

República de Cuba
Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica

Trabajo de Diploma

En opción al título de Ingeniero Mecánico

*Título: Estudio experimental del residual petrolizado en la
empresa Raúl Díaz Argüelles de Moa.*

Autor: Francisco Rafael Álvarez Giró

Tutor: Ing. Andrés Durán Reyes

Moa -2010

“Año 52 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: **Francisco Rafael Álvarez Giró** autor de este trabajo de Diploma y el tutor Ingeniero Andrés Durán Reyes declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y la empresa Puerto Moa para que dispongan de su uso cuando estimen conveniente.

Francisco Rafael Álvarez Giró

Ing. Andrés Durán Reyes



PENSAMIENTOS

El sol no espera a que se le suplique para derramar su luz y su calor. Imita y has todo el bien que puedas sin esperar a que se te implore.

Epicteto

Por el poder de erguirse, se mide a los hombres.

José Martí Pérez



AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a los profesores del Departamento de Mecánica, especialmente a Yoalbys, Yodelkis, Murphis, Marbelis, Geovanys, Tomás y Alberto Velázquez por las ayudas prestadas en los diferentes momentos, en fin a todos los que contribuyeron a este éxito.

A mi mis padres, esposa, hijos y familia en general, por el apoyo brindado y por siempre estar dispuesto a ayudarme.

A mis amistades y compañeros de trabajo que con su apoyo desinteresado han contribuido a que alcanzara esta meta.

A todos muchas gracias.

El autor



DEDICATORIA

A mis padres, hijos, esposa y familiares en general porque constituyen el motivo de inspiración para alcanzar las metas propuestas.

A la Revolución Cubana porque me ha permitido formarme profesionalmente.

A los nombrados y a quienes imperdonablemente no he recordado, a todos les dedico este éxito.

El autor



RESUMEN

En el trabajo se desarrolla un estudio experimental del residual petrolizado de la empresa Raúl Díaz Argüelles, mediante el mismo se comprobó que el modelo reológico teórico que caracteriza al residual petrolizado es el que se corresponde con un fluido pseudoplástico. El referido estudio permitió ajustar el mencionado modelo para el intervalo de temperatura comprendido entre 50 y 70°C, siendo el coeficiente de correlación superior al 99,06%. Se determinó que la formación de 48,6 m³ de residual petrolizado genera la pérdida de 1834,188 barriles de petróleo, lo que implica un gasto económico que asciende a 119 222.22 USD. Se evidenció que el residual petrolizado afecta al medio ambiente y la salud humana, siendo las enfermedades más frecuentes la irritación de los ojos, el nerviosismo y la cefalea.



ABSTRACT

The work is an experimental study of the residual petroleum of the company Raúl Díaz Argüelles is developed, by means of the same one it was proven that the pattern theoretical reologic that characterizes to the residual petroleum is the one that belongs together with a flowing pseudoplastic. The one referred study allowed to adjust the one mentioned model for the interval of temperature understood between 50 and 70 °C, being the coefficient of superior correlation to 99,06%. It was determined that the formation of 48,6 m³ of residual petroleum generates the loss of 1834,188 barrels of petroleum, what implies an economic expense that ascends 119 222.22 USD. It was evidenced that the residual petroleum affects to the environment and the human health, being the most frequent illnesses the irritation of the eyes, the edginess and the migraine.



ÍNDICE

Contenido	Págs.
Introducción.	1
Capítulo 1. Marco teórico de la investigación.	4
1.1- Introducción.	4
1.2- Propiedades generales de los petróleos.	4
1.3- Factores que influyen sobre la viscosidad.	7
1.4- Generalidades de los residuales del petróleo.	8
1.5- La viscosidad.	12
1.6- Efectos de la temperatura y la presión en líquidos muy viscosos.	13
1.7- Tecnologías y alternativas aplicadas para la extracción de los residuales.	15
1.8- Propiedades del flujo para el transporte ó extracción del residual.	15
1.9- Descripción de las Instalaciones de la empresa Raúl Díaz Argüelles.	17
1.10- Conclusiones del capítulo 1.	19
Capítulo 2. Materiales y métodos.	20
2.1- Introducción.	20
2.2- Características a tener en cuenta del sistema en estudio.	20
2.3- Análisis de las diferentes etapas a partir del problema planteado.	21
2.4- Análisis del punto de inflamación.	24
2.5- Viscosidad y tipos de fluidos.	24
2.6- Modelos reológicos de fluidos.	25
2.7- Determinación de las propiedades reológicas.	30
2.8- Diseño de experimentos.	33
2.9- Conclusiones del capítulo 2.	34
Capítulo 3. Resultados experimentales obtenidos en el estudio del residual petrolizado.	35
3.1- Introducción.	35
3.2- Resultados experimentales.	35
3.3- Determinación del calor suministrado al sistema.	43
3.4- Valoración económica.	40
3.5- Impacto ambiental.	43
3.6- Conclusiones del capítulo 3.	45
Conclusiones.	46
Recomendaciones.	47
Referencias bibliográficas.	48

INTRODUCCIÓN

En Cuba el petróleo ha desempeñado un papel fundamental para el buen funcionamiento de las industrias del níquel, que junto al turismo están entre las primeras fuentes de exportación del país, la referida industria está enfrascada en un proceso de ampliación de sus capacidades de producción y modernización de sus tecnologías para incrementar sus aportes al estado.

Los compuestos no saturados mezclados con el petróleo en los tanques de almacenamientos, provocan la formación del residual petrolizado, con características similares a un líquido altamente viscoso, difícil de manipular a temperatura y presión atmosféricas. Limitando la operación en los sistemas de trasiego a su capacidad de diseño producto a la formación de lodos y corrosión en líneas, calentadores y filtros (Scalliet et al., 2000).

Las teorías para la determinación de las viscosidades, propiedades reológicas y de transporte de líquidos y mezclas no conducen a un método teórico de estimación, sino a técnicas empíricas basadas en la evaluación de algunas constantes; a partir de las estructuras o propiedades físicas del líquido que se trate. Los métodos se basan en el estudio y correlación de datos experimentales (Acosta, 1995).

La temperatura requerida para procesar el lodo depende de la estabilidad de la emulsión, de la viscosidad del lodo y de la intensidad del mezclado. El hidrocarburo recuperado es reintroducido en el proceso de refinación mezclándose con el crudo en determinadas cantidades. También se ha reportado la adición de solventes seguida por la adición de sales inorgánicas las cuales generan gases y calor, facilitando la remoción y flotación de la fase orgánica (Franco et al., 1996).

Refiriéndose a la viscosidad de los fluidos y en específico a los no newtonianos, muchos han sido los autores que abordan esta temática es vital en el desarrollo de la investigación de fluidos. De la Paz et al. (2002) realizan 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 la de fluidez cómo se deforma el cuerpo al ser sometido a esfuerzos producidos por fuerzas externas.

La base de combustible de la empresa Puerto Moa, tiene como objetivo almacenar los portadores energéticos que garanticen la producción de níquel sin interrupción, para poder cumplir con los planes de producción y compromisos internacionales, con la necesidad de disponer de una infraestructura que permita almacenar estos recursos para controlar mejor su almacenamiento, transporte, distribución y utilización.

A pesar de los elementos anteriormente expuestos, en la base de petróleo de la empresa Puerto Moa, la problemática de la sedimentación y compactación del petróleo, entre otros compuestos orgánicos generan la formación del residual petrolizado depositado en el fondo de los tanques de almacenamiento, provocando la reducción de la capacidad de almacenaje y transporte del sistema. También acelera los ciclos mantenimiento y la destrucción de estos tanques.

Teniendo en cuenta las deficiencias antes expuestas, se define como **problema:**

La necesidad de realizar el estudio experimental del residual petrolizado de los tanques de almacenamientos ubicados en la base de combustible de la empresa Raúl Díaz Argüelles, que permita determinar las propiedades físicas y reológicas del material que influyen en su extracción y transporte.

Como **objeto de estudio** de la investigación se plantea:

El residual petrolizado de los tanques de almacenamientos ubicados en la base de combustible de la empresa Raúl Díaz Argüelles de Moa.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:**

Si se realiza el estudio experimental del residual petrolizado de los tanques de almacenamientos ubicados en la base de petróleo de la empresa Raúl Díaz Argüelles y se conjuga con el análisis teórico del sistema, entonces es posible determinar las propiedades físicas y reológicas del material que influyen en su extracción y transporte.

En correspondencia con la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo:**

Realizar el estudio experimental del residual petrolizado de los tanques de almacenamientos ubicados en la base de combustible de la empresa Raúl Díaz Argüelles.



Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

- Realizar una revisión bibliográfica relacionada con la temática y el material objeto de estudio, que permita el establecimiento del marco teórico de la investigación.
- Establecer el procedimiento de cálculo para la determinación de los diferentes parámetros.
- Obtener experimentalmente las propiedades físicas y reológicas del material.
- Determinar el efecto de la temperatura sobre las propiedades reológicas del residual de petróleo.
- Realizar la valoración económica y ambiental asociada al residual petrolizado investigado en el presente trabajo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

La empresa Raúl Díaz Argüelles se encuentra enmarcada en un proyecto de ampliación y modernización de la base de combustible por espacio de cinco años, como posibles soluciones a los problemas de almacenamiento, trasiego, calentamiento y tratamiento del petróleo, para darle solución inmediata al residual de petróleo depositado en el fondo de los tanques de almacenamientos, situación que ha conllevado a la necesidad de realizar estudios sobre este residual de petróleo, que permitan buscar alternativas convenientes para el proceso productivo y su efecto en el medio ambiente.

El objetivo del capítulo es: establecer el marco teórico necesario para el desarrollo del estudio experimental del objeto de estudio.

1.2 - Propiedades generales de los petróleos

El petróleo es un líquido oleoso bituminoso (color oscuro) de origen natural compuesto por diferentes sustancias orgánicas (es una mezcla de hidrocarburos, aunque también suelen contener unos pocos compuestos de azufre y de oxígeno). Es como el carbón, un combustible fósil. También recibe los nombres de petróleo crudo, crudo petrolífero o simplemente "crudo". Aunque se trata de un líquido aceitoso de color oscuro, es considerado una roca sedimentaria.

El petróleo se forma a partir de restos de pequeños organismos marinos que viven en cantidades enormes en mares cálidos y poco profundos. Si al morir estos organismos son rápidamente enterrados por sedimentos, fermentarán. Pasados millones de años, bajo la presión de nuevas capas de sedimentos, los restos orgánicos se transformarán en petróleo. El proceso comenzó hace muchos millones de años, cuando surgieron los organismos vivos en grandes cantidades, y continúa hasta el presente.

