con la complejidad molecular, pero no se tiene ningún método seguro de estimación de la viscosidad y en general de las propiedades reológicas de los líquidos a bajas temperaturas y elevadas presiones, (Costa, 1984).

1.4.1. Efecto de las propiedades superficiales

En las suspensiones coloidales cuya fase dispersa posee un área superficial grande, el efecto de las propiedades de superficie desempeñan un papel muy importante. Ello se debe, fundamentalmente, a que el comportamiento reológico es afectado grandemente por la densidad de carga superficial y por la fuerza iónica del medio dispersante, ya que estas variables, influyen sobre la interacción neta entre las partículas.

La interacción neta es la suma de un componente repulsivo y un componente atractivo. El componente atractivo viene dado por las fuerzas de atracción del Van der Waals y no es sensible a los fenómenos superficiales.

El componente repulsivo, se debe a las fuerzas repulsivas eléctricas, que rodean a las partículas (repulsión de Born).

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

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

1.4.2. Efecto de la temperatura

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

a) Disminución de la viscosidad del medio dispersante.

b) Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

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

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

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.

1.4.3. 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.

1.5. Aplicación del trasporte de petróleo por tuberías

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

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

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

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

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

La instalación de oleoductos requiere gran cantidad de estudios previos, en los cuales se tiene en cuenta todo lo que puede acortar o beneficiar el proceso de transporte.

Por caso, la construcción de un oleoducto o gasoducto que puede tener que cruzar montañas, ríos o desiertos, constituye una gran tarea de ingeniería. Hoy por hoy, el sistema de transporte de hidrocarburos por tuberías resulta tan eficiente y económico que existen miles de kilómetros de ellas.

1.5.1. Ventajas de transporte por sistemas de tuberías

El transporte por tuberías, consiste en el traslado de un fluido, gas o partículas del mineral suspensas en un flujo de agua a través de una tubería; este tiene una gran aplicación en la industria, en el laboreo de minas, además en la industria metalúrgica tiene efectividad para la transportación de concentrados de materiales no ferrosos, carbón, petróleo, gas, materias primas hacia plantas metalúrgicas y puertos marítimos. En la actualidad en las industrias cubanas se utilizan diversas formas de transportación, cobrando gran auge el este tipo de transporte debido a que tiene gran efectividad económica con respecto a los demás sistemas de transporte.

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

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

- Garantiza un proceso tecnológico continuo disminuyendo considerablemente el volumen de las operaciones principales.
- Ausencia de formación de polvo.
- Facilidad en la variación a la dirección y superación de obstáculos.
- Ausencia de vías de transporte especiales.
- Eleva la productividad del trabajo.
- Poca necesidad en servicio personal

- Posibilita la automatización de todo el proceso de transportación.
- No existen perdidas del material durante su transportación.
- Las instalaciones y equipos principales son pequeños y de poco peso.
- El material puede ser beneficiado simultáneamente durante su transportación.

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

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

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

1.6. Propiedades físico-químicas del petróleo del Mesa-30.

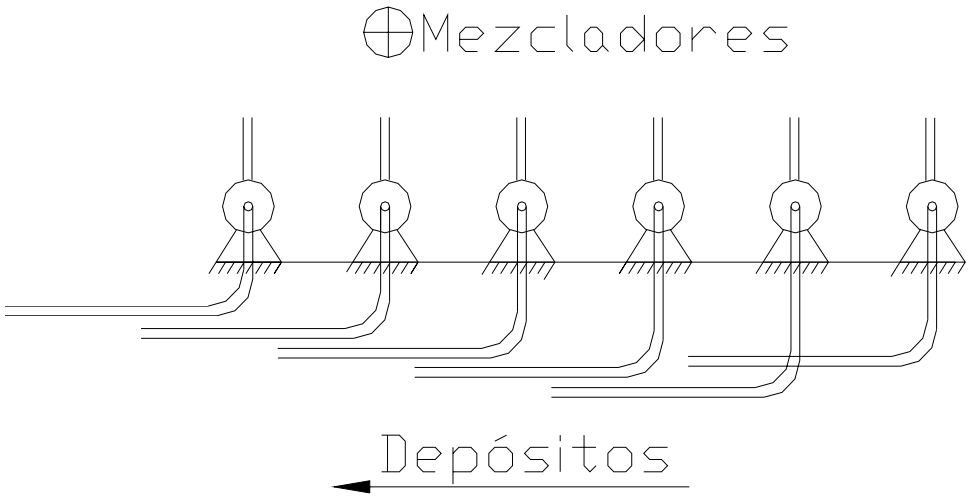
En la tabla representada a continuación se representan las propiedades físico-químicas del Mesa-30. Dichas propiedades fueron obtenidas en El Centro de Investigación del Petróleo (CEINPET) en Ciudad de La Habana.

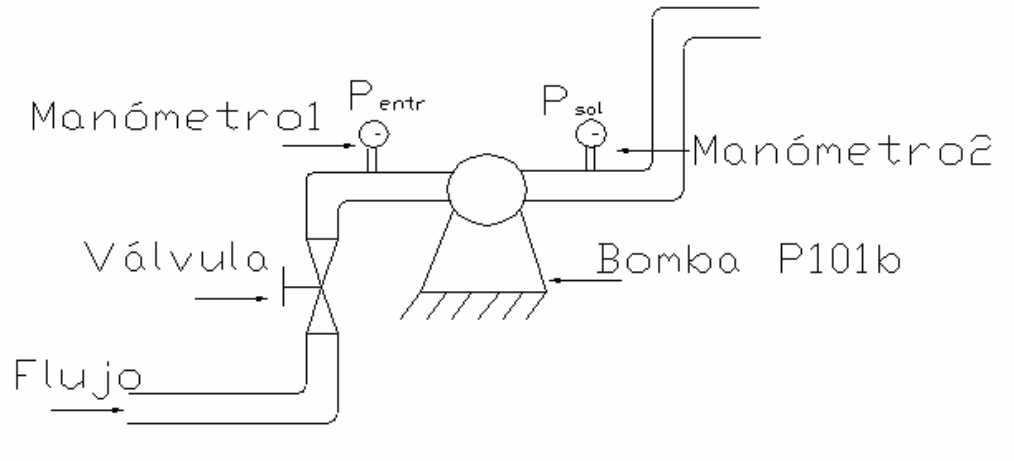
Propiedades físico-químicas del petroleo Crudo cubano Mesa 30			
Indices	Valores	Indices	Valores
Apariencia Visual	L.V.O	Contenido de sales, mg/l	267.13
Gravedad^0 API	10.6	Valor calórico ASTDM-4868	
Densidad a 15^{0}C, g/cm^3	0.9953	Bruto	9670
Densidad a 20^{0}C, g/cm^3	0.9921	Neto	9151
BSW, % v/v	1.4	Valor calórico ASTDM-240	
Agua por destilación % v/v	0.8	Bruto	9878
Azufre mercaptano, % m/m	0.274	Neto	9305
Acido sulfhidrico, %m/m	0.011657	Factor de caracterización, Koup	11,25
Azufre Fluorescencia por RX	6.73	Composición elemental	
Contenidos de asfaltenicos, %m/m	16.66	C%	80,47
Carbon Coradson, m/m	13.75	H%	10,53
Cenizas totales, %m/m	0.22	S%	6,73
TAN,mg KOH/g	-	N%	0,24
Sedimento por extracción,% m/m	0.080.09	Relación C/H	7,64
Punto de inflamación °C	(6	Determinación de Metales	
Contenido de nitrógeno, %m/m	0.24	V/Ni/Na/K	129,2/18,3/107
Punto de congelacion °C	3	Ca/Fe/Mg	3,5/<0,25/20,6
Viscosidad Cinematica, cst		Si/Al	<0,05/<2,8
20 °C	21367.30	Indice de Carbón aromático	845,24
40 °C	2781.41	Lefenda:	
50 °C	1226.18	L.V.O- Liquido Viscoso Oscuro de olor penetrante.	
80 °C	185.79	Realizado por CEINPET, Ciudad Habana.	
100 °C	76.49		

