

EFECTO DE LA RELACIÓN PETRÓLEO AGUA EMULGENTE EN EL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO Y EN LA ESTABILIDAD DE LAS EMULSIONES ACUOSAS DIRECTAS DEL PETRÓLEO CRUDO CUBANO UTILIZANDO EL EMULGENTE P

Héctor Rodríguez Tarragó*, Melek Campos Sofía**, José Falcón Hernández*, Carlos Hernández Pedrera*, Yordanis Poll Salazar*

*Facultad de ingeniería Química, **Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, Universidad de Oriente

El presente trabajo consiste en determinar condiciones de estabilidad adecuada en las emulsiones acuosas directas (O/W) del petróleo crudo cubano con el emulgente P (obtenido a partir del Bio-Óleo) para facilitar su utilización en el manejo y transporte del mismo, en el cual se utilizó un crudo newtoniano de alta viscosidad (13,627 Pa.s a $30 \pm 2^\circ\text{C}$). El estudio se realizó teniendo en cuenta que el por ciento en peso de Petróleo/(Agua+Emulgente) es de un 60 - 70 % de crudo, un 24 - 36 % de agua y entre un 4 - 6 % de Emulgente. La masa total de cada emulsión preparada fue de 150 g. Con ayuda del programa STATISTICA 7 se realizó un diseño experimental para determinar el efecto de la relación Petróleo/(Agua + Emulgente) sobre el comportamiento reológico y la estabilidad de las emulsiones .

Palabras clave: emulsiones directas, transporte de crudos pesados, viscosidad.

The present work is to determine appropriate conditions for stability in direct water emulsions (O/W) Cuban crude oil with emulsifier P, (obtained from Bio-Oil) to facilitate its use in transport and handling thereof in which we used a highly viscous Newtonian oil (13 627 Pa.s a $30 \pm 2^\circ\text{C}$). The study was conducted taking into account that the percent by weight of oil / (water + emulsifier) is 60 - 70 % of crude oil, 24 - 36 % water and between 4-6% of emulsifier. The total mass of each prepared emulsion was 150 g.

With the help of STATISTICA 7 experimental design was conducted to determine the effect of the relationship Oil / (water + emulsifier) on the rheological behavior and stability of emulsions.

Key words: emulsions direct, transport heavy crude, viscosity.

Introducción

El petróleo crudo es un producto de gran demanda en el mercado mundial, por los diferentes usos que al mismo se le da y principalmente por ser una de las fuentes de energía más importante de la actualidad. Este es además la base del desarrollo económico de la mayoría de los países del mundo.

Cuba cuenta con algunas reservas de este importante mineral líquido combustible que entre otros aspectos, se caracteriza por su alta viscosidad, alto porcentaje de azufre y elevado contenido de asfáltenos.

La viscosidad es uno de los factores que influye notablemente en el transporte de este crudo por tuberías, por lo que se hace necesario

utilizar métodos alternativos que reduzcan la viscosidad. Entre estos métodos se encuentran el calentamiento del mismo hasta una temperatura adecuada, el mezclado con fracciones más ligeras, utilizando el flujo de doble núcleo (Core Flow) ó utilizando emulsiones directas donde la viscosidad puede ser reducida considerablemente /2/.

Es precisamente sobre el estudio de este último método donde se centra la atención de este trabajo, ya que existe muy poca información disponible sobre la formación de emulsiones directas y menos si estas son obtenidas con un emulgente de producción nacional (Emulgente P). Además debe tenerse en cuenta que los productos a transportar presentan características reológicas tan complejas que no resulta fácil elaborar métodos de selección o diseño para el transporte de crudo mediante esta vía.

Algunos de los factores a considerar en el transporte de petróleo crudo emulsionado lo constituye el conocimiento sobre la relación petróleo/ (agua+Emulgente) adecuada, incluyendo en ello el tipo de emulsión (O/W, W/O o mixta) y su estabilidad.