Se encuentra en grandes cantidades bajo la superficie terrestre, en los estratos superiores de la corteza terrestre. Esto se debe a que el petróleo tiende a escapar a zonas más altas en las que soporte menos presión. En este viaje, con frecuencia acaban encontrando un esquisto impermeable o una capa de roca densa y se acumula, ya que son determinadas zonas de las que no puede salir: son las trampas. En otras ocasiones consigue alcanzar la superficie. Cuando ocurre esto el petróleo se volatiza dejando un residuo de asfalto y betún. No es de extrañar, por tanto, que fuese conocido ya por las antiguas civilizaciones. Los egipcios utilizaban el betún para impermeabilizar los barcos y para embalsamar las momias. Sin embargo, tan sólo desde finales del siglo XIX viene utilizándose a gran escala como combustible.

1.2.1- Clasificación del petróleo

En el petróleo natural, además de hidrocarburos, existen nitrógeno, azufre, oxígeno, colesteroína, productos derivados de la clorofila y de las heminas (porfirinas) y, como elementos, trazas, vanadio, níquel, cobalto y molibdeno.

Como consecuencia de los compuestos orgánicos nombrados, el petróleo presenta polarización rotatoria, lo cual revela claramente que se trata de un compuesto de origen orgánico, formado a partir de restos animales y vegetales.

La composición química del petróleo es muy variable, hasta el punto de que los cuatro tipos fundamentales de hidrocarburos: parafinas (hidrocarburos saturados), olefinas (hidrocarburos insaturados), naftenos (hidrocarburos cíclicos saturados o cicloalcanos,) e hidrocarburos aromáticos, no solamente son diferentes de un yacimiento a otro, sino también las diversas sustancias que es preciso eliminar más o menos completamente: gas, azufre (que junto con el sulfhídrico, mercaptanos y tioalcoholes pueden alcanzar un 3%), agua más o menos salada, compuestos oxigenados y nitrogenados, indicios o vestigios de metales etc.

Un análisis en el laboratorio proporciona primeramente indicaciones sobre la cantidad y calidad de los productos acabados que se pueden extraer del petróleo crudo:

- ✚ Alta tensión de vapor, revela la presencia de gas.
- ✚ Alta densidad y viscosidad, indican una reducida proporción de gasolina o un contenido importante de betún o parafina.

La clasificación del petróleo se basa en la clase de compuestos químicos que predominan en el mismo:

Petróleo de base parafínicas.

- ✚ Predominan los hidrocarburos saturados o parafínicos.
- ✚ Son muy fluidos de colores claros y bajo peso específico (aproximado a 0,85 kg/lit).
- ✚ Por destilación producen abundante parafina y poco asfalto.
- ✚ Son los que proporcionan mayores porcentajes de nafta y aceite lubricante.

Petróleo de base asfáltica o nafténica.

- ✚ Predominan los hidrocarburos etilénicos y diétilínicos, cíclicos ciclánicos (llamados nafténicos), y bencénicos o aromáticos.
- ✚ Son muy viscosos, de coloración oscura y mayor peso específico de 0,95 kg/lit.
- ✚ Por destilación producen un abundante residuo de asfalto. Las asfáltitas o rafealitas argentinas fueron originadas por yacimientos de este tipo, que al aflorar perdieron sus hidrocarburos volátiles y sufrieron la oxidación y polimerización de los etilénicos.

Petróleo de base mixta.

- ✚ De composición de bases intermedias, formados por toda clase de hidrocarburos: Saturados, no saturados (etilénicos y acetilénicos) y cíclicos (ciclánicos o nafténicos y bencénicos o aromáticos).
- ✚ La mayoría de los yacimientos mundiales son de este tipo.

A su vez la composición de los hidrocarburos que integran el petróleo varía según su lugar de origen:

- ✚ Petróleos americanos: hidrocarburos de cadenas abiertas o alifáticas.
- ✚ Petróleos de Pensilvania: hidrocarburos saturados (alcanos de n^o. de C = 1 a 40).
- ✚ Petróleos de Canadá: hidrocarburos no saturados.
- ✚ Petróleos rusos: hidrocarburos cíclicos, con 3, 4, 5, ó 6 átomos de carbono en cadena abierta o cerrada.

1.3 - Factores que influyen sobre la viscosidad

- 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).

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

En la que T es la temperatura; C y B son constantes, cuyos valores dependen de la correlación 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.

1.4- Generalidades de los residuales del petróleo

La palabra petróleo proveniente del latín “petroleum” (petra = piedra y oleum = aceite) y significa aceite de piedra. A los Hidrocarburos, se les define como compuestos químicos de carbón (76 a 86%) e hidrógeno (14 a 24%). Elementos como el metano, etano, propano, butano y pentano entre otros son hidrocarburos que forman parte de otros compuestos de hidrocarburos como gas natural y petróleo (Diccionario LAROUSSE de ciencia y técnica).

Residual o Residuo: se define como sobrante o materias que quedan después de efectuar alguna operación química, tratamiento industrial y transformación, entre otras operaciones.

Asfalteno: mezcla sólida y negra de hidrocarburos naturales.

Hidrocarburos: Es la combinación de carbono con el hidrógeno, los cuales son muy numerosos, variados e importantes.

Resina: sustancia sólida o de consistencia pastosa, insoluble en el agua, soluble en el alcohol y en los aceites esenciales, y capaz de arder en contacto con el aire.

Impurezas: se definen como el contenido de agentes corrosivos y otras sales contenidas en las sustancias.

Residuo petrolizado almacenado: se obtiene como resultado del proceso de envejecimiento que sufre el petróleo durante un período de tiempo largo de almacenamiento en los tanques.

Los residuales petrolizados depositados en el fondo de los tanques de almacenamientos de petróleo, son producto a la baja eficiencia en el calentamiento, que conlleva a la sedimentación y compactación del combustible.

Clements et al. (1978) plantean que los lodos se pueden clasificar en dependencia de su formación en:

- Los residuales acumulados en el fondo de los tanques de almacenar petróleo.
- Los residuales que se encuentran en el fondo del separador API.
- Los residuales en suspensión en el proceso de emulsión del petróleo.

- Los residuales acumulados en el fondo de los tanques de separación por flotación inducida.

1.4.1- Residuales petrolizados y sus propiedades

Los análisis físicos, químicos son un conjunto de técnicas y procedimientos empleados para identificar y cuantificar la composición físicas, químicas y reológicas de una sustancia que se necesite estudiar, con el propósito de ser usada en bienestar del desarrollo de la sociedad.

Algunas composiciones generales reportadas para estos lodos petrolizados son: 90 % de hidrocarburos, 5% de agua y 5% de sólidos, aunque otros presentan composiciones de 20 % hidrocarburos, 50 % de sólidos, y la composición de agua no es limitada aunque tiene un límite práctico de 75% (Jonson et al., 1993). Los resultados sugieren un análisis integral para este líquido altamente viscoso, sirviendo como guía a otros trabajos.

Los petróleos poseen moléculas de resinas, sustancias sumamente viscosas y pocos móviles de color marrón oscuro hasta pardo y por su masa molecular ocupan un lugar intermedio entre los aceites y los asfáltenos lo que es una prueba del denominado vínculo genético entre resinas y asfáltenos. Además de que su contenido de carbono (79 - 87%) resultan ser próximos a los asfáltenos con (1 - 2%) en masa de hidrógeno. En las sustancias resinosas con frecuencia también se encuentran metales como el Fe, Ni, Cr, Mg y/o Co, mientras que el resto de la composición esta formada por sustancias neutras (Delgado, 2006). Estos conocimientos permiten una buena selección de los elementos químicos, que integran los residuales de petróleo.

Las propiedades físicas de los aceites pesados son todavía poco conocidas. La viscosidad es medida para los diferentes aceites pesados y puede variar en órdenes de magnitud. Sin embargo, la viscosidad y la densidad no parecen estar directamente relacionados con los aceites pesados como lo están para los aceites más ligeros. Como el petróleo pesado es un material viscoelástico, el módulo de corte y la viscosidad se acoplará (Han y Liu, 2005).

Las variaciones en el contenido de asfaltenos puede ser la explicación de la gran dispersión de valores de viscosidad observado en los aceites pesados (Al-Mamaari et al., 2006; Argillier, 2001; Henuat, 2001). Los resultados sugieren que el módulo de la

viscosidad y corte combinados dependen del contenido de asfaltenos y resinas, más que del contenido de asfaltenos solo.

Los hidrocarburos acumulados en el fondo de los tanques sufren un envejecimiento gobernado por tres tipos de procesos: físicos, químicos y biológicos (Jonson et al., 1993). Estos procesos alteran algunas de las propiedades de los hidrocarburos presentes en los residuales como: la viscosidad y el contenido de carbón, originando la precipitación de éstos hacia el fondo de los tanques. Además, el oxígeno atmosférico reacciona con los compuestos no saturados dando origen a gomas y ácidos que coprecipitan con otras impurezas formando emulsiones en el agua, donde la presencia de complejos metálicos, nitrógeno, hierro y otros permiten conocer cualitativamente de forma general algunas propiedades de estos residuales almacenados.

La viscosidad de estos aceites pesados no depende de la densidad de estos fluidos, otra posibilidad es que la viscosidad se controla por el petróleo pesado química de maquillaje. Un control químico que se ha sugerido en la literatura es el contenido de asfaltenos (Al-Mamaari et al 2006; Argillier, 2001; Henuat, 2001). Demostrando que la correlación entre la viscosidad y el contenido de asfaltenos no se manifiesta como la literatura lo reporta.

Los asfáltenos son las fracciones del petróleo de más alto punto de ebullición. Pueden obtenerse por varios procedimientos como: destilación al vacío del crudo del petróleo, tratamiento del residuo del petróleo con pentano bajo condiciones controladas y por contacto del residuo del petróleo con aire a temperaturas de 100 a 280°C. No tienen una estructura molecular definida, son sólidos friables de color oscuro, son insolubles en solventes no polares (Campos, 2005).

Franco et al. (1996) plantean que los petróleos aparentemente estables bajo la óptica de determinados tipos de análisis de evaluación de estabilidad, provocan deposiciones en calentadores de petróleo (generalmente aglutinados por las resinas). Las macromoléculas de los asfáltenos están compuestas de heteroelementos en los siguientes rangos o valores. Este estudio caracteriza cualitativa y cuantitativamente la composición químicas de los residuales de petróleo, según la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Componentes de las moléculas de Asfáltenos.