1.7. Descripción de la instalación donde fueron medidas las condiciones de transporte del crudo nacional Mesa-30

La instalación es una estación de bombeo de la Refinería Ñico López compuesta por 6 bombas en su mayoría del tipo P101b encargadas de transportar desde los depósitos los diferentes crudos nacionales. Luego de su extracción y almacenamiento de los petróleos las bombas se encargan de transportarlos hasta un depósito o mezclador, el cual como su nombre lo indica se encarga de mezclar los crudos con características físico-químicas compatibles para dar inicio al proceso de refinamiento. En este caso, se tuvo en cuenta una bomba P101b encargada de transportar Mesa-30 para mezclarlo con otro crudo llamado Slot.

A continuación se representa un esquema de la instalación y los parámetros de bombeo tomados:





Datos

Fluido transportado: Petróleo Crudo Nacional Mesa-30

Diámetro de la tubería de entrada: 0.3048 m

Diámetro de la tubería de salida: 0.2032 m

Presión de entrada: P= 110815.1 Pa

Presión de salida: P= 1.782947^{007} Pa

Temperatura del Fluido: ambiente 30^{0} C

Los manómetros se encuentran a 0.6m de la bomba respectivamente

Características técnicas de la bomba:

Modelo	Bomba Centrifuga P101b
Construcción	Acero inoxidable para partes húmedas
Sellos	Mecánicos con Elastómero de Vitón y caras de Carbón contra Carburo de Cilicio
Succión	18507400 Pa
Descarga	20054600 Pa
Acoplamiento	En estructura metálica y por acople flexible a motor eléctrico
Motor Eléctrico	Emerson
Potencia	55927.49 W
Frecuencia	60Hz
Número de revoluciones	3600rev/min
Fases	3 220/240v IP54
Capacidad de bombeo	1.92 m^3/min

1.8. Conclusiones del capítulo

- Dentro de la amplia información existente acerca de los fluidos en general, la dirigida a los fluidos no newtonianos en particular es escasa.
- Desde el punto de vista reológico se han realizado diversas investigaciones para varios tipos de fluidos, pero enfocadas a petróleos crudos particularmente es muy pequeña la gama de investigaciones.
- La mayoría de los estudios realizados a los fluidos se basan el la investigación experimental.
- De las diversas formas de transportar petróleo crudo la m'as ventajosa y utilizada es el transporte del mismo por tuberías, teniendo en cuenta las características del medio.
- Es muy importante tener en cuenta la necesidad del estudio experimental de este sistema, pues no es suficiente la información acerca del flujo de petróleo cubano a través de tuberías.

Capítulo 2

INVESTIGACIÓN TEÓRICA DEL TRANSPORTE DEL PETRÓLEO PESADO

2. 1. Introducción

Los estudios acerca del comportamiento y las propiedades de flujo del petróleo crudo cubano, brindan métodos apropiados para la solución de problemas relacionados con el transporte del fluido en cuestión a nivel de la industria cubana; por lo antes planteado se definen como **objetivos** de este capítulo:

Realizar la investigación teórica y plantear modelos de flujos asociados a fluidos no newtonianos, que describan comportamiento según las propiedades de transporte del crudo, exponer los datos físico-químicos del Mesa-30 así como la descripción del experimento realizado en pos de determinar la reología del mismo.

2.2. Modelos reológicos de los 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, substancias asfálticas y materiales cristalinos.

En la teoría y la práctica actual, los fluidos se clasifican desde el punto de vista reológico en newtonianos y no newtonianos (Skelland, 1970; Tejeda, 1985; Perry, 1988; Díaz, 1989). A su vez los fluidos no newtonianos quedan clasificados en tres grupos.

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

- Newtonianos.
- No Newtonianos.

Los modelos más difundidos, (Garcell, 1988; Turro, 2002) son los tratados en este tópico.

En los *fluidos newtonianos* existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de deformación resultante, siguiendo de esta forma la ley de Newton de la viscosidad. La experiencia demuestra que todos los gases y los líquidos homogéneos de baja viscosidad se comportan como *fluidos newtonianos*; la viscosidad de estos fluidos es constante respecto a los cambios en la magnitud del esfuerzo cortante (τ) y del gradiente de velocidad $\left(-\frac{d v_x}{d y}\right)=(\overset{o}{\gamma})$.

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

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

1- De viscosidad independiente del tiempo.

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

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy}\right)^n \qquad (2.2)$$

Donde:

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

K - Índice de consistencia, (Pa. s).

El parámetro n es una medida del grado de comportamiento no newtoniano del material. Para $n < 1$ el fluido es seudoplástico, mientras que para valores mayores que la unidad es dilatante.

Para n = 1, la ecuación 2.2 se transforma en la ley de Newton, siendo K = μ. 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 (μa). De acuerdo con la (ecuación 2.1) la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu = \frac{\tau}{\overset{o}{\gamma}} \qquad (2.3)$$

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

$$\mu_a = K \cdot \left(\overset{o}{\gamma} \right)^{n-1} \qquad (2.4)$$

- *Dilatantes:* Sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante (τ > 0). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para n > 1). *(Figura 2.1-c).*

- *Plásticos ideales:* Se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo cortante inicial (τ_o), que es el esfuerzo límite que hay que aplicarles a estos materiales para romper su estructura de sólidos rígidos y comiencen a fluir. El modelo de Bingham se escribe. *(Figura 2.1-d).*

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \overset{o}{\gamma} \qquad (2.5)$$

Donde:

τ_0 - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia.

μ_p - Viscosidad plástica.

Para τ_o = 0 la ecuación 2.5, se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$.