Materiales y métodos experimentales

El ensayo experimental se desarrolló en el laboratorio de Emulsiones del Centro Nacional de Electromagnetismo aplicado (CNEA), Santiago de Cuba. En dichos ensayos experimentales fue utilizado un petróleo crudo cubano, cuyas características principales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1
Características del petróleo cubano utilizado en los ensayos

°API	60/60	11,40
Viscosidad	(cP) 50 °C	1061
Viscosidad	(cP) 60 °C	612
Contenido de azufre	(% en peso)	6,62
Contenido de asfaltenos	(% en peso)	17,37

Como agente emulsionante fue utilizada una formulación del Emulgente P[3], preparada con productos de la pirólisis de paja de caña obtenida en la planta de pirólisis rápida PPR-200 de la Empresa Bioware Tecnología de Campinas, Brasil y NaOH. El pH del emulgente utilizado fue de 8,28.

En los ensayos se utilizaron los siguientes equipos:

- Viscosímetro HAAKE VT550 con sensor MV 2
- Agitador Mechanick Prufgerate Medinger: propela de diámetro 4,5 cm, motor de velocidad regulable hasta 3 400 r.p.m.
- Microscópio óptico Novel. Sony. China.
- pHmetro marca GLP 22.
- Balanza Mecánica

Las mezclas ensayadas de petróleo crudo cubano se prepararon siempre variando la concentración de este entre un 60 y 70 %, la concentración de agua entre un 24 y un 36 % y la concentración de emulgente entre un 4 y un 6 %, de manera que la suma de los tres componentes sea el 100 % /7/.

Tal y como se refiere en /5,6,7/ las emulsiones fueron preparadas en el laboratorio dándole seguimiento al comportamiento de su estabilidad durante los días posteriores.

Una vez adicionado estos tres componentes se incrementa el número de revoluciones del agitador hasta la velocidad deseada (1400 rpm), por un tiempo de 15 minutos, para lograr una mayor dispersión de las gotas de petróleo en agua (emulsiones directas).

A las emulsiones obtenidas se le determinó la viscosidad en las diferentes posiciones de velocidad de (1-10) del viscosímetro rotacional HAAKE VT550, figura 1, tomando los valores en orden ascendente.





Fig. 1 Viscosímetro Rotacional HAAKE VT550.

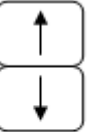
Método para determinar la viscosidad con el viscosímetro HAAKE VT550


Este equipo tiene principales funciones como el cálculo de la viscosidad dinámica de una sustancia (líquida y de baja viscosidad) con el esfuerzo y la velocidad aplicados para provocar el giro

de un rotor o sensor de determinada forma geométrica sumergido en el seno de la sustancia cuya viscosidad se quiere medir. A continuación se puede observar una vista ampliada del display y la función de cada una de las teclas y campos luminosos del mismo.


 Selecciona lo mostrado en el display del panel, lo seleccionado se observa en los indicadores con letras luminosas. Apresando sucesivamente esta tecla va cambiando lo indicado en el display.

 Corrige el punto de cero de valor de esfuerzo cortante.

 Permiten variar los diferentes parámetros (el sistema del sensor, el programa de velocidad y el número del procedimiento).

 Varias funciones de las cuales:
"P", modo manual (P0).
"S=4", n° del sensor MV2.
"d", el programa de velocidad (1-10).

Para la selección de los valores anteriores utilizar las flechas.

 Permite encender y apagar el motor del viscosímetro.

El sensor utilizado es el MV2 que corresponde al número 4 y cuenta con un procedimiento interno que contempla los factores de corrección necesarios para determinar los valores de esfuerzo cortante y de velocidad de deformación a partir de los cuales se determinarán los valores de viscosidad.

En el montaje del viscosímetro hay que "atornillar" el rotor seleccionado al eje del mismo. Hay que tener especial cuidado con la limpieza del sensor ya que de tocarle con las manos, se dejaría en él suciedad, sudor, que alterarían el resultado obtenido, debido a que no se mediría el esfuerzo para girar el sensor en el seno de la sustancia sino que la suciedad haría de capa intermedia entre el sensor y la sustancia.

La muestra que se introduce en el interior de la copa debe ser representativa de lo que se quiere

analizar y tener un tamaño suficiente para cubrir totalmente el sensor, y no ser excesiva que se derrame con el giro del rotor, preferentemente por la segunda raya interna del vaso del viscosímetro.