Elemento	Concentración	Elemento	Concentración
Carbono	75 a 85 %	Oxígeno	0.3 a 4.9 %.
Hidrogeno	7.4 a 8.8 %.	Níquel	1.0 a 100 ppm.
Azufre	0.3 a 10.3 %.	Vanadio	3.0 a 300 ppm.
Nitrógeno	0.6 a 3.3 %.		

Los resultados indican que el contenido de asfáltenos en un combustible influye de manera determinante en el tiempo de combustión del mismo, corroborando que los de mayor contenido de asfáltenos tardan más en quemarse, lo cual está asociado con los problemas de partículas inquemadas (Campos y López, 2005), este estudio demuestra que los asfaltenos pueden ser utilizados convenientemente en el proceso de combustión.

Para la mayoría de los aceites pesados, será importante considerar el contenido de resinas y asfaltenos, porque el por ciento en peso de asfaltenos puede ser probablemente mucho mayor de lo que se encuentra en la literatura actual (Henaut et al., 2001). El alto contenido de asfáltenos requiere de elevados excesos de aire para lograr un buen quemado, lo que va en detrimento de la eficiencia técnica. La combustión de los combustibles de alta viscosidad y alto contenido de asfáltenos produce elevadas concentraciones de productos contaminantes en chimenea y consumos excesivos de combustible (Campos et al., 2005).

Álvarez et al., (2004) realizan la aplicación de surfante para tratar los residuales sólidos petrolizados de la Refinería Níco López, reportan que las concentraciones de sustancias presentes en el residuo sólido petrolizado a tratar, se encuentran dentro del rango reportado por otros autores. La composición de estos lodos, siendo una mezcla de hidrocarburos, sólidos y agua le impide ser directamente utilizado en las empresas como combustible, por lo que se requiere la remoción de las porciones significativas de sólidos y agua. Con este objetivo se han desarrollado diversas tecnologías como la separación de estos sólidos de la fase acuosa mediante serpentines (Johnson et al., 1993).

1.5- La viscosidad

La *viscosidad* se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido. Dicho concepto se introdujo anteriormente en la Ley de Newton, que relaciona el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad).

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (1.2)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante; (MPa).

μ : Viscosidad; (MPa·s)

γ : Velocidad de deformación; (s^{-1})

1.5.1- Tipos de viscosidad

Existen tres tipos de viscosidad: la dinámica, la cinemática y la viscosidad aparente. La viscosidad dinámica o absoluta. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la pendiente en cada punto de dicha curva.

En cambio, la viscosidad aparente se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no newtonianos según la figura 1.1.

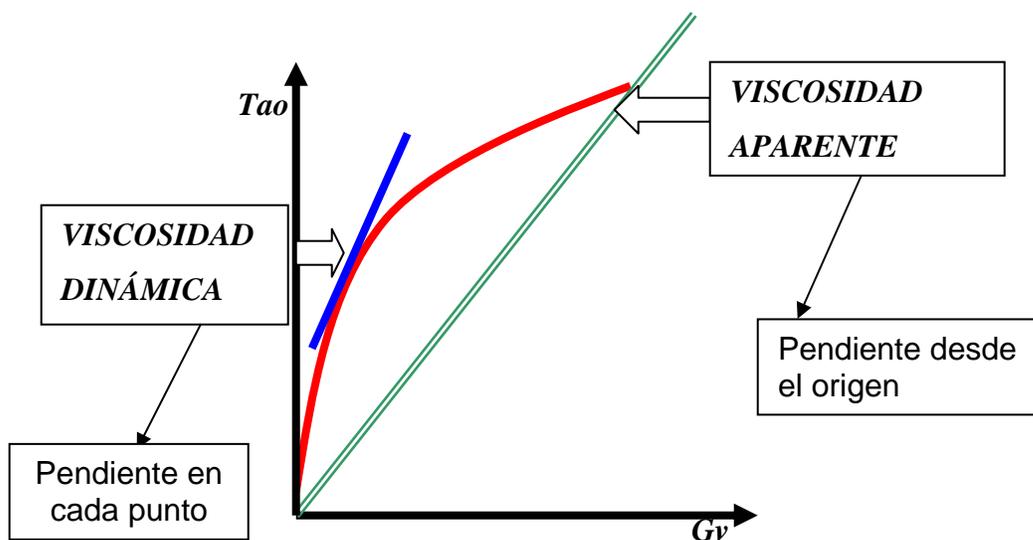


Figura 1.1. Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente.

Por último existe otro término la viscosidad cinemática, que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado. Las unidades más utilizadas de esta son los centistokes [cst].

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.

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).

Planteando la necesidad de estudiar otras formas de disminuir la viscosidad del petróleo pesado, Martínez (2001 y Pedroso et al. (2000) caracterizan el comportamiento de flujo de las emulsiones en condiciones cercanas a las reales del oleoducto. Partiendo de estudios realizados en laboratorio concluyen que las emulsiones de petróleo pesado en agua tienen una viscosidad de 10 a 12 veces menor que la viscosidad del petróleo pesado.

1.6- Efectos de la temperatura y la presión en líquidos muy viscosos

1.6.1- Efecto de la temperatura

La viscosidad de un líquido depende de la temperatura. A alta temperatura los líquidos son más fluidos, mientras que a baja temperatura son más viscosos. Esto es debido a que la energía térmica hace mas débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van der Waals.

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

1. Disminución de la viscosidad del medio dispersante.
2. Debilitamiento de las estructuras formadas por las partículas al aumentar la temperatura.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad aparente del líquido se representa mediante la ecuación 1.3 reportada por Guzmán-Andrade (1979)

$$\mu_a = A \cdot e^{B.T} \quad (1.3)$$

Donde:

μ_a : Viscosidad aparente de los líquidos; (Pa.s)

A: Viscosidad infinita.

e: Constante de euler.

T: Temperatura; (°C)

B: Coeficiente que depende del tipo de fluido.

De acuerdo con la ecuación 1.3 la viscosidad de los líquidos disminuye exponencialmente con el aumento de la temperatura.

La temperatura requerida para procesar el lodo depende de la estabilidad de la emulsión, de la viscosidad del lodo y de la intensidad del mezclado. El hidrocarburo recuperado es reintroducido en el proceso de refinación mezclándose con el crudo en determinadas cantidades. También se ha reportado la adición de solventes seguida por la adición de sales inorgánicas las cuales generan gases y calor, facilitando la remoción y la flotación de la fase orgánica (Franco et al, 1996).

1.6.2- Efecto de la presión

Existe una relación entre la viscosidad que presenta un fluido y la compresión a la que está sometido. Es función de esa relación se obtienen distintos tipos de comportamientos:

- **Pseudoplástico:** es el que tienen los líquidos que al ser comprimidos se hacen más fluidos y al cesar la compresión vuelven a ser más viscosos.
- **Dilatante:** es contrario al anterior, al comprimir el líquido se vuelve más viscoso.
- **Newtoniano:** existe una relación lineal, la viscosidad es independiente, la compresión no produce alteración de la viscosidad.

1.7- Tecnologías y alternativas aplicadas para la extracción de los residuales

El avance tecnológico en la industria del petróleo se debe en buena medida a las herramientas y metodologías provistas por la física. En particular, los estudios reológicos y dieléctricos se pueden considerar como los más conocidos y eficaces para estudiar los petróleos parafínicos y asfálticos altamente viscosos (Maruska y Rao, 1987).

Se han utilizados mecanismos para evitar la formación de estos lodos en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo. Entre estos se pueden citar la circulación continua del contenido de hidrocarburo en el tanque, mediante un chorro de combustible que se introduce horizontalmente en el fondo de éste. Esta circulación continua de la masa de combustible sobre todo en la zona cercana al fondo de los tanques evita la formación del lodo. Otros procedimientos emplean un barrido automático en el fondo de los tanques mediante un brazo mecánico (Deal et al., 1998).

Una tecnología aplicada con frecuencia en estos procesos, es la inyección directa de vapores calientes para disminuir la viscosidad del lodo que se encuentra en el interior de los tanques, facilitando su extracción (Scalliet et al, 2000). Trabajo que mejora la limpieza de los tanques y la fluidez del petróleo almacenado.

Las diferentes alternativas que se han desarrollado con el objetivo de extraer estos residuales de los tanques de almacenamiento de petróleo, incluyen en algunos casos, la recuperación del valor energético de estos desechos (Moran et al, 1989). Se requiere conocer sus propiedades químicas y físicas para su utilización.

Se ha utilizado la aplicación de agua a presión en la limpieza de estos tanques de almacenamiento, para mezclar el residual con el agua y esta fase acuosa es trasladada a otros tanques para el recobrado del petróleo contenido en ella (Hannay, 1993).

1.8- Propiedades del flujo para el transporte ó extracción del residual

El conocimiento de las propiedades de flujo de las suspensiones que se transportan es de gran importancia para decidir las características de los sistemas de bombeo, redes de tuberías, accesorios y equipos que deben utilizarse según las necesidades tecnológicas, así como los requerimientos medioambientales que deben tenerse en cuenta en todo proceso de carga, transportación, vertimiento y almacenamiento de cualquier tipo de material.

Con frecuencia se requiere la transportación de flujos con propiedades no Newtonianas, con un comportamiento pseudoplásticos o características plásticas con la aparición de esfuerzos cortantes iniciales, en su movimiento por oleoductos u otros dispositivos de transporte similares. En dependencia de las condiciones de operación, dichos flujos pueden ser laminares o turbulentos con diferentes influencias de las características reológica (Darby, 2000).

Al efectuar la evaluación en una tubería recta en la que el flujo es del tipo laminar o viscoso, la resistencia se origina por el esfuerzo tangencial o cortante de la viscosidad entre las láminas o capas adyacentes y 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 sujeta 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 (Welty y Bandala, 2001).

Placencia (2002), realizó 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 tensoactivo, temperatura y tiempo de almacenamiento. Finalmente para pruebas de flujo, se estudia el comportamiento de la emulsión con el 1% en peso al ser transportada por una tubería de 25,4 mm.

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 en cuestión (Skelland, 1987), en la mayoría de los textos de ingeniería química, el balance de energía mecánica para condiciones estacionarias de flujo se conoce como ecuación de Bernoulli y se ilustran sus aplicaciones para el caso particular del flujo newtoniano.

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 Bingham.

La información que existe ha sido desarrollada principalmente para fluidos de tipo newtoniano, también se han realizado trabajos relacionados con los fluidos no newtonianos (Steffe et al., 1986; Ibarz et al., 2001; Vélez, 2003; Perona, 2003; Sablani et al., 2003).