La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham esta dada por:

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_o}{\overset{o}{\gamma}} \qquad (2.6)$$

- *Plásticos reales:* Sus viscosidades también disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que τ_o. Siguen el modelo de Herschel – Bulkley.

$$\tau_{x,y} = \tau_o + K \cdot \left(\overset{o}{\gamma}\right)^n \qquad (2.7)$$

Los parámetros k, n y τ_o, tienen el mismo significado que en los dos modelos anteriores. Se utiliza para describir el comportamiento de los plásticos reales. Para n = 1, la ecuación 2.7 se transforma en el modelo de Bingham, para τo = 0, en el modelo de Ostwald de Waele, y para τo = 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 seudoplásticos, plásticos ideales y reales. *(Figura 2.2-a).*

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

Para modelizar la variación de la viscosidad con el tiempo, se ideó la siguiente ecuación:

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^{t} M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \qquad (2.8)$$

Donde:

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(II)}{II} \exp\left[-\frac{(t-t')}{II}\right] dII \qquad (2.9)$$

Siendo:

II: el tiempo de relajación del fluido, es decir, el tiempo que tarda el fluido en disminuir su tensión a 1/e veces. Puede haber diversos tiempos de relajación.

R (II): función de distribución de tiempos de relajación.

μ_0: viscosidad inicial sin perturbaciones.

F (D^2): función simétrica de la velocidad de deformación

3- *Viscoelásticos ó de Maxwell*:

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

La ecuación que describe el comportamiento viscoelástico está basada en el modelo de *Maxwell*:

$$\tau + \lambda \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot D \qquad (2.10)$$

Donde,

τ: esfuerzo cortante aplicado.

λ: tiempo de relajación.

$\dot{\tau}$:gradiente de esfuerzos cortantes (μ/G).

μ: viscosidad aparente.

D: velocidad de deformación.

2.2.1. Curvas de flujo

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

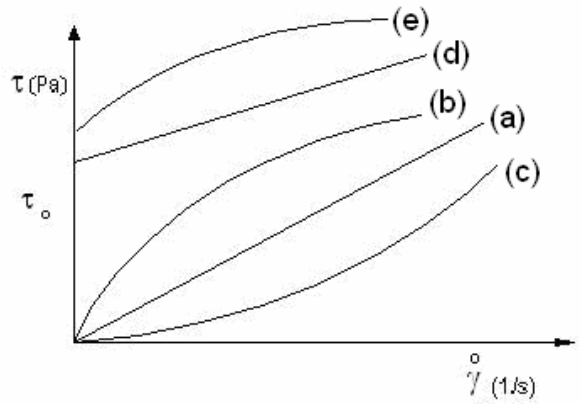


Figura 2.1. Curvas de flujo típica: (a)- Newtonianos; (b)- Seudoplásticos; (c)- Dilatantes; (d)- Plástico ideal (Bingham); (e)- Plástico real.

Fuente: *Garcell, 2001.*

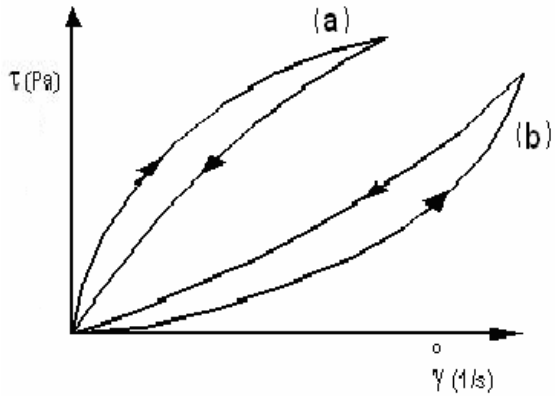


Figura 2.2. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)- Tixotrópico; (b)- Reopéctico.

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 *batch* y que hayan sido fabricadas sustituyendo a un componente por otro.

2.3. Modelos matemáticos para el flujo de fluidos transportados por tuberías.

Metodología para la determinación de perdidas hidráulicas en conductos cerrados.

Para determinar la caída de presión para un fluido no newtoniano en flujo permanente, estacionario, con un diámetro constante, se debe partir de un análisis de la distribución de esfuerzos cortantes en tuberías. Es recomendable basarse en los estudios de Rabinowisch-Mooney, Metzner-Reed y Ostwald de Waele 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 de un fluido seudoplástico en un tubo cilíndrico de diámetro (D), a una temperatura constante y una longitud (L).

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

$$\Delta P_f = 2K\left[\frac{3n+1}{n}\right]^n \frac{v^n L}{R^{n+1}} \qquad (2.11)$$

Diversos autores utilizan este modelo, Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para el calculo de perdidas de cargas en tuberías rectas cuando se transporta fluidos seudoplásticos y dilatantes, en particular petróleos pesados. En estos trabajos no se especifica el régimen de flujo en que es valido este modelo.

El modelo homogéneo más difundido según Haoulo et al. (2005), es el llamado modelo de flujo homogéneo de Wallis (1969). Las ecuaciones básicas de conservación de masa y de momentum en régimen permanente del modelo homogéneo para flujo unidimensional isotérmico en tuberías son:

$$\frac{d}{dz}\cdot\left(\rho_M \cdot v_M\right)=0 \qquad (2.12)$$

Momentum:

$$\rho_M \cdot v_M \cdot \frac{dv_M}{dz} = \frac{dp}{dz} - \frac{P\cdot\tau_w}{A} - \rho_M \cdot g \cdot sen\theta \qquad (2.13)$$

Donde:

$v_M ; \rho_M$: Velocidad promedio y densidad de la mezcla respectivamente.

$A; P; \theta$: Área de la sección transversal, perímetro y el ángulo de inclinación de la tubería, respectivamente.

$\frac{dp}{dz}$: Gradiente de presión en la dirección del flujo.

τ_w : Esfuerzo de corte en la pared de la tubería.

g : Aceleración de la gravedad.

Generalmente la ecuación (2.13) se presenta como una ecuación explícita en términos del gradiente de presión:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{P \cdot \tau_w}{A} + \rho_M \cdot v_M \cdot \frac{dv_M}{dz} + \rho_M \cdot g \cdot sen\theta \qquad (2.14)$$

En la ecuación (2.14) el gradiente de presión longitudinal total en la tubería se puede descomponer en tres.

$$-\frac{dp}{dz} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_F + \left(\frac{dp}{dz}\right)_A + \left(\frac{dp}{dz}\right)_G \qquad (2.15)$$

Donde:

El primer componente es el gradiente de producto del esfuerzo de corte del fluido con la pared de la tubería. Usualmente se ajusta este a la fricción existente entre el flujo de la mezcla y la pared interior del tubo. El término de pérdidas de presión, puede definirse mediante la ecuación de Weisbach – Darcy; para un flujo por tuberías rectas circulares, (valida para cualquier tipo de fluido).

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v_M{}^2}{2} \cdot \rho_M \qquad (2.16)$$

Donde:

λ : Coeficiente de fricción por rozamiento del fluido, (adimensional).

En realidad se debe a la disipación de energía turbulenta por viscosidad.

El segundo componente es el gradiente de presión producto a los cambios de energía cinética en el fluido o de aceleración $(dp/dz)_A$. Este puede ser expresado en términos de la tasa de flujo másico total o de mezcla $\dot{m}_M = A \cdot \rho_M \cdot v_M$:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_A = \left(\frac{\dot{m}_M}{A}\right)^2 \cdot \frac{d}{dz} \cdot \left(\frac{1}{\rho_M}\right) \qquad (2.17)$$

La Ecuación (2.17) varía en función de la definición de densidad de la mezcla utilizada.