Finalmente hay que programar el modo de funcionamiento deseado para el viscosímetro, que en la presente investigación se corresponde con el modo de operación manual y el procedimiento para medir la viscosidad, siendo los pasos:

- Seleccionar con el teclado el número del sensor ("Prog" hasta que aparece una "S" y con las flechas se selecciona el 4, que corresponde al sensor MV2).
- Seleccionar el modo manual ("Prog" hasta que aparezca una "P" y con las flechas se cambian los parámetros hasta el valor "0").
- Seleccionar el programa de velocidades, la columna ("Prog" hasta que aparece una "d").
- Seleccionar la velocidad del programa de velocidades, la fila dentro de la columna (con una flecha, y aparece en el display cada valor de velocidad).
- Poner en funcionamiento el motor con la tecla *Start/Stop*, los valores se han de tomar manualmente del **display**. Apresando la tecla "D" se selecciona el valor de lo que se quiere medir, observándose en los indicadores; si parpadea el indicador Ej. "Pa", es que la medida está fuera de rango. El viscosímetro se detiene con la tecla *Start/Stop*.

Para garantizar una correcta lectura de los valores de viscosidad fue necesario comprobar la calibración del equipo, para ello se utilizó un aceite de refrigeración A-100 de viscosidad conocida y los resultados obtenidos fueron satisfactorios, no siendo necesaria la variación de las constantes brindadas por el fabricante para el sensor 4, MV2.

Método para la observación microscópica de la emulsión

En la observación microscópica se utilizó un microscopio óptico Novel, Chino, según el siguiente procedimiento. /7/

- Se colocó el microscopio sobre una mesa sólida y de color oscuro para evitar la luz reflejada en su superficie.

- Se colocaron los oculares a la abertura adecuada según la distancia entre los ojos del observador.
- Se coloca la muestra a observar en el portaobjeto y este sobre la platina procurando que el objetivo que se va a examinar quede inmediatamente debajo del objetivo.
- Al efectuar el enfoque, la preparación deberá mirarse por fuera al acercar el tubo al portaobjeto, procurando que la preparación no toque la lente frontal del objetivo. Luego mirando en el ocular se levanta nuevamente el tubo mediante el tornillo macrométrico hasta que aparezca la imagen. Entonces se afina el enfoque mediante el tornillo micrométrico (en caso de que las gotas de petróleo se encuentren dispersas en agua se puede afirmar que la emulsión es directa, si es el agua dispersa en el petróleo, la emulsión es inversa y si el agua está dispersa en el petróleo y el petróleo en el agua se puede afirmar que la emulsión es mixta).

Resultados y análisis

Determinación de la viscosidad del petróleo crudo utilizado

Al petróleo crudo cubano utilizado se le determinó la viscosidad a $30 \pm 2^\circ\text{C}$, que serán los valores de

temperatura a la que se realizarán la medición de esta a cada emulsión formulada en los pasos posteriores. El conocer la viscosidad del crudo cubano es de gran importancia para analizar la influencia del emulgente utilizado en la formulación de la emulsión y como uno de los métodos para reconocer el tipo de emulsión obtenida, pues en el caso de las emulsiones directas se debe alcanzar un valor de viscosidad muy inferior al del crudo, debido a que en la emulsión directa el petróleo es la fase interna y el agua es la fase externa.

Con este propósito se utilizó con viscosímetro rotacional HAAKE VT550 y siguiendo la técnica experimental descrita anteriormente se obtuvieron los valores de esfuerzo cortante (τ (Pa)) para cada valor del gradiente de velocidad (γ (s^{-1})). Debido a la alta viscosidad del petróleo crudo cubano sólo fue posible determinar tres puntos, que en este caso es suficiente debido a que el mismo tiene un comportamiento reológico newtoniano según trabajos precedentes /6,7/. En la figura 2 se muestra el gráfico de esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad (γ (s^{-1})) en el que se puede apreciar una línea recta con intercepto en cero (comportamiento newtoniano), lo que corrobora los resultados obtenidos en trabajos anteriores /6, 7/. La pendiente de la ecuación es la viscosidad y su valor es de 13,627 Pa.s.