1.9- Descripción de las Instalaciones de la empresa Raúl Díaz Argüelles

La empresa está compuesta por diferentes instalaciones que prestan servicios a las empresas del territorio, las instalaciones son las siguientes:

- Base de combustible
- Base de Amoniaco.
- Base de productos claros.
- Base de transporte.
- Planta de carbón.
- Campo de boyas.
- Muelles para las descargas de los Busques.

La base de combustible es objetivo de este trabajo y comprende de las siguientes etapas:

- Recepción del combustible.
- Almacenamiento del combustible.
- Descarga del combustible.

1.9.1- Recepción del combustible

La recepción del combustible tipo fuel oil se hace a través del oleoducto constituido por una línea submarina con diámetro nominal 600 mm con una longitud aproximada de 1000 m, y una doble en tierra formada por dos líneas paralelas con diámetro 500 mm, a la entrada de la base de ombustible se une a otra de igual diámetro, dando paso a los tanques de almacenaje a través de una línea de 400 mm.

1.9.2- Almacenamiento del combustible

El sistema de almacenamiento del combustible se realiza de la siguiente manera:

- Crudo Mejorado 1 400, en los tanques 385P-TK-1, 2 y 3, con la capacidad de 20 000 m³ cada uno.
- Fuel Oil en los tanques 4 y 6, con la capacidad de 20 000 m³ cada uno.
- Crudo pesado en el tanque 5, con la capacidad de 15 000 m³

La descarga a las diferentes empresas, se realizará a través de las bombas que se encuentran ubicadas en la estación de bombeo de la base de combustible, las bombas de desplazamiento positivo son utilizadas para manejar crudos y las centrifugas para el fuel oil.

1.9.3- Descripción del flujo tecnológico de la base de combustible

La base de combustible asimila la recepción de dos tipos de combustibles simultáneamente fuel-oil y Crudo mejorado, por sus características diferentes se recomendará el uso de Campo de Boyas para la recepción de fuel-oil y el Muelle 1 para la recepción del Crudo mejorado.

El sistema de descarga del combustible, consta de los siguientes objetos fundamentales

- Obra hidrotecnia: Campo de Boyas.
- Oleoducto: Línea submarina y línea principal de tierra.
- Tanques de almacenajes.
- Muelle No.1, de descarga de combustibles.
- Línea Muelle 1 hasta la base de combustible.

El campo de boyas está formado por 4 anclas, de las cuales 3 se mantendrán ubicadas y siempre fijas en el fondo marino y una no permanente depositada por el propio buque, esta operación se ejecuta para asegurar la descarga del combustible. Las anclas mediante cadenas de acero y 4 boyas metálicas con señalización marítima, posibilitan 4 puntos de amarre en la superficie del mar.

Otras dos boyas mantendrán localizable el extremo de dos mangueras de goma flexible, de 250 mm de diámetro, que el buque con sus medios de izajes levantará y conectará a su sistema de bombeo a bordo para descargar el petróleo a una presión de 10 bar y 50°C, de tal manera se considera que los buques tanques de 60 000 t trasiegan combustible con un flujo promedio de descarga de 2 000 a 2 700 t/h.

El oleoducto de tierra está formado por dos líneas paralelas de diámetro nominal de 500 mm, con un largo aproximado de 2400 m, el material de las tuberías es de acero al carbono desnuda interiormente y con recubrimiento exterior en pintura de poliuretano.

El petróleo es transportado hasta el puerto de Moa en buques, teniendo dos puntos de recepción: Muelle No.1, de descarga de combustibles y el campo de boya. Por el muelle No.1 atracan los barcos cisternas, con capacidad para unas 28 000 t y por el campo de boya atracan los buques tanques con capacidad para 60 000 toneladas. Ambos tipos de embarcaciones tienen instalado un sistema de calentamiento en sus depósitos que mantienen el petróleo a temperatura entre 60 y 70°C.

1.10- Conclusiones del capítulo 1

- Los residuales petrolizados depositados en el fondo de los tanques de almacenamientos de la empresa Raúl Díaz Argüelles se encuentran poco estudiados desde el punto de vista de sus propiedades físicas y reológicas.
- El análisis de los trabajos precedentes reportan algunas de las características físicas y químicas de los diferentes tipos de residuales y líquidos viscosos, pero las mismas son insuficientemente para el estudio del residual analizado.
- No se reportan estudios experimentales relacionados con las propiedades físicas y reológicas más influyentes en la extracción y transporte para el material investigado en el trabajo.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1- Introducción

Los conocimientos sobre las características y propiedades del residual petrolizado almacenado, contribuyen a la selección de métodos adecuados de evaluación y toma de decisiones en la solución del problema asociado a la fluidización del mismo en la empresa Puerto Moa

En tal sentido el objetivo del capítulo es: establecer los métodos y procedimientos necesarios para el estudio experimental del residual petrolizado investigado.

2.2- Características a tener en cuenta del sistema en estudio

Partiendo de las características de la sustancia de trabajo en estudio y por los conocimientos empíricos adquiridos, los líquidos de alta viscosidad requieren de técnicas especiales que mejoren sus propiedades de flujo para el trasiego, dentro de las cuales se encuentran las técnicas utilizadas para aligerar el crudo pesado como el calentamiento, la dilución y otras.

En Cuba, para disminuir la viscosidad de los crudos pesados se emplean solamente métodos basados en el calentamiento y la dilución con diesel, lo que resulta económicamente no viable y apunta a la necesidad de introducir métodos de menor costo, como la emulsión.

En la literatura consultada no se han encontrado modelos que expongan el grado de influencia de variaciones de la temperatura en las propiedades reológicas de los residuales petrolizados almacenados a temperaturas de 50, 60 y 70°C.

2.2.1- Determinación de la cantidad de residual depositado en el fondo del tanque

El tanque es un cilindro (figura 2.1) por lo que el volumen del residual depositado puede calcularse por la fórmula 2.1.

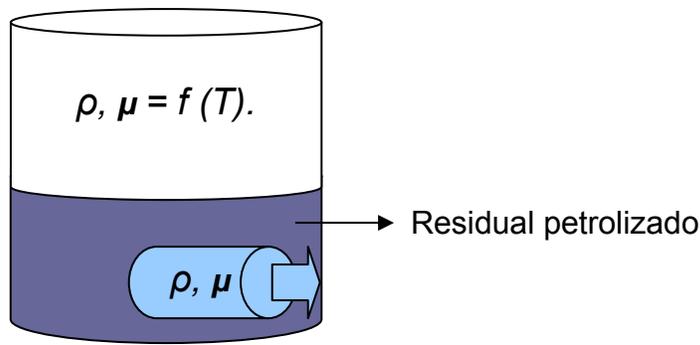


Figura 2.1. Residual petrolizado depositado en el fondo del tanque de almacenamiento.

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (2.1)$$

Donde:

V: volumen del tanque; (m³)

r: radio de la base; (m).

h: altura del residual depositado en el tanque; (m).

2.3- Análisis de las diferentes etapas a partir del problema planteado

El análisis y descripción de las diferentes etapas, con el fin de darle una posible solución al problema planteado.

Primera etapa ó determinación de las propiedades químicas, físicas y reológicas

- Se tuvo en cuenta el tipo de sustancia (muy viscosa).
- Se valoró con los laboratorios, los análisis químicos - físicos posibles a determinar.
- Se determinan las propiedades reológicas.

Segunda etapa ó estado de reposo del sistema a temperatura ambiente

- $\frac{dT}{dt} = 0$ (la temperatura no varía con respecto al tiempo).
- $\frac{dV}{dt} = 0$ (el volumen es constante ya que se encuentra en estado de reposo).

c) $\frac{dQ}{dt} = 0$ (no hay suministro de calor en todo el sistema).

Tercera etapa ó estado dinámico del sistema

a) Calentamiento del residual desde la temperatura ambiente (T) hasta la temperatura de extracción (T_c) racional para mejorar las propiedades físicas y reológicas.

b) Comparar los resultados de las propiedades físicas y reológicas a obtener a las diferentes temperaturas y presiones de extracción del residual.

c) $\frac{dT}{dt} \neq 0$ (la temperatura del residual varía con respecto al tiempo).

d) $\frac{dV}{dt} \neq 0$ (el volumen disminuye con respecto al tiempo).

e) $\frac{dQ}{dt} \neq 0$ (se suministra calor al sistema con el aumento de la temperatura).

f) $\frac{d\mu}{dt} \neq 0$ (la viscosidad disminuye, si aumenta la temperatura con respecto al tiempo).

g) se requiere de un balance de energía.

2.3.1- Descripción de la situación física para las etapas de reposo y dinámica

El interés durante estas etapas, como se ha analizado anteriormente, se reduce a evaluar la valoración de la temperatura del líquido con el tiempo, lo cual se logra mediante el balance de energía en la descripción macroscópica.

Segunda etapa ó estado de reposo

Recordando además que los valores constante de ($T_1= 0$, $Q_1= 0$, $V_1= 0$ y $t=0$), se desprecian en todo el proceso en la etapa de reposo.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dV}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

Donde:

T : temperatura ambiente; (°C).

Q : calor producto a la temperatura ambiente; (kJ).

V : volumen total contenido en el sistema a la temperatura ambiente; (m³).

Tercera etapa ó estado dinámico (comienza el proceso de calentamiento)

El calor suministrado al sistema incrementa la temperatura del líquido y disminuye la densidad ó viscosidad del residual con el fin de ser extraído totalmente del recipiente. De tal manera que el balance de energía sería.

$$E_{entra} = E_{acumulada} + E_{sale} \quad (2.3)$$

El calor recibido por el sistema en el proceso de calentamiento puede ser calculado por:

$$q = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Donde.

q : calor que recibe el sistema; (kJ).

T_c : temperatura de calentamiento; (°C).

t_c : tiempo que dura el proceso a la temperatura de calentamiento; (s).

ρ_c : densidad del residual a la temperatura de calentamiento; (kg/m³).

C_p : calor específico del residual;(kJ/kg K)

V_c : volumen del residual a la temperatura de calentamiento;(m³).