El tercer componente $(dp/dz)_G$ es debido a los cambios de energía potencial como consecuencia de los cambios de pendiente en la tubería. En el caso de tubería horizontal el gradiente de presión debido a los cambios de energía potencial es cero y por esto no se considera este en flujos con una alta fracción volumétrica de líquido, este puede ser el término predominante.

En el caso de tuberías rectas los números adimensionales que se utilizan son (Otero, 1989):

Número de presión… $\left(\frac{H}{\frac{v^2}{2\cdot g}}\right)=\left(\frac{\Delta p}{\frac{v^2}{2}\cdot\rho}\right)$ (2.18)

Número de geometría… $\left(\frac{L}{D}\right)$; (Rugosa)… $\left(\frac{\xi}{D}\right)$ (2.19)

Número de Reynolds… (Re^*)

Estos números se suelen ordenar en la forma siguiente:

$$\left(\frac{H}{\frac{v^2}{2\cdot g}}\right)=k_1\cdot\left(\frac{\xi}{D}\right)^a\cdot\left(\frac{L}{D}\right)^b\cdot(\mathrm{Re}^*)^c \qquad (2.20)$$

Donde:

a, b, c, k_1: Son los coeficientes de ajuste del modelo.

$$\left(\frac{H}{\frac{v^2}{2\cdot g}}\right)=\lambda\cdot\left(\frac{L}{D}\right)\ldots \text{ Para (b =1)} \qquad (2.21)$$

Queda que:

$$\lambda = k_1 \cdot \left(\frac{\xi}{D}\right)^a \cdot (\mathrm{Re}^*)^c \qquad (2.22)$$

Turiño (1996) recomienda el arreglo de la ecuación de Darcy-Weibach, donde la constante hidráulica de la tubería (R) agrupa las características geométricas del conducto, las propiedades de la resistencia friccional del fluido según el régimen de corriente en el conducto.

$$H = R \cdot Q^n \qquad (2.23)$$

Cuando el fluido transportado se ajusta a la ley de potencia, la característica friccional en una tubería (en régimen laminar), puede expresarse por el modelo (Laurencio, 2007).

$$R = \frac{\left[\frac{6 \cdot n + 2}{n}\right]^n \cdot K \cdot L \cdot 4^{n+1}}{d^{3 \cdot n+1} \cdot \gamma \cdot \pi^n} \qquad (2.24)$$

Donde:

n - Índice de la ley de potencia (adimensional).

K – Índice de consistencia másica $(Pa \cdot s)$.

γ - Peso específico; (N/m^3)

Manssur y Rajie (1988) desarrollaron una ecuación explicita generalizada para el factor de fricción de fluidos newtonianos y no newtonianos en conductos circulares y no circulares, considerada por sus creadores como un paso primario en el desarrollo de una expresión universal para la determinación del factor de fricción de todo tipo de fluido, conducto y régimen de circulación, utilizando la ecuación para el calculo del Reynolds generalizado.

$$\lambda = \psi \cdot (\mathrm{Re}^* \cdot n) \cdot e^{\beta \cdot (\mathrm{Re}^* \cdot n)} \qquad (2.25)$$

En la que las funciones ψ y β son determinados experimentalmente.

Este modelo no incluye los efectos de la rugosidad de la tubería (e/d) para la determinación del coeficiente de fricción de fluidos no newtonianos, lo cual limita su

aplicación para el caso de tuberías rugosas. Wojs (1993) al realizar estudios fricciónales en tuberías lizas y rugosas con soluciones diluidas de polímetros, desarrollo una ecuación teórico experimental que aunque concuerda adecuadamente con los resultados experimentales, su aplicación aun se encuentra limitada por estar el factor de fricción de Darcy implícito en la ecuación.

$$\frac{1}{\lambda} = -A \cdot \log\left[\left(\frac{B}{\mathrm{Re}^* \cdot \lambda^{\frac{1-n}{2}}}\right) + \frac{(e/d)}{\alpha}\right] \qquad (2.26)$$

La ecuación anterior según plantea su autor, fue derivada del modelo de ley de potencia y generalizada para soluciones diluidas de polímeros, cuya concentración y peso molecular están contenidos en los parámetros A y B, los que fueron determinados experimentalmente.

El número de Re* se define para fluidos seudoplástico y dilatante según la naturaleza reológica del fluido como sigue (Turro 2002).

$$\mathrm{Re}^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K}\left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1}\right)^n \qquad (2.27)$$

2.4. Descripción del experimento reológico

El experimento se realizo en la instalación de compresores del ISMM. La misma esta compuesta por dos compresores de embolo de dos etapas enfriados por aire de fabricación soviética, con un caudal nominal de 30 m^3/min a la presión de 10 MPa, estos tienen mas de 15 años de instalados. La misma cuenta con una pizarra de control para la parte eléctrica la cual esta constituida fundamentalmente por un interruptor de fuerza, y un arrancador magnético.

Para la realización del experimento nos apoyamos en un reómetro de tubo con las siguientes características: Los reómetros de tubo se basan en la medición de la caída de presión asociada al flujo laminar del fluido a través de un tubo, el cual, por lo general, es de sección circular, hidráulicamente liso, y con una relación longitud / diámetro grande. El ΔP a través del tubo permite calcular el esfuerzo cortante, τ, y

con la magnitud del flujo volumétrico se estima la velocidad de deformación $\overset{o}{\gamma}$. Los reómetros de tubo son de gran utilidad para las mediciones reológicas de dispersiones que sedimentan muy fácilmente.

El tubo en la instalación puede estar dispuesto horizontal o verticalmente.

2.4.1. Funcionamiento del reómetro.

El reómetro en la parte superior de su dispositivo de almacenamiento posee un embudo a través del cual se le introduce el fluido a estudiar (crudo Mesa-30). Este dispositivo cuenta con una válvula encargada de sellar en dispositivo impidiendo la pérdida de presión una vez que desde la instalación de compresores se le introduzca aire. En la entrada del aire existe una válvula encargada de regular la presión en interior del depósito con el objetivo de aumentar o disminuir el caudal de aire comprimido, dicha presión es medida por un manómetro capaz de registrar de 0 a 6 bar.

Una vez que se tenga la presión deseada se procede a mediante una válvula que une el deposito con un tubo de acero inoxidable, de diámetro D = 0.006m y longitud L = 2 m, a través del cual al abrirse la válvula que regula el flujo por interior del tubo hasta obtener el volumen deseado. El volumen se medirá con un recipiente graduado, en nuestro caso se uso una probeta graduada capaz de registrar hasta 1000 mL. En lo antes planteado se basa el estudio para la determinación del reograma del fluido en estudio (Mesa-30).

Para la determinación de la reología del petróleo estudiado se debe realizar la lectura de los siguientes datos:

Las lecturas del manómetro encargado de registrar la presión del depósito con las cuales conociendo el diámetro del tubo (D), su longitud (L) y luego apoyándonos en la ecuación del caudal:

$$Q = u \cdot S \qquad (2.32)$$

Donde:

u: Velocidad media.