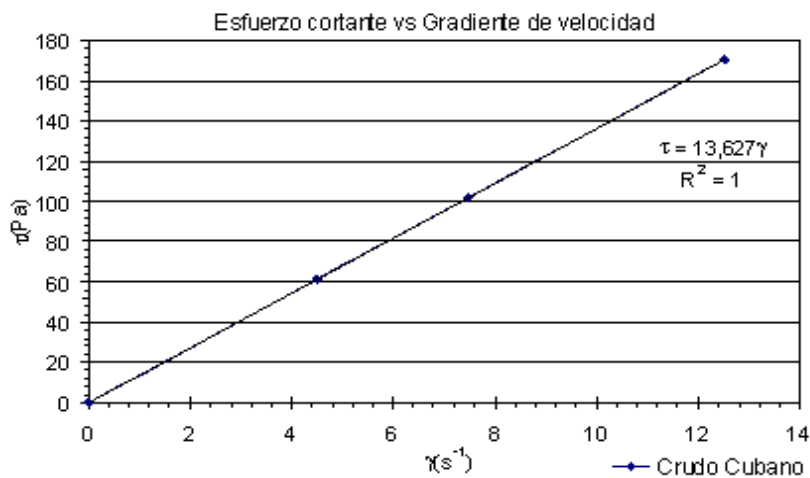


Fig. 2 Gráfico de esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad.

Desde el punto de vista del transporte por su alta viscosidad resulta necesaria la búsqueda de alternativas que permitan disminuirla y facilitar la transportación y manejo del mismo, de ahí la

necesidad de utilizar las emulsiones directas como una vía para ello /7/, sobre todo si el costo del agente emulsionante utilizado no resulta demasiado alto /6/.

Resultados del diseño experimental

Después de determinar la viscosidad del crudo cubano y teniendo en cuenta los límites inferiores y superiores de la concentración de cada uno de

los componentes de la emulsión, se realizó un diseño experimental con ayuda del programa profesional STATISTICA 7,0, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2
Resultados del diseño de experimento

Nº Réplica	En base a 100 %			Para preparar 150 g de emulsión		
	Oil	Water	E	Oil	Water	E
	A	B	C	A	B	C
2	70	24	6	105,0	36,0	9,0
1	60	34	6	90,0	51,0	9,0
3	60	36	4	90,0	54,0	6,0
3	60	34	6	90,0	51,0	9,0
3	65	30	5	97,5	45,0	7,5
2	60	36	4	90,0	54,0	6,0
1	60	36	4	90,0	54,0	6,0
3	70	24	6	105,0	36,0	9,0
2	70	26	4	105,0	39,0	6,0
3	70	26	4	105,0	39,0	6,0
1	70	24	6	105,0	36,0	9,0
2	65	30	5	97,5	45,0	7,5
1	70	26	4	105,0	39,0	6,0
2	60	34	6	90,0	51,0	9,0
1	65	30	5	97,5	45,0	7,5

Teniendo en cuenta los porcentos de la tabla anterior y en base a una masa total de la emulsión igual a 150 g se prepararon las emulsiones y sus réplicas.

Teniendo en cuenta que en las cinco relaciones diferentes que se muestran en la tabla 2 existen dos réplicas para cada una y demostrando con ayuda del programa STATGRAPHICS plus 5,1 que los resultados para cada uno de las relaciones y sus réplicas siguen un comportamiento normal se realizó en todos los casos un análisis de varianza con el objetivo de determinar si existen o no diferencias estadísticas significativas entre la muestra y sus réplicas.

En la tabla 3 se muestran los resultados de la relación $105/(36+9)$ y a continuación los resultados de su análisis de varianza, donde el p-valor del test F es superior a 0,05, por lo que no hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables a un 95,0%. Teniendo en cuenta estos resultados se promediaron los valores de esfuerzo cortante tal y como se muestran en las dos últimas columnas de dicha tabla.

Estos resultados fueron similares en el resto de las corridas por lo que en las tablas 4 y 6 se muestran los valores promedio del esfuerzo cortante y viscosidad aparente para cada gradiente de velocidad en cada relación petróleo/(agua+emulgente).