Siendo:

$$c_p = \frac{1}{\rho} \cdot (1687 + 3.39 \cdot T) \quad (2.5)$$

En el intervalo desde 0 hasta 400 °C, para petróleo con

$$\rho = 0.72 \div 0.99 \quad (\text{Pérez, 1972}).$$

2.4- Análisis del punto de inflamación

Utilizando el método analítico del punto de Inflamación, con el empleo de la norma cubana NEIB01 – 12 – 21: 1982 y el equipo del punto de inflamación a copa abierta. Se procede encendiendo el equipo (Cleveland – semiautomático), la muestra es colocada en el porta muestra a través de una cápsula de platino que contiene una marca estándar para la cantidad de muestra a analizar, se enciende el equipo y juntamente con él una plancha de calentamiento durante 5 ó 10 minutos, se coloca un termómetro dentro de la muestra para ir midiendo desde la temperatura ambiente hasta que aparezca la primera señal de humo (gases) y con un chispero (encendedor) se comienza a flamear la muestra cada un minuto, para observar en que instante de temperatura se enciende el combustible, determinando así el punto de inflamación en el laboratorio de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

2.5- Viscosidad y tipos de fluidos

Considera dos platos paralelos de área A separadas una distancia (dy). El espacio entre los planos está lleno de un fluido. El plato inferior viaja con una velocidad v y el superior a una velocidad v (dv) (figura 2.2)

La fuerza por unidad de área (F/A) es conocida como esfuerzo cortante τ , dado que la velocidad v decrece con el incremento de y , el gradiente de velocidad es escrito con un signo negativo como (dv/dy) , también conocido como tasa de esfuerzo ($\dot{\gamma}$).

La ley de Newton de la viscosidad establece que el esfuerzo cortante τ es proporcional al gradiente de velocidad (dv/dy) . La constante de proporcionalidad es conocida como el coeficiente de viscosidad dinámica μ , según la ecuación.

$$\tau = -\mu \cdot \frac{dv}{dy} \quad (2.6)$$

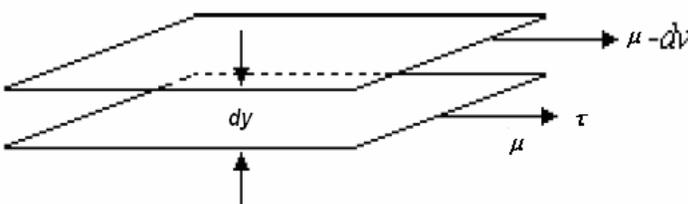


Figura 2.2: Corte entre dos planos de fluido

2.5.1- Curvas de flujo

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 representada en la figura 2.3, que 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.

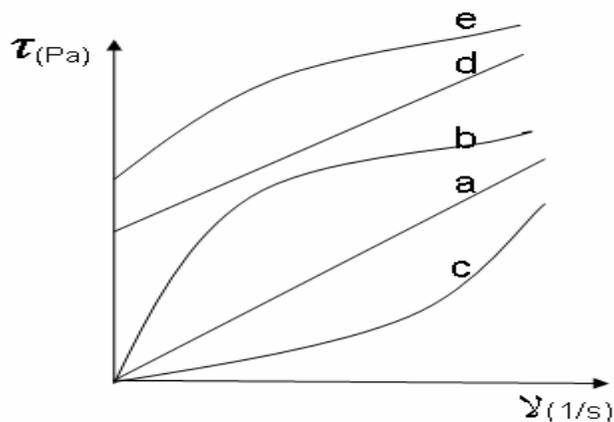


Figura 2.3. Muestra las curvas de flujo típico

Fuente: Garcell, 2001.

a) Newtonianos; b) Seudoplásticos; c) Dilatantes; d) Plástico ideal (Bingham); e) Plástico real.

2.6 - Modelos reológicos de fluidos

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

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

Los modelos más difundidos, (Garcell, 1988; Turro, 2002; Gardea (2008) 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 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 $\left(-\frac{dv_x}{dy}\right) = (\dot{\gamma})$. (figura 2.1-a).

$$\tau_{x,y} = \mu \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy}\right) \quad (2.7)$$

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

1- De viscosidad independiente del tiempo

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

$$\tau_{x,y} = K \cdot \left(-\frac{dv_x}{dy}\right)^n \quad (2.8)$$

Donde: n - índice de flujo, (adimensional). K - índice de consistencia másica, (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 los fluidos no newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente (μ_a). De acuerdo con la (ecuación 2.7) la viscosidad aparente viene dada por la relación:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.9)$$

Si en esta expresión se sustituye la ecuación (2.8) se obtiene:

$$\mu_a = K \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.10)$$

Según Khatib (2006), el comportamiento de la viscosidad en el caso de fluidos pseudoplástico puede ser descrito por el modelo de Sisko, el mismo viene dado por.

$$\mu_a = A + K' \cdot \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.11)$$

Ajustando este modelo a los datos experimentales, donde se obtienen los parámetros de modelo, A y K'.

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:

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{4 \cdot n} \right) \cdot \left(\frac{8 \cdot v}{D} \right) \quad (2.12)$$

- *Dilatantes*: sus viscosidades aumentan con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir apenas se les aplica un esfuerzo cortante ($\tau > 0$). También se describen por el modelo de Ostwald de Waele (para $n > 1$) (figura 2.1-c).
- *Plásticos ideales*: se les conoce también como plásticos Bingham, ya que siguen ese modelo. Sus viscosidades disminuyen con el incremento del gradiente de velocidad; comienzan a fluir cuando se les aplica un esfuerzo cortante mayor que un esfuerzo

cortante inicial (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 2.1-d).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + \mu_p \cdot \gamma \quad (2.13)$$

Donde: τ_0 - Esfuerzo cortante inicial o límite de fluencia. μ_p - Viscosidad plástica.

Para $\tau_0 = 0$ la ecuación 2.13, se transforma en la ley de Newton, siendo $\mu_p = \mu$. La viscosidad aparente para los plásticos de Bingham se obtiene, combinando la ecuación 2.13 con la 2.9.

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_0}{\gamma} \quad (2.14)$$

- *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 2.1-c).

$$\tau_{x,y} = \tau_0 + K \cdot \left(\gamma \right)^n \quad (2.15)$$

Los parámetros k , n y 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 2.15 se transforma en el modelo de Bingham, para $\tau_0 = 0$, en el modelo de Ostwald de Waele, y para $\tau_0 = 0$ y $n = 1$ se transforma en la ley de Newton.

Si se combinan las ecuaciones 2.15 y 2.9, se obtiene la expresión de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{\tau_0}{\gamma} + K \cdot \left(\gamma \right)^{n-1} \quad (2.16)$$

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 2.4-a).

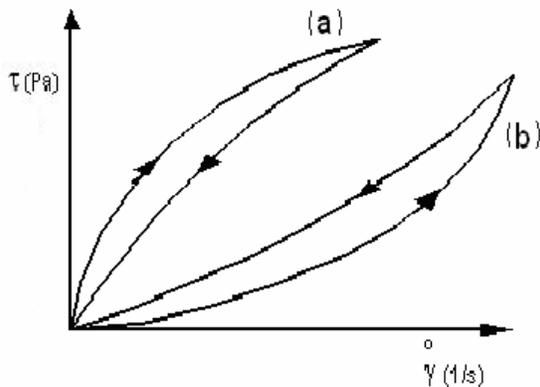


Figura 2.4. Curvas de flujo de materiales dependientes del tiempo:(a)-Tixotrópico; (b)-Reopéctico.

Fuente: Garcell, 2001.

- *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:

$$\mu(t) = \mu_0 - \int_{-\infty}^t M_T(t-t') \frac{df(D^2)}{dt'} dt' \quad (2.17)$$

Donde

$$M_T(t-t') = \int_0^{\infty} \frac{R(\Pi)}{\Pi} \exp\left[-\frac{(t-t')}{\Pi}\right] d\Pi \quad (2.18)$$

Siendo: Π - 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. $R(\Pi)$ -

función de distribución de tiempos de relajación. μ_0 - viscosidad inicial sin perturbaciones (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:

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = \mu \cdot D \quad (2.19)$$

Donde: τ - Esfuerzo cortante aplicado. λ - Tiempo de relajación. $\dot{\tau}$ - Gradiente de esfuerzos cortantes (μ/G). μ : Viscosidad aparente. D - Velocidad de deformación.

2.7- Determinación de las propiedades reológicas

El esquema detallado de la instalación aparece en la figura 2.5, donde (D^0) es un depósito hermético de acero inoxidable en el cual se introduce el residual petrolizado almacenado a la temperatura de fluidización, a través del embudo (E), que está comunicado con el depósito mediante la válvula (V3). La presión se transmite al depósito mediante la tubería (T_p), gracias a la válvula (V1), midiéndose dicha presión con un transductor de presión conectado al indicador digital (ID).

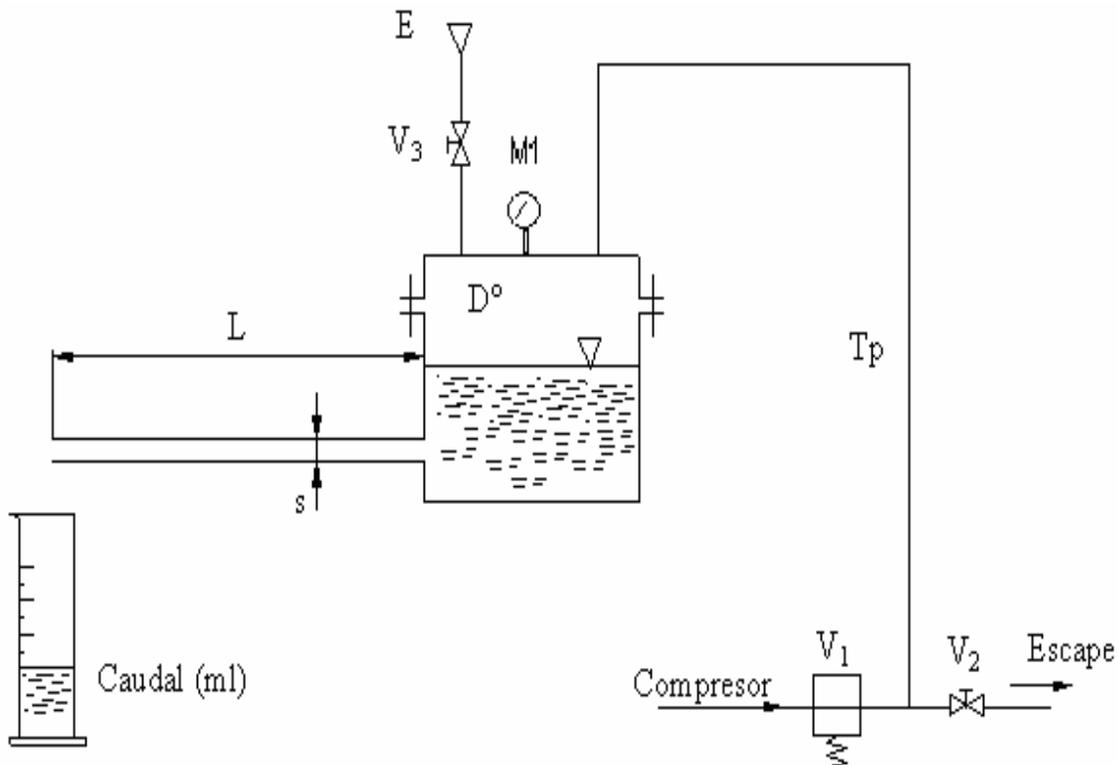


Figura 2.5. Esquema detallado de la instalación.