S: Sección del tubo: $S = \pi \cdot D^2 / 4$

Se puede determinar la velocidad por la ecuación:

$$u = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2} \qquad (2.33)$$

Conocida la velocidad se calculan las siguientes relaciones:

$$\frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} = Y_i \text{ [Pa]} \qquad (2.34)$$

$$\frac{8 \cdot u}{D} = X_i \text{ [s}^{-1}\text{]} \qquad (2.35)$$

El término ΔP es la diferencia de presión entre la presión de entrada y la presión de salida del dispositivo (medida en Pascal).

Luego se representa log(X_i) en función de log(Y_i), ajustando una recta del tipo y = mx +b en el que la pendiente m es *n* y la ordenada en el origen b es *k'*, obteniéndose:

$$k = k' \cdot \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \qquad (2.36)$$

Con todo lo antes planteado se determinara la curva reológica de forma $\tau = k(\dot{\gamma})^n$

Una vez realizada la metodología antes plantea se deben recoger los siguientes datos para su posterior análisis. Para lo cual nos podemos apoyar en una Hoja de cálculo de EXCEL.

Los datos obtenidos en experimento que deben registrarse son:

1- ΔP (bar) y (Pa)

2- V (m^3)

3- t (s)

4- Q (m^3 / s)

5- $\frac{D \cdot \Delta P}{4L}$ (Pa)

6- $\frac{8 \cdot u}{D}$ (s^{-1})

Para la mejor interpretación de los mismos es recomendable ubicarlos en una tabla.

2.5. 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.
- Teniendo en cuenta el comportamiento reológico de los fluidos, los mas difundidos son los que se comportan como fluidos no newtonianos.
- El reómetro utilizado en el experimento cuenta con los requisitos técnicos necesarios para la determinación de las propiedades reológicas de un fluido a estudiar.

Capítulo 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

En este trabajo se ha profundizado en la investigación de las propiedades de transporte del crudo cubano Mesa-30, a través del estudio de sus características y el uso de modelos matemáticos específicos para el transporte de fluidos que cumplan con determinadas características a las que se ajusta el fluido estudiado. En este capítulo se hará el análisis de los resultados arrojados durante el estudio de este crudo cubano por lo que se definen como **objetivos** de este capítulo:

El análisis de la influencia de la temperatura en la densidad y la viscosidad del Mesa-30 y la interpretación de los resultados del experimento reológico, todo lo antes mencionado tributando a los modelos matemáticos expuestos en el capítulo 2, así como la valoración económica de las condiciones de transporte en la instalación donde se realizaron las mediciones de los parámetros requeridos para el bombeo de este petróleo.

3.2. Análisis de la influencia de la temperatura en la densidad y la viscosidad del Mesa-30.

Los datos de la densidad y viscosidad del Mesa-30 fueron obtenidos mediante la realización de experimentos usando el método ASTM D-1298 y ASTM D-445-75, la densidad fue analizada a 15 y 20 ºC respectivamente y la viscosidad a 20, 40, 50, 80 y 100 ºC respectivamente, en el Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) en Ciudad de La Habana. En las gráfica 3.1 y 3.2 se pueden apreciar como las líneas de tendencia describen un recorrido descendente de la viscosidad y la densidad a medida que aumenta la temperatura. De los resultados de la densidad se obtuvo la ecuación $\rho = -11.123\ln(t) + 1025.4$ y los de viscosidad la ecuación $\upsilon = \frac{267.58}{e^{-0.0599*t}}$.

Esta característica de disminuir la densidad y la viscosidad a medida que aumenta la temperatura es generalizada para todos los petróleos por lo que aprovechándose de esto en la industria se mejoran las condiciones de transporte de crudos sometiéndolos a altas temperaturas durante el proceso transportación por tuberías.

Figura 3.1 Influencia de la temperatura en la densidad.

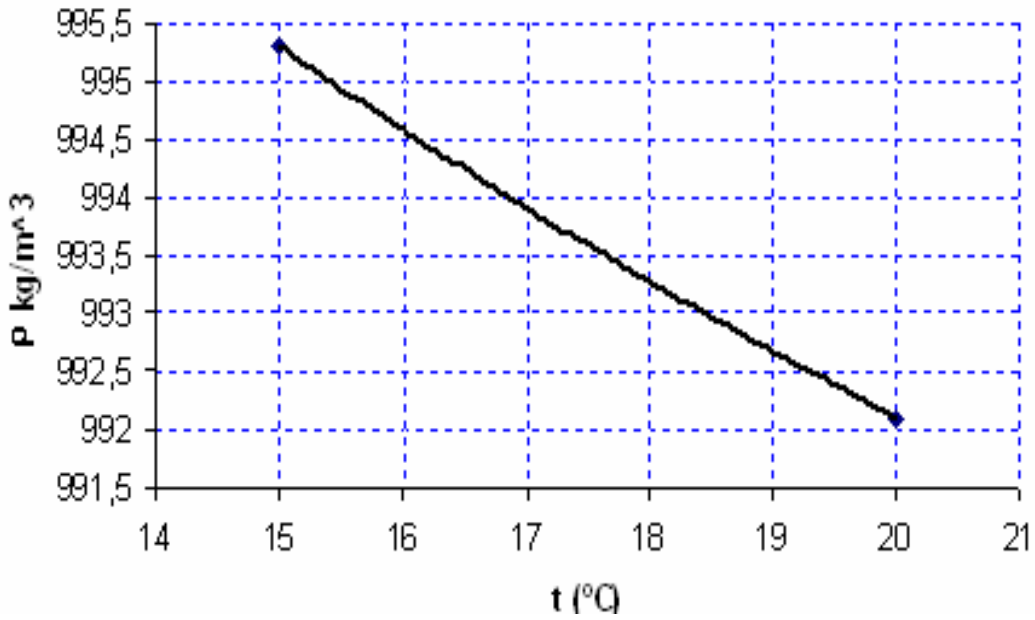
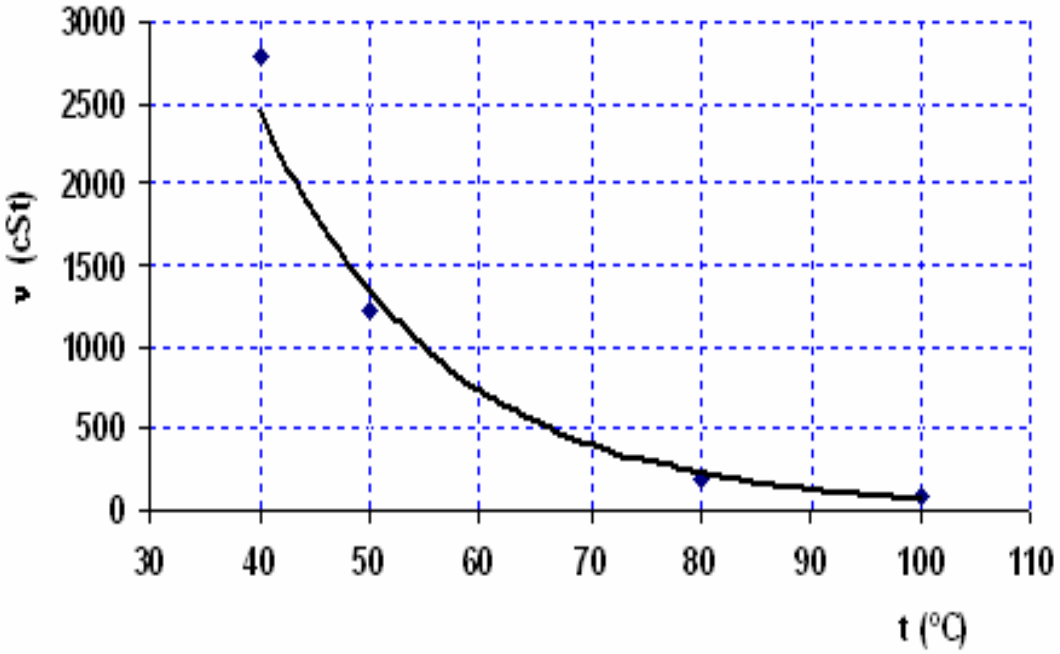