Tabla 3
Resultados de las mediciones de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad para la muestra 105/(36+9) y sus réplicas

	M-1		M-8		M-11		Datos Promedios	
	105/(36+9)		105/(36+9)		105/(36+9)		105/(36+9)	
γ (s-1)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	τ (Pa)	μ (Pa.s)	τ (Pa)	μ (Pa.s)
4,5	3,430	0,762	3,341	0,742	3,737	0,831	3,503	0,778
7,47	4,122	0,552	4,377	0,586	4,950	0,663	4,483	0,600
12,51	5,068	0,405	5,729	0,458	5,760	0,460	5,519	0,441
20,88	6,426	0,308	7,323	0,351	7,091	0,340	6,947	0,333
40,76	10,000	0,245	10,547	0,259	9,900	0,243	10,149	0,249
58,13	12,500	0,215	12,630	0,217	12,000	0,206	12,377	0,213
97,02	16,800	0,173	17,053	0,176	16,227	0,167	16,693	0,172
161,6	24,400	0,151	24,680	0,153	22,100	0,137	23,727	0,147
267,8	34,980	0,131	36,457	0,136	31,000	0,116	34,146	0,128
450	50,097	0,111	54,790	0,122	46,973	0,104	50,620	0,112

Análisis de la varianza “muestra 105/(36+9)”

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Med	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	14,790 4	2	7,395 2	0,03	0,969 2
Intra grupos	6 366,11	27	235,782		

Tabla 4
Resumen de los valores de esfuerzo cortante para cada gradiente de velocidad

γ (s-1)	105/(36+9)	105/(39+6)	90/(51+9)	90/(54+6)	97,5/(45+7,5)
	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)
4,5	3,503	3,250	1,519	2,206	3,444
7,47	4,483	3,793	1,868	2,621	3,858
12,51	5,519	4,598	2,517	3,264	4,646
20,88	6,947	6,088	3,430	4,601	6,029
40,76	10,149	8,795	4,980	7,122	8,909
58,13	12,377	10,865	6,053	8,497	11,491
97,02	16,693	14,540	8,174	11,476	15,816
161,6	23,727	20,388	10,314	15,258	22,118
267,8	34,146	27,843	13,180	20,223	30,896
450	50,620	41,032	17,327	25,532	42,658

En la figura 3 se muestra el gráfico de esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad, para cada una de las relaciones de la tabla anterior, en el que se puede apreciar que cada una de las curvas sigue un comportamiento pseudoplástico /1,3/. En la tabla 5 se

muestran los modelos para cada una de las curvas así como el coeficiente de regresión que en el caso de la relación 97,5/(45+7,5) es de 98,76 y para el resto de las curvas es superior a 99 %, dando de esta manera una medida de la calidad del ajuste.

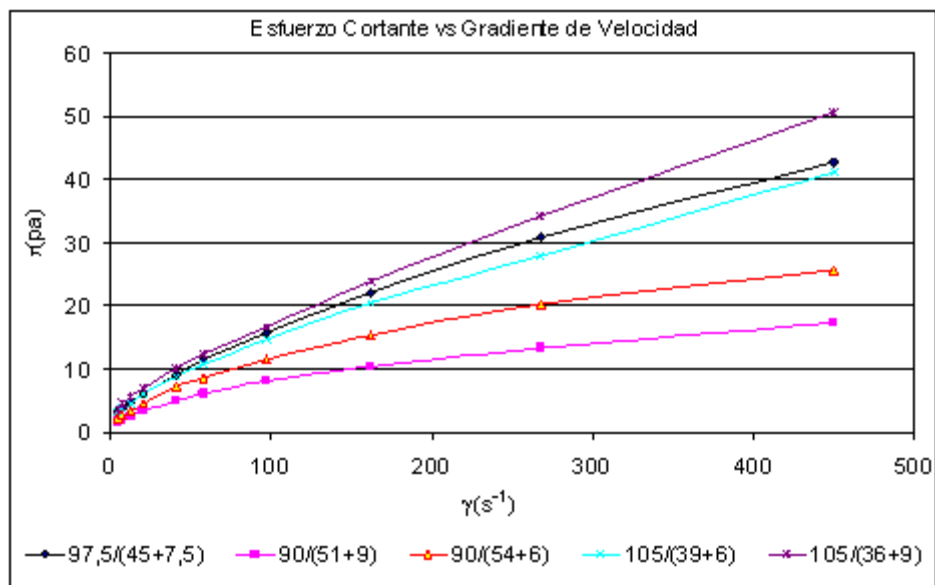


Fig. 3 Gráfico de esfuerzo cortante vs viscosidad.