El manómetro (M1) mide la presión relativa entre 0 y 9 kgf/cm². La presión en el interior del depósito se regula mediante la válvula (V1), a base de aumentar o reducir el caudal de aire comprimido que desde el compresor del laboratorio llega a su entrada. Esta presión también se puede regular con la instalación de la válvula de escape (V2), variando su apertura manteniendo (V1) en una posición concreta.

Las lecturas de presión se tomarán del manómetro (M1). Conociendo el diámetro del tubo (D), su longitud (L), se puede determinar las propiedades reológica a partir de los parámetros establecidos, donde el caudal será igual a la ecuación 2.20.

$$Q = \frac{v}{s} \quad (2.20)$$

Donde:

Q: caudal del fluido; (m³/s)

V: velocidad media; (m/s)

S: área de la sección del tubo; (m²)

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.21)$$

Donde:

D: diámetro del tubo; (m²)

Conocida la velocidad se calcula el esfuerzo cortante por la ecuación 2.22.

Esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{D \cdot \Delta P}{4 \cdot L} \quad (2.22)$$

Donde:

τ : esfuerzo cortante del fluido; (Pa)

L: longitud del tubo; (m)

ΔP : diferencia de presión; (N/m²)

Finalmente se determina el gradiente de velocidad por la ecuación 2.23.

Gradiente de velocidad:

$$\gamma = \frac{8 \cdot v}{D} \quad (2.23)$$

Donde:

γ : gradiente de velocidad; (s⁻¹).

Siendo la diferencia de presión (ΔP) entre la entrada y la salida del dispositivo (medida en atmósfera), a partir de estos parámetros se puede determinar a diferentes

temperaturas la viscosidad ó densidad del residual. Si la masa (m) de un fluido contenido en la unidad de volumen (V) del mismo se denomina densidad (ρ). Y se determina por la expresión 2.24.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.24)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido; (kg/m³)

m: masa del fluido; (kg)

V: volumen del fluido; (m³)

Mientras que la viscosidad aparente (μ_a) se determina por la ecuación 2.25.

$$\mu_a = \tau / \gamma \quad (2.25)$$

Donde.

τ : esfuerzo cortante de rozamiento interior; (Pa).

γ : gradiente de velocidad; (s⁻¹)

2.8- Diseño de experimentos

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

$$N = 3^K \quad (2.26)$$

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.

2.9- Conclusiones del capítulo 2

- Quedaron establecidos los modelos que permiten el estudio reológico del residual petrolizado investigado. Los mismos deben ser ajustados a partir del empleo de datos experimentales.
- Los métodos y técnicas propuestas permiten la determinación de las propiedades físicas y reológicas que influyen en la extracción y transporte del residual petrolizado objeto de estudio.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL ESTUDIO DEL RESIDUAL PETROLIZADO

3.1- Introducción

En este capítulo se exponen los resultados derivados del estudio experimental y a partir de los mismos, las expresiones matemáticas que describan las regularidades del comportamiento reológico del residual petrolizado. También se relacionan los resultados asociados al calentamiento del sistema y los impactos económicos y ambientales.

El objetivo del capítulo es: analizar los resultados obtenidos en el estudio experimental desarrollado

3.2- Resultados experimentales

El volumen total de residual depositado almacenado en el fondo del tanque No. 5 en la base de petróleo de la empresa Puerto de Moa, se calcula usando la ecuación 2.1.

$$V = 48.6m^3$$

3.2.1- Determinación de las propiedades físicas del residual petrolizado

Para los resultados analíticos de las propiedades físicas del residual de combustible es necesario determinar el contenido de cenizas, punto de inflamación, porcentaje de asfaltenos y otros. Los cuales necesitan de un equipamiento en específico y el uso de las normas que rigen estos procedimientos.

Resultados analítico del punto de inflamación

La determinación del punto de inflamación en el residual de petróleo indica la temperatura de inflamación del combustible y permite conocer los rangos de temperaturas durante el proceso de calentamiento, extracción y almacenamiento, evitando cualquier negligencia que produzca un incendio. Los valores obtenidos se muestran a continuación en la figura 3.1, donde se pudo demostrar que la muestra M-1 con el menor valor de (110°C), representa el punto de inflamación más bajo y que se deberá tener en cuenta, a la hora de calentar o transportar el residual.

En general la variación entre las muestras M-1 y M-3 fue de 6 °C y la media fue aproximadamente igual a 114 °C. Estos comportamientos indican que el proceso de calentamiento y fluidización para la extracción y transporte del residual petrolizado debe desarrollarse a temperaturas inferiores a los 110 °C.

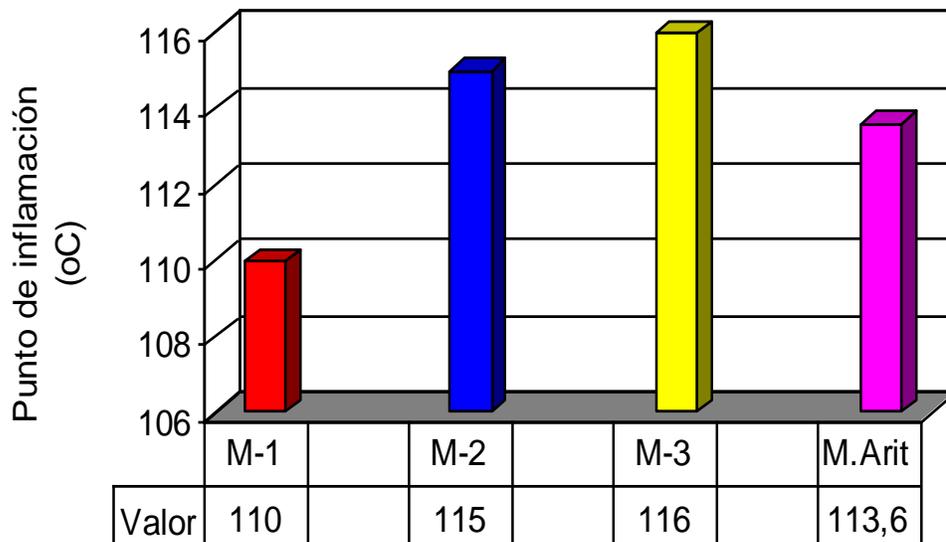


Figura 3.1. Comportamiento del punto de inflamación para las muestras de residual petrolizado

3.2.2- Resultados experimentales de las propiedades reológicas

Los resultados del análisis reológico del residual de petróleo almacenado se determinaron mediante un reómetro tubular, se tuvieron en cuenta algunos factores

como viscosidad del residual y temperatura, se comprueba su efecto sobre el comportamiento de las curvas de flujo, las cuales fueron obtenidas graficando los valores de esfuerzo cortante en función de la velocidad de deformación, estas curvas permitirán clasificar reológicamente el residual petrolizado y obtener los modelos reológicos que lo caracterizan.

Resultado del efecto de la temperatura

En la tabla 3.1 se relacionan los valores de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad obtenidos en cada una de las pruebas realizadas al residual petrolizado para los diferentes valores de temperatura analizados (50, 60 y 70 °C) que a su vez permitieron determinar los valores de viscosidad aparente.

Tabla 3.1. Resultados de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad

	<i>Temperaturas (°C)</i>		
	<i>T= 70°C</i>	<i>T= 60°C</i>	<i>T= 50°C</i>
<i>γ (s-1)</i>	<i>τ (Pa)</i>	<i>τ (Pa)</i>	<i>τ (Pa)</i>
67,40	315,54	386,15	450,88
79,97	323,63	392,03	456,03
100,38	328,78	399,39	462,65
120,95	335,40	406,01	469,26
152,20	342,75	412,63	475,88
205,13	350,85	420,72	483,98
224,67	358,20	427,34	487,65
277,53	364,82	435,43	493,54
337,01	372,91	442,05	500,16
428,92	384,68	462,65	508,25

A partir de los resultados de las propiedades reológicas del residual petrolizado almacenado, se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante (τ) en función de la velocidad de deformación (γ), a diferentes temperaturas, observándose un aumento

proporcional en los valores de gradiente de velocidad, a medida que se incrementan los valores de esfuerzo cortante.

Las pseudocurvas de flujo obtenidas para el residual petrolizado almacenado se representan en la figura 3.2. En cada caso se define el comportamiento del residual teniendo en cuenta las curvas características de los modelos reológicos establecidos en la literatura (Garcell, 2001 y Skelland, 1970).

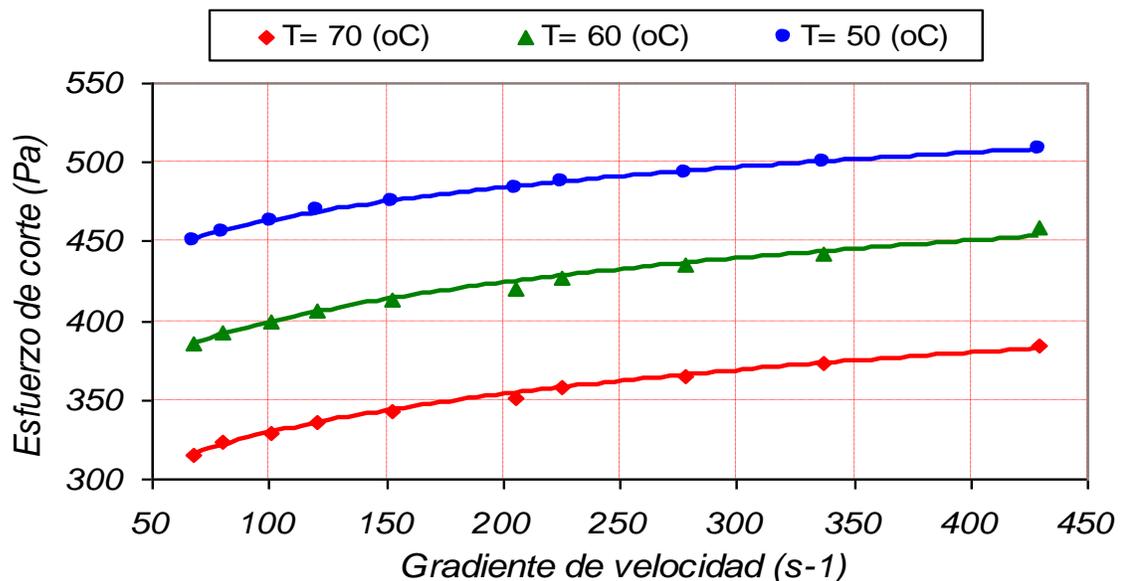


Figura 3.2. Comportamiento del esfuerzo cortante respecto al gradiente de velocidad en el residual petrolizado.