Figura 3.2 Influencia de la temperatura en la viscosidad.



3.3. Análisis de las características reológicas.

A partir del los resultados de las propiedades reológicas del Mesa-30, se obtuvieron los valores del caudal (Q m^3), la velocidad (v m/s), el gradiente de velocidad (Gvr s^{-1}) y el esfuerzo de corte (τ Pa), todos para una temperatura t= 30 ºC. Estos resultados están representados en la tabla 3.1 donde se relacionaron el esfuerzo cortante (τ) en función del gradiente de velocidad (Grv) construyéndose las curvas de flujo ajustando los datos experimentales, para ello se emplea el software MicroSoft Excel; se obtuvieron los parámetros del modelo matemático que relaciona la viscosidad con el gradiente de velocidad, 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 e índice de consistencia.

N°	dP (kgf/cm2)	dP (Pa)	V (mL)	V (m3)	t (s)	Q (m3 / s)	v (m/s)	tao (Pa)	Grv (s-1)
1	0,5	49033,3	390	0,0004	26	0,000015	0,53079	36,7749	707,714084
2	1	98066,5	420	0,0004	20	0,000021	0,7431	73,5499	990,799717
3	1,5	147100	400	0,0004	20	0,00002	0,70771	110,325	943,618778
4	2	196133	700	0,0007	15	4,6667E-05	1,65133	147,1	2201,77715
5	2,5	245166	600	0,0006	7	8,5714E-05	3,03306	183,875	4044,08048
6	3	294200	790	0,0008	7	0,00011286	3,99353	220,65	5324,70596
7	3,5	343233	750	0,0008	7	0,00010714	3,79133	257,425	5055,1006
8	4	392266	440	0,0004	2	0,00022	7,78485	294,2	10379,8066
9	4,5	441299	550	0,0006	2	0,000275	9,73107	330,974	12974,7582

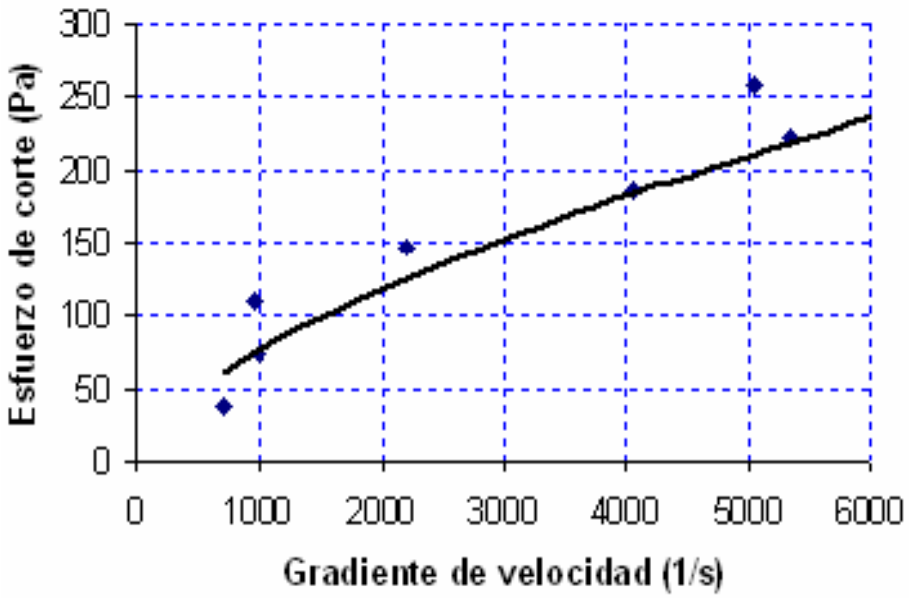
Tabla 3.1 Resultados obtenidos del estudio reológico

v	caudal(m3/s)	(m3/h)	dp/dl teor.	dp/dl exp	Error (%)	λ	Re*
0,53	6E-05	0,2005542	14365,84	14359,93	4,100	0,617	24,09
0,74	7E-05	0,2552508	17771,21	17745,74	14,400	0,389	38,20
0,71	1E-04	0,3464118	17216,25	17209,18	4,100	0,416	35,73
1,65	0,0001	0,364644	29340,71	29328,66	41,000	0,130	114,15
3,03	0,0002	0,546966	43013,92	42996,25	4,100	0,057	262,67
3,79	0,0003	0,91161	49500,43	49477,39	4,700	0,042	356,66
7,78	0,0003	1,093932	77836,66	77804,68	4,100	0,016	956,26

9,73	0,0004	1,276254	89569,50	89532,71	4,100	0,011	1298,44

Tabla 3.1 Continuación

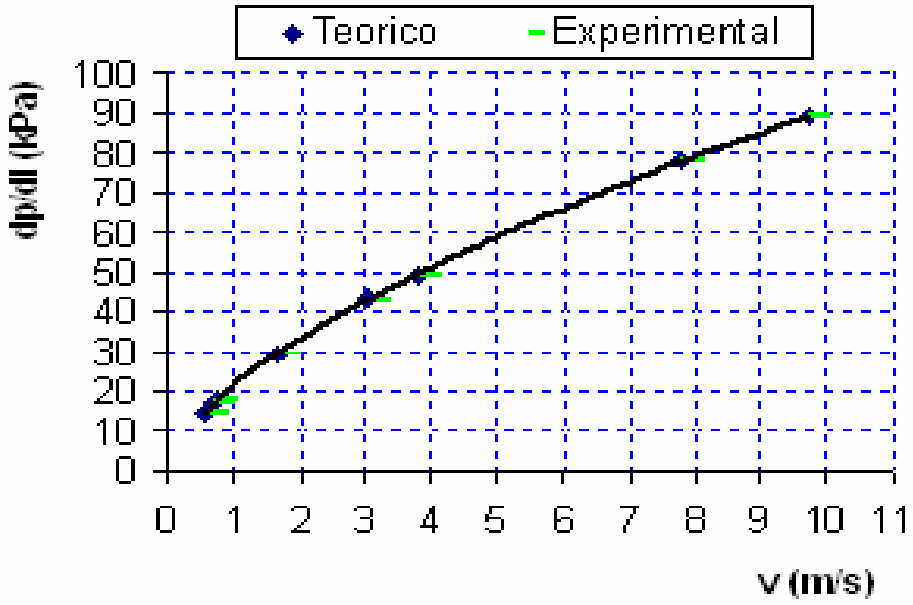
Figura 3.3 Dependencia entre el gradiente de velocidad y el esfuerzo de corte.