Tabla 5
Modelos reológicos y coeficientes de regresión para cada una de las curvas en figura 3

Muestras	% Emulgente	Modelo reológico	R ² (%)
1	105/(36+9)	$\tau = 1.3177 \cdot \gamma^{0.5734}$	99,00
2	105/(39+6)	$\tau = 1.2000 \cdot \gamma^{0.5576}$	99,05
3	90/(51+9)	$\tau = 0.6609 \cdot \gamma^{0.5390}$	99,88
4	90/(54+6)	$\tau = 0.8756 \cdot \gamma^{0.5577}$	99,68
5	97,5/(45+7,5)	$\tau = 1.1945 \cdot \gamma^{0.5702}$	98,76

En la figura 4 se muestra la dependencia de la viscosidad aparente vs el gradiente de velocidad a partir de los datos resumidos en la 6.

Al realizar un análisis de la relación de la viscosidad aparente vs gradiente de velocidad se puede apreciar en la siguiente figura que en sentido general las emulsiones obtenidas en todos

los casos son directas, pues los valores de viscosidad disminuyen de 13,627 Pa.s (viscosidad inicial del petróleo crudo cubano) hasta valores por debajo de los 0,8 Pa.s. El tipo de emulsión fue corroborado además mediante la observación microscópica donde se observó el petróleo como fase interna y el agua como fase externa.

Tabla 6
Resumen de los valores de viscosidad aparente para
cada gradiente de velocidad

$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	105/(36+9)	105/(39+6)	90/(51+9)	90/(54+6)	97,5/(45+7,5)
	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)
4,5	0,778	0,722	0,337	0,490	0,765
7,47	0,600	0,508	0,250	0,351	0,516
12,51	0,441	0,368	0,201	0,261	0,371
20,88	0,333	0,292	0,164	0,220	0,289
40,76	0,249	0,219	0,122	0,175	0,219
58,13	0,213	0,187	0,104	0,146	0,198
97,02	0,172	0,152	0,084	0,118	0,163
161,6	0,147	0,126	0,064	0,094	0,137
267,8	0,128	0,104	0,049	0,076	0,115
450	0,112	0,091	0,039	0,057	0,095

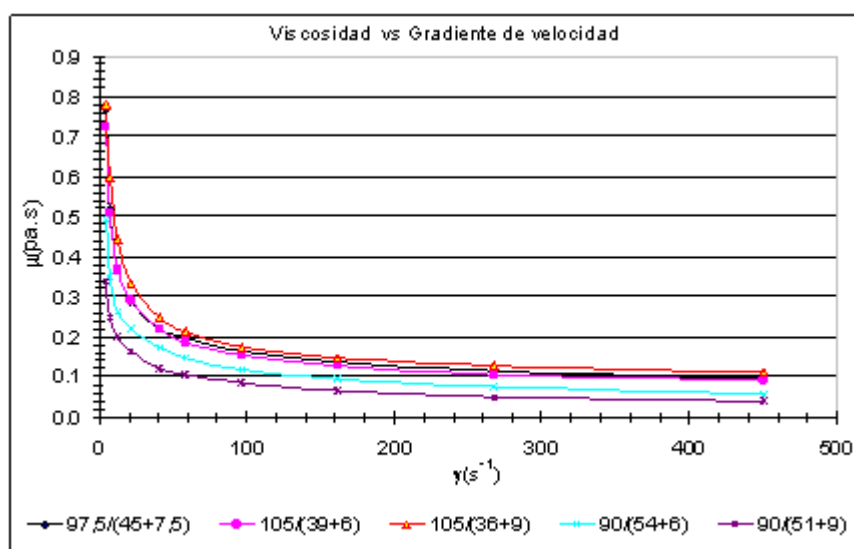


Fig. 4 Curvas de viscosidad aparente vs gradiente de velocidad.