Las pseudocurvas obtenidas han sido ajustadas mediante el método de mínimos cuadrados usando el software Microsoft Excel, como se puede observar en la tabla 3.2. Las ecuaciones obtenidas para el mejor ajuste de este residual petrolizado a las diferentes temperaturas (50, 60 y 70 °C), sugiere un comportamiento de pseudoplásticos cuya curva está descrita por el modelo reológico de Ostwald de Waele. Realizando en todos los casos un análisis de regresión de curva con índices por encima del 99%, lo que puede considerarse como satisfactorio e indicativo de que el modelo explica la variabilidad del esfuerzo de corte respecto al gradiente de velocidad, pudiendo obtenerse las expresiones matemáticas que describen cada uno de estos

comportamientos, las mismas se relacionan en la tabla 3.2.

Los modelos ajustados de la ecuación 2.8 referenciado en el capítulo precedente con los correspondientes valores de n y K para cada temperatura se exponen en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Correlaciones de esfuerzo de corte y gradiente de velocidad.

Temperatura (°C)	Modelo matemático obtenido por regresión	Modelo reológico	Índice de Regresión (R ²)
50	$\tau_{xy} = 132,32 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,2918}$	$\tau_{xy} = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$	0,9994
60	$\tau_{xy} = 123,37 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,2453}$	$\tau_{xy} = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$	0,9906
70	$\tau_{xy} = 58,65 \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^{0,3102}$	$\tau_{xy} = K \cdot \left(\frac{dv}{dy}\right)^n$	0,9949

Tabla 3.3. Parámetros reológicos del residual de petróleo almacenado.

Parámetros Reológicos	Rango de Temperatura (°C)		
	50 (°C)	60 (°C)	70 (°C)
Índice de Consistencia (k); Pa.s	132,32	123,37	58,65
Índice de flujo (n); (adimensional)	0,2918	0,2453	0,3102
Índice de Regresión (R ²)	0,9994	0,9906	0,9949

Los valores representados en la tabla 3.3, evidencian que a mayores valores de temperatura los valores de índice de consistencia másica disminuyen, permaneciendo casi constantes los índices de flujo, con un valor promedio de 0,284.

Considerando los diferentes valores de temperatura se graficó el comportamiento de la viscosidad aparente, según la figura 3.3.

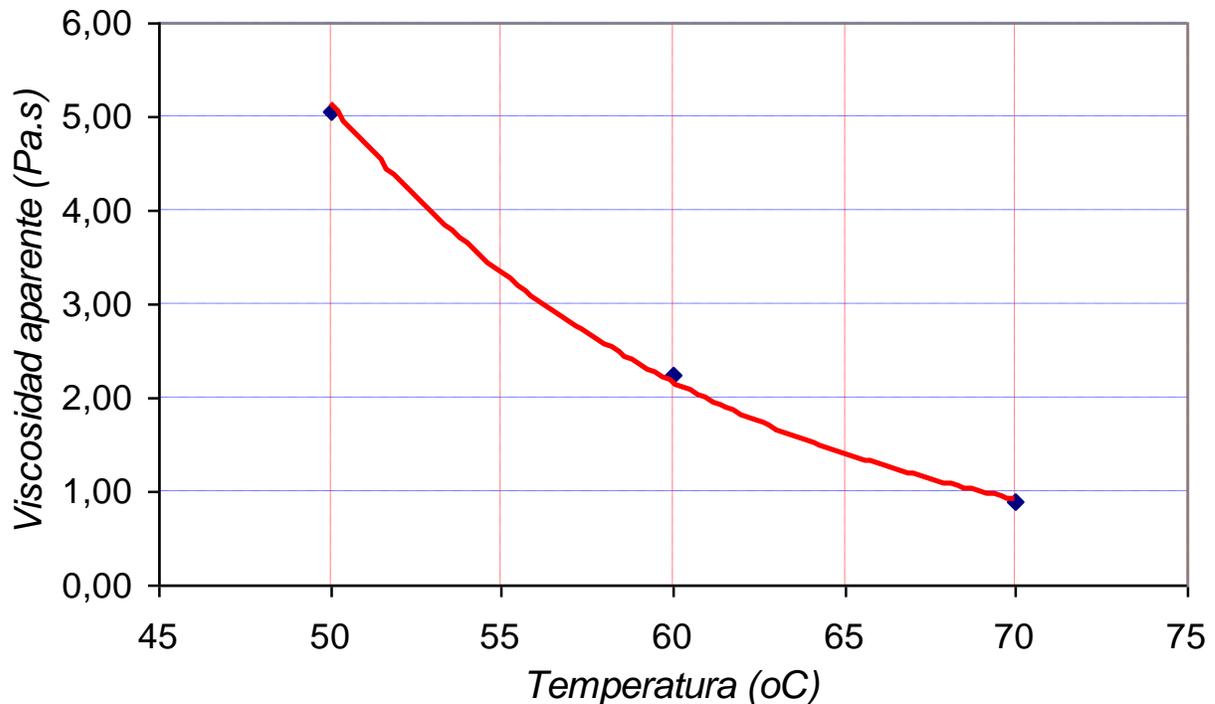


Figura 3.3. Comportamiento de la viscosidad aparente del residual para las temperaturas analizadas.

Se un decrecimiento de los valores de viscosidad aparente, al incrementarse la temperatura desde 50 hasta 70 °C, permitiendo obtener la correlación entre viscosidad aparente y temperatura, este resultado está relacionado con la composición físico-química caracterizadas por el contenido de asfalteno, donde estas moléculas determinan mayormente, la aparición de propiedades pseudoplásticas en los residuales de petróleo, que son características para los petróleos.

Al obtener los valores de tendencia de los puntos observados y realizar el ajuste a la ley exponencial, se obtuvo una probabilidad de 0,99 lo que indica el grado de aproximación de los datos experimentales al modelo expresado mediante la ecuación 3.1, este resultado está derivado al considerar la viscosidad aparente en función de la temperatura.

$$\mu_a = 350,08 \cdot e^{0,085 \cdot T} \quad (3.1)$$

Esta función obtenida por ajuste de regresión simula el comportamiento de la viscosidad aparente del fluido al variar la temperatura, con la limitante de que es válida sólo en el rango de temperaturas de 50 a 70°C. La ecuación obtenida para las condiciones experimentales del presente trabajo, sólo son válidas para el residual de petróleo almacenado con propiedades físicas, químicas y reológicas determinadas a temperaturas en el rango de 50 a 70°C.

De acuerdo con los reogramas, el residual de petróleo almacenado tiene un comportamiento pseudoplástico, estos resultados permiten definir la energía necesaria para el transporte y extracción de este tipo de sustancia, lo que permitirá la correcta selección y evaluación de los sistemas de bombeo.

Esta ecuación es resultado de este trabajo en las condiciones reales de los residuales petrolizados en la empresa Puerto Moa, solo es valida para las condiciones en que se desarrolló la experimentación.

3.3. Determinación del calor suministrado al sistema

Se determinó el calor necesario para el proceso de fluidización de acuerdo con los valores de temperatura considerados en el trabajo. Los resultados se exponen en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Calor absorbido por el sistema con la variación de la temperatura.

Temperaturas (°C)	Calor absorbido (kJ)
50	8159,6
60	9549,6
70	10918,2

Estos resultados demuestran que a la temperatura de 70°C, el sistema absorbe la mayor cantidad de calor (10918,2 kJ). Los valores mostrados en la tabla 3.4 se ilustran en la figura 3.4.

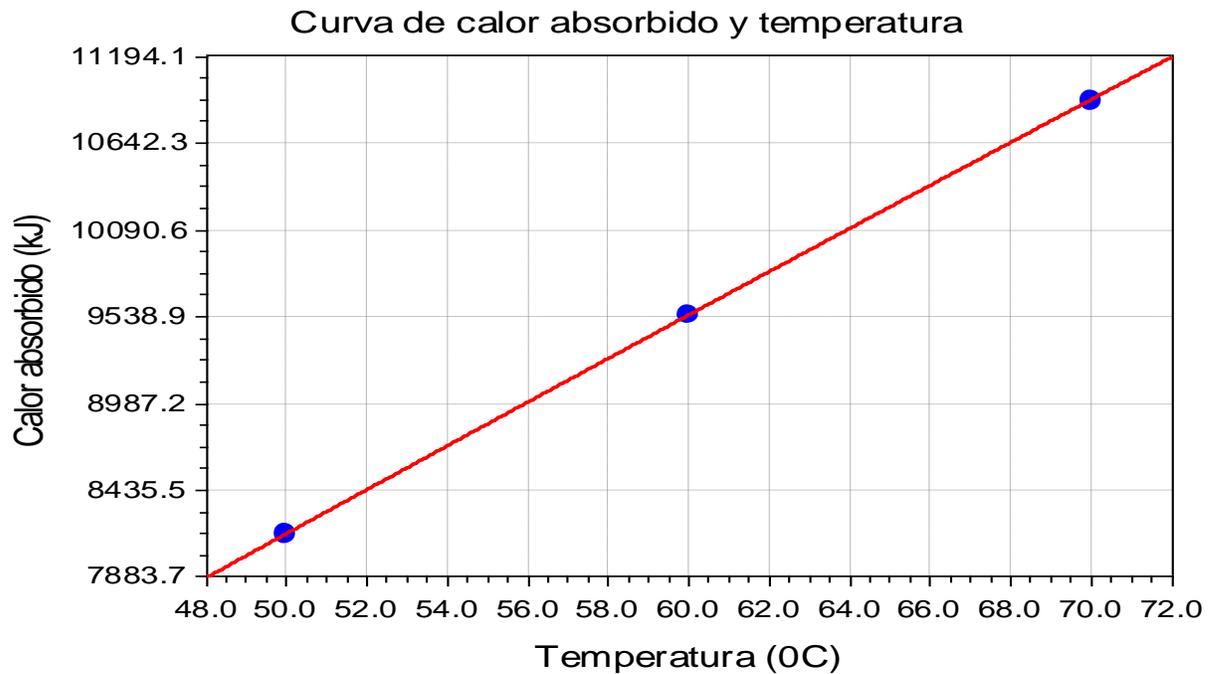


Figura 3.4. Comportamiento del calor absorbido por el sistema.