Se observa en la figura anterior que el crudo estudiado posee un comportamiento seudoplástico; los datos han sido ajustados al modelo de Oswald de Waele $\tau_{x,y} = 0.9844 \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy} \right)^{0.6292}$, el cual está caracterizado por los parámetros reológicos: índice de consistencia (K) e índice de la ley de potencia (n).

3.3.1. Análisis de la curva que relaciona la caída de presión (dp/dl Kpa) teórica y la experimental con la velocidad del flujo (v m/s).

Figura 3.4 Dependencia entre la caída de presión y la velocidad.

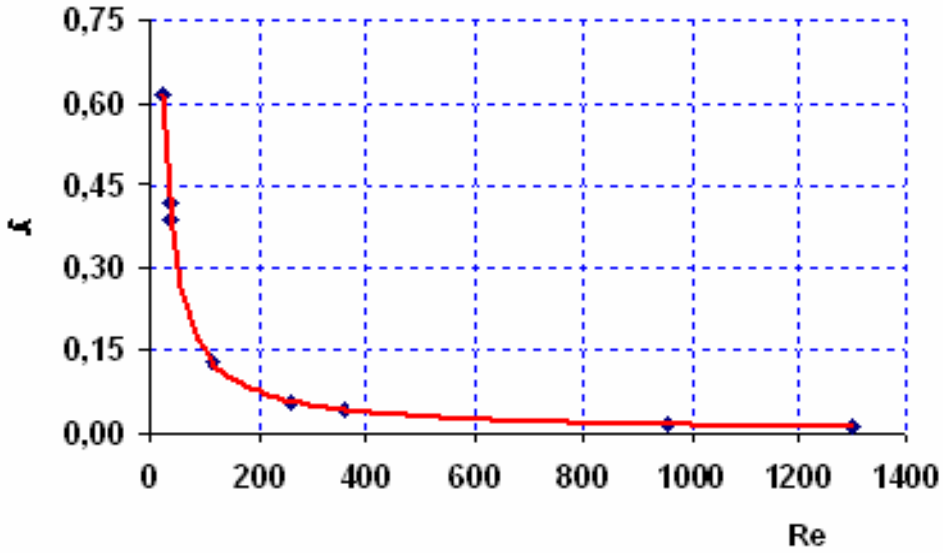


El fluido analizado en la gráfica 3.3 cumple la ley de potencia ajustándose al modelo, Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para el cálculo de pérdidas de cargas en tuberías cuando se transporta fluidos seudoplásticos y dilatantes, en particular petróleos pesados no siendo así el analizado, para lo ecuación para la caída de presión sería:

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

3.3.2. Análisis del número de Re* en función del λ coeficiente de fricción por rozamiento del fluido (ambos adimensionales).

Figura 3.5 Dependencia entre λ y Re.



En la gráfica anterior se muestra el comportamiento del coeficiente de fricción por rozamiento ante el numero de Re*. El coeficiente de fricción por rozamiento fue obtenido a través de la ecuación de Weisbach – Darcy valida para un flujo de cualquier tipo de fluido por tuberías rectas circulares $\left(\frac{dp}{dz}\right)_F = \lambda \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{v_M{}^2}{2} \cdot \rho_M$ y el numero de Re fue obtenido por

$\mathrm{Re}^* = \frac{8^{1-n} \cdot D^n \cdot v^{2-n} \cdot \rho}{K}\left(\frac{4 \cdot n}{3 \cdot n + 1}\right)^n$ el cual está definido para fluidos seudoplásticos y dilatantes según su naturaleza reológica *(Turro 2002)*.

3.4. Efecto económico de transporte

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

Para el análisis de la valoración económica del transporte del Meca-30 en la instalación analizada, se determinó la caída de presión en el tubería, para ello nos apoyamos en la ecuación **2.11** utilizada por diversos autores Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001), para el cálculo de pérdidas de cargas en tuberías cuando se transporta fluidos seudoplásticos y dilatantes, en particular petróleos pesados y el número de Re* se determinó por la ecuación **2.27** utilizada para fluidos seudoplásticos y dilatantes según su naturaleza reológica *(Turro 2002)*.

Parámetros	Valores
K *Índice de consistencia másica* $(Pa \cdot s)$	0.9844
n *Índice de la ley de potencia (adimensional).*	0.6292
D diámetro de la tubería (m)	0.2032
ρ densidad del fluido (Kg/m^3)	992
L longitud de la tubería (m)	10
ΔZ diferencia de altura (m)	0.9
ξ coeficientes de perdidas locales	1.3 para codos (2) de 90^0 1.0 para salida de la tubería
Pf presión final	2003655.8Pa
Re* (adimensional)	33.3

Tabla 3.2 Parámetros requeridos para el cálculo de la caída de presión en la tubería

3.4.1. Costo unitario de consumo energético para transportar el petróleo Mesa-30

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.

$$C_T = \left(\frac{G_b}{Q \cdot L} \right) \qquad (4.1)$$

Donde:

C_T - Costo unitario de Transportación, *CUC*

G_b - Gasto horario de la bomba, *CUC*

Q - Caudal del fluido transportado, m^3/h.

L - Longitud de la línea, *(m)*

Gasto horario de la bomba

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

$$G_b = C_{elec} \qquad (4.2)$$

Donde:

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

$$C_{elec} = \frac{T_a \cdot N_n \cdot K_p \cdot t_t}{\eta_m \cdot \eta_b} \qquad (4.3)$$

Donde:

T_a - Tarifa de corriente eléctrica.

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

K_p - Coeficiente de pérdida.

t_t - Cantidad de horas de funcionamiento.

η_m - Rendimiento del motor eléctrico.

η_b - Rendimiento de la bomba.

Tabla 4.3 Valores de los parámetros analizados para el cálculo del costo de energía eléctrica.

Parámetros	Valores
Q *(m^3/h)*	115.2
L *(m)*	10.9
T_a *(CUC / kw.h)*	0.072
N_n *(w)*	49510.4
K_p (adimensional)	104
t_t *(h)*	24
η_m	0.75
η_b	0.62

Teniendo en cuenta los parámetros de la tabla 4.3 y apoyándonos en la ecuación 4.1 se obtuvo el costo unitario de transportación del Mesa-30, el cual es de 151 CUC analizando el caudal de la bomba y a una distancia de 10.9 m. Estos resultados, en cierta medida dan una visión del costo por consumo de energía para transportar el Mesa-30 y que la patencia de transporte del fluido se ajusta a la del motor por lo que este analizando los resultados encaja en el flujo productivo. Es de notar que los

costos son considerables, pero se debe tener en cuenta la magnitud de la producción de dicha industria.