Puede apreciarse además que en el caso de las emulsiones con 105/(36+9), 105/(39+6), 97,5/(45+7,5) el comportamiento es muy similar mientras que en la relación 90/(54+6) se observa una disminución de la viscosidad que está relacionada con la menor fracción en peso del petróleo y la fracción promedio de emulgente; Sin embargo, los menores valores de viscosidades se logran a la fracción mínima de petróleo y máxima del

emulgente es decir la relación 90/(51+9). El mayor efecto de la relación tiene lugar a bajos gradientes de velocidad (menores de 50 s⁻¹) y a partir de este valor se observa que los valores de viscosidad permanecen prácticamente constantes, tendiendo a un comportamiento newtoniano. Este efecto a bajos gradientes de velocidad, pueden estar originados por cambios en la estructura de la emulsión.

El análisis del efecto de la relación Petróleo/ (Agua+Emulgente) en la estabilidad y en el comportamiento reológico de las emulsiones obtenidas

Para la prueba de estabilidad se reconstituyeron las muestras después de 30 días de preparadas siguiendo el diseño experimental descrito anteriormente y teniendo en cuenta las mismas condiciones a las que fueron preparadas las muestras inicialmente, agita-

ción a 1400 rpm durante 15 min. Los resultados se pueden observar en las tablas 7, 9.

Con la ayuda del programa STATGRAPHICS plus 5,1 se realizó a los resultados de cada relación de Petróleo/Agua+Emulgente, un análisis estadístico en el que se demostró que en todos los casos siguen un comportamiento normal y que entre los resultados de una misma relación de estos componentes no hay diferencias estadísticas significativas, razón por la cual en las tablas posteriores sólo se muestran los promedios para cada una de las relaciones.

Tabla 7
Resumen de los valores de esfuerzo cortante para cada gradiente de velocidad

γ (s ⁻¹)	105/(36+9)	105/(39+6)	90/(51+9)	90/(54+6)	97,5/(45+7,5)
	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)	τ (Pa)
4,5	3,089	2,598	2,149	2,035	2,470
7,47	4,044	2,946	2,624	2,268	2,856
12,51	5,188	3,878	3,302	2,898	3,872
20,88	6,913	5,126	4,659	3,750	5,145
40,76	9,884	7,736	6,606	5,337	7,493
58,13	11,774	9,266	8,025	6,668	8,882
97,02	15,664	12,777	11,387	9,084	12,029
161,6	22,247	19,525	17,022	11,721	18,438
267,8	31,970	29,808	22,770	18,677	27,515
450	48,928	46,907	33,952	26,375	43,269

En la figura 5 se muestra el gráfico de esfuerzo cortante vs gradiente de velocidad, para cada una de las relaciones de la tabla

anterior, en el que se puede apreciar que cada una de las curvas sigue un comportamiento reológico pseudoplástico.

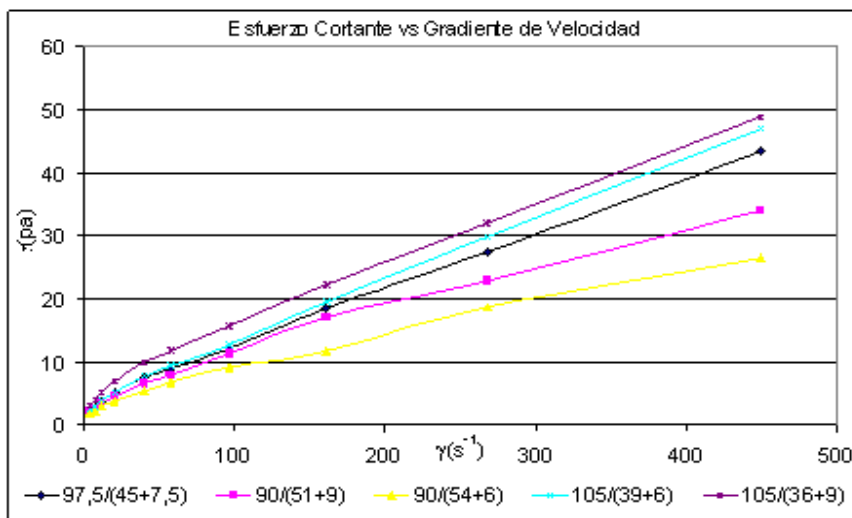


Fig. 6 Gráfico de esfuerzo cortante vs viscosidad.