En la figura 3.4 se observa un incremento del calor absorbido por el sistema en la medida que aumenta la temperatura, el comportamiento es lineal porque se consideraron constantes los restantes parámetros que determinan el calor absorbido. De los resultados anteriores se infiere la importancia que tiene el control del calor administrado al sistema porque bajo determinadas condiciones puede generar temperaturas iguales ó superiores a la de inflamación lo que traería consigo un incendio de la instalación, con los consiguientes problemas económicos y ambientales asociados.

3.4- Valoración económica

Para la estimación de los costos, como se observa en la tabla 3.5, no se ha empleado ninguna metodología de cálculo existente, el gasto se calcula en función de los 48,6 m³ de residual petrolizado considerando la siguiente relaciones:

$$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ litro}$$

$$1 \text{ Barril} = 158,98 \text{ litros.}$$

Por tanto 48,6 m³ representan 48 600 litros y 305, 698 barriles equivalentes de petróleo. El precio considerado para el cálculo es 65 USD/barril. Los resultados para las condiciones analizadas en la investigación (tres años de explotación) se relacionan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Gasto económico asociado a la pérdida de residual petrolizado.

Volumen de Residual (m ³)	Cantidad de combustible asociado (barriles)	Precio del barril (USD)	Gasto asociado (USD)
48,6	305, 698	65	19 870,37
Para los 6 tanques utilizados			119 222.22

Como se aprecia en la tabla anterior el gasto económico asciende a 19 870,37 USD, el mismo está referido al tanque No. 5. Teniendo en cuenta que en la base de combustible se emplean 5 tanques más, entonces el gasto para los 6 tanques en conjunto es 119 222,22 USD. De los resultados anteriores se deduce la importancia que tiene la evacuación de los residuales que se forman en los tanques de almacenamiento de combustible.

3.5- Impacto ambiental

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.

3.5.1- Generalidades medioambientales del petróleo y sus residuales

Los residuales del petróleo, los clasifican como un residuo peligroso, con las correspondientes dificultades en el método de su disposición y tratamiento, generalmente costosos, sin embargo, mediante apropiados sistemas tecnológicos, pueden ser convertidos en materiales de valor energético o pueden ser dispuestos de manera conveniente (Jonson et al., 1993).

El análisis de las investigaciones realizadas por diferentes autores muestran que las mismas están dedicadas fundamentalmente a:

1. Estudio de las propiedades físicas y químicas de los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos con el fin de aplicar surfantes y establecer el enlace de las características integrales.
2. Estudio de las propiedades reológicas de los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos. Sobre esta base se construye el modelo físico y se deduce la ecuación de equilibrio dinámico y la obtención de la dependencia de cálculo a partir de la utilización de datos experimentales.
3. Estudio del efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos, peculiaridades de los regímenes de flujo en movimiento en sistemas termodinámicos.

De lo explicado anteriormente se observa, que la solución teórica de los principales problemas existentes en los diferentes tipos de residuales ó líquidos altamente viscosos es posible obtenerla a partir de una caracterización generalizada, que permita conocer el líquido a tratar y determinar las propiedades fluidodinámicas, según correspondan con los métodos de limpieza y extracción de los mismos. Por ello, los aspectos anteriormente mencionados encuentran su aplicación práctica y han obtenidos desarrollo en trabajos realizados por la mayoría de los investigadores.

3.5.2- Peligros que producen los residuales petrolizados al medio ambiente

Riesgos para el medio ambiente: es un producto nocivo para el medio ambiente, se debe evitar su vertido en agua o tierra.

Derrames: evitar la extensión de la fuga. Bombear, si es posible a un tanque de recogida. Mezclar con restos de arena, tierra, aserrín y pasar a contenedor cerrado (Utilizar equipo protector).

3.5.3- Efectos humanos

Inhalación: la mezcla de vapores sólo se produce cuando el residual de petróleo 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 residual. 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.

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

Contacto con la piel: altas temperaturas pueden producirse quemaduras en caso que no se tomen precauciones y la higiene personal es pobre, existe la posibilidad de irritación en los ojos y la piel, además se puede producir una dermatitis después de un contacto directo prolongado con la piel.

3.6- Conclusiones del capítulo 3

- Las curvas de flujo obtenidas mediante el análisis reológico, demuestran que a las temperaturas de 50, 60 y 70 °C, el residual petrolizado almacenado, se comporta como un pseudoplástico, para un ajuste de curva con un índice de regresión superior a 0,99.
- Se obtuvo el modelo siguiente: $\mu_a = 350,08 \cdot e^{0,085 \cdot T}$. El mismo relaciona la viscosidad aparente con la temperatura, para el intervalo de 50 a 70 °C.
- La formación de 48,6 m³ de residual petrolizado genera un gasto económico igual a 119 222,22 USD para los seis tanques analizados en tres años considerados.

CONCLUSIONES GENERALES

- Se comprobó, a través del marco teórico, la existencia de múltiples investigaciones destinadas al estudio de los fluidos Newtonianos y no Newtonianos, de ellos solo algunos consideran el análisis de los residuales de petróleo y ninguno tiene como objeto de estudio el residual investigado en el presente trabajo.
- El modelo reológico teórico que caracteriza al residual petrolizado analizado es el que se corresponde con un fluido pseudoplástico. El mismo está representado a través de la ecuación 2.8 propuesta por Ostwald de Waele.
- El estudio experimental permitió ajustar el modelo reológico que caracteriza el residual petrolizado para el intervalo de temperatura comprendido entre 50 y 70 °C. En todos los casos el coeficiente de correlación fue superior al 99,06%.
- Se comprobó que la formación de 48,6 m³ de residual petrolizado genera la pérdida de 1834,188 barriles de petróleo, lo que implica un gasto económico que asciende a 119 222.22 USD para los seis tanques considerados.
- El residual petrolizado afecta al medio ambiente y la salud humana, siendo las enfermedades más frecuentes la irritación de los ojos, nerviosismo, náuseas, cefalea e insomnio. Las mismas pueden mitigarse mediante el uso de un sistema calentamiento que facilite su extracción y transporte.



RECOMENDACIONES

- Utilizar los resultados obtenidos para la proyección de un sistema de calentamiento que facilite la extracción y el transporte del residual petrolizado mediante el uso de bombas.
- Realizar nuevos estudios que consideren la caracterización del residual petrolizado para otras condiciones de trabajo no abordadas en la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Armando, Díaz y José A Falcón. Estudio reológico de emulsiones del petróleo crudo cubano en agua. Revista Tecnológica Química. Vol. XXIV, No 1 y 2. Santiago de Cuba. Cuba 2004.
2. Acosta, I; Infante, C; López, W: "Efecto de lodos petrolizados y lodos de tratamiento de aguas servidas sobre un suelo calciorthids de la península de Paraguaya". Agronomía Trop. 45(4): 527-537, 1995.
3. Al-Nimr M.A., Daqqaq y M.A: Hader, Effect of Working Fluids on the Performance of a Novel Summer Air Conditioning System, Int. Comm. Heat and Mas Transfer, 28 (4), 565-573, 2001.
4. Álvarez, J. "Aplicación de la Biorremediación para tratar los residuales sólidos petrolizados de fondos de tanques de la Refinería Níco López." P 2507, E03. CUPET. C. Habana, Cuba, 2004.
5. Bandala, M: Pérdidas por Fricción en Fluidos No Newtonianos. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas, Puebla, México, 2001.
6. Bustabad, O. M; Echeverría: Flujos de fluidos y separaciones mecánicas. Departamento de ediciones del ISPJAE, Ciudad de la habana, 1984
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. Darby, R: Laminar and turbulent pipe flows of non newtonian fluids, in flow dynamics and transport phenomena, 2000.
9. 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
10. Franco et al: Process for the thermo-chemical cleaning of storage tank. United Stated Patent. 5, 580, 39, 1996.
11. Garcell, L: Efectos que influyen en la disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura. Ediciones Pueblo y Educación, 1993.

12. Garcell, L: Flujo por tuberías de suspensiones minerales no newtonianas. Apuntes para una monografía, pág. 1 – 40, 2001.
13. Garcell, L; Díaz, A; Surís, G: Transferencia de la cantidad de movimiento, calor y masa, Ediciones Pueblo y Educación, 1988.
14. Guzmán y Andrade: Estudió del efecto de las temperaturas en la viscosidad de los líquidos, 1979.
15. Hernández, F, E: Estudio del comportamiento de los residuales de la dársena del puerto de Moa, Tesis de grado, 2006.
16. Johnson et al: Process for recovery of tank bottom wastes. United States Patent. 5, 259,945, 1993.
17. Kukor, J, J y col: Remediation of contaminates including low bioavailability hydrocarbons. United States Patent 20020034421, 2002.
18. Kupriczka R., A: Rotkegel and H. Walczyk, On the airside Heat Transfer Performance of Finned Tube Bundles, Proceedings of the International Symposium on Compact heat Exchangers, Grenoble, August 24, 2002.
19. Maturano, S. Y Zapana, L: Efecto electroreológico en crudos argentinos, Congreso Producción, 2000.
20. Mechetti, M, y Zapana, L: Estudios electrorreológicos de fluidos basados en dispersiones de asfáltenos, Congreso Producción, 2000.
21. Mechetti, M, y Zapana: 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.
22. Morejón, Y: "Tratamiento a escala de laboratorio de residuos sólidos petrolizados", Trabajo de Diploma, ISPJAE, Cuba, 2004.
23. Mulero A: Suero M.A: Vielba A, Cuadros F. El Sistema Internacional de Unidades, Revista Española de Física, Vol. 16, nº 5, págs. 41-45, 2002.
24. Perona, P: An Experimental Investigation of Laminar-Turbulent Transition in Complex Fluids. Journal of Food Engineering: 60, 137-145, 2003.
25. Placencia, A. P: "Formulación de emulsiones petróleo pesado en agua", Unidad de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Petroecuador/ESPE, 2002.