3.5. Impacto ambiental

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

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

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

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, nauseas, cefaleas, insomnio y en casos severos, inconsciencia y muerte.

Ingestión: En caso de que ocurra se producirán nauseas 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.

3.6. Conclusiones del capítulo

- El petróleo Mesa-30 presenta un comportamiento seudoplástico ya que disminuye su viscosidad con el incremento del gradiente de velocidad; el cual teniendo en cuenta los resultados del experimento reológico se ajusta al modelo de Oswald de Waele.

- La caída de presión aumenta conjuntamente con la velocidad de transporte del fluido, cumpliendo con la ley de potencia ajustándose al modelo Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001).

- Según lo descrito por la figura 3.4 el coeficiente de fricción por rozamiento (λ) disminuye con el aumento del número de Re*, este último depende fundamentalmente de los parámetros K (Índice de consistencia másica) y n (Índice de la ley de potencia).

CONCLUSIONES GENERALES

- Las investigaciones realizadas a los fluidos desde el punto de vista reologico a petróleos es poca al igual que las realizadas a fluidos no newtonianos dentro de los cuales se encuentra el fluido en estudio.

- El petróleo analizado de acuerdo con los reogramas experimentales analizados, -presenta un comportamiento seudoplástico y dilatante cumpliendo con la ley de potencia ajustándose con los modelos de *Ostwald de Waele y* Placencia et al. (2000); Martínez et al. (2001).

- Son pocas las investigaciones realizadas acerca de las propiedades reológicas de petróleos crudos al igual que las realizadas sobre las características de transporte de este por tuberías.

- En la validación del modelo para el cálculo de potencia necesaria, se obtuvo un error promedio de 10.92%, siendo válido para el cálculo de operación de sistemas de tuberías cuando se conocen las propiedades reológicas y de transporte del fluido; para otros regímenes de flujo el error puede estar atribuido a la selección de coeficiente a'.

- La simulación operacional del sistema para diferentes condiciones, es una herramienta concreta para el análisis de explotación y diseño de sistemas de transporte industrial de fluidos. La misma permite influir sobre el rendimiento de bombeo y en esencia en el costo de transportación.

RECOMENDACIONES

- Considerar en futuras investigaciones, la obtención de las propiedades reológicas del petróleo crudo cubano en función de los factores que influyen en su comportamiento, que permita establecer el comportamiento de flujo según sus propiedades de transporte.

- Emplear el modelo propuesto en la ecuación 2.16, para estimar pérdidas de carga en tuberías que transportar petróleos crudo cubano en régimen laminar de flujo.

- Teniendo en cuenta las propiedades reológicas, continuar las investigaciones del sistema de transporte de crudos por tuberías.

- Validar el modelo de cálculo propuesto de estimación de la potencia necesaria de transporte, en otros regímenes de flujo y condiciones donde se analice, la influencia de la diferencia de nivel de la tubería entre el punto de carga y la descarga.

BIBLIOGRAFÍA

1- Aguiar, S. P., Comportamiento reológico de las colas de Nicaro. Trabajo de Diploma. Facultad de Tecnología, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, 1975.

2- American petróleoum Institute, “API Specification for HIGH-TEST LINE PIPE, Official

Publication”, API Spec 5LX, edición 22, Washington, D.C., marzo 1978.

3- Allen M.P., Tildesley D.J. Computer Simulation of Liquids, Oxford University Press, Oxford, 1987.

4- Bagley, E. B., "End Correction in the Capillary Flow Polyethylene", en Journal of Applied Physics, May 1957, pág. 624.

5- Bansbach Paul L. (1970) “The How and Why of emulsions.

6- Bayvel, L. y Orzechowsky, Z., Liquid Atomization. Taylor y Francis Ed.,1993.

7- Bennet, C. C., Meyersd, J. E., *Momentum, Heat and Mass Transfer,* La Habana, EPUH MINED, 1968.

8- Cadwell y Babbit, "Flow of Muds, Slugges and Suspentions in Circular Pipes" en Ind. Eng. Chem. (33), 1945, pág. 249. (Pa.sn)

9- Cavallo, J., Chang, O., “Emulsion Preparation and Stability” en Chemical Engineering Progress, 1991.

10- CONSIDINE, "Energía, tecnología del petróleo", Marcombo, Mexico, 1988.

11- Coussot P., Ancey C. Phys Rev E 59: 4445, 1999.

12- HOLLAND ANTHONY F. “Scale up of fluid flow systems” Chemical Engineering, sep. 1972.

13- Howard F. Rase, “Diseño de tubería para plantas de procesos”, Ed. Blume, Barcelona 1973.

14- Hunter, R. F., *Foundation of Colloid Science,* Oxford, N.Y., Ed. Clarondon Press, 1989.

15- KARASSIK, IGOR J., “Bombas centrífugas y factores hidráulicos del sistema”, Worthington Div., McGraw Co.

16- Martin H. Whol, “Rheology of non-newtonian materials part 2”, Chemical Engineering, Feb. 1968.

17- Mehta A. Granular Matter: An Interdisiplinary Approach, Springer-Verlag, 1994.

18- M. Vita Peralta M., Alejandro M. Arriola M., Ramón Sánchez., Instituto de Investigaciones Electricas Pag 131-135.

19- Nehal, A. S., Amal N. M., Nael, Z. N., y Hussein, G. K. H., ¨Stability and Rheology of Heavy Crude Oil-in-Water Emulsion Stabilized by an Anionic-Nonionic Surfactant Mixture¨, Petroleum Science and Technology, vol 17, núm. 5 y 6, 1999, pp. 553-576.

20- NÚÑEZ G. A., Sanchez G., Gutierrez X., Silva F., Dalas C., Rivas H. Langmuir 16: 6497-6502, 2000.

21- Reisner W., Rothe E. in Bins and Bunkers for Handling Bulk Material, Rock and Soil Mechanics (Trans Tech, Clausthal-Zellerfeld, West Germany, 1971); Chowhan Z.T. Pharm Technol 19: 56, 1995; Luding S. et al. Pharm Technol 20: 42, 1996.

22- Rivera, L. “Explotación de crudos pesados en el Ecuador”, Revista I+D Innovación, No 5.

23- Romo, L. “Coloideofísica, coloideoquímica, fenómenos de superficie”, Ed. Universitaria, Quito 1981.

24- Romo, L. “Emulsiones, fundamentos fisicoquímicos, formulación y aplicaciones”, Ed. Universitaria, Quito 1993.

25- Schramm, L. “Emulsions, fundamentals and aplications in the petroleum industry”, American Chemical Society, 1992

26- Schubin, E. D., *Química coloidal* , Moscu, Ediciones Mir, 1988.

27- Schwarzer S., Hofler. K., Manwart C., Wachmann B., Herrmann H. Physica A 266: 249, 1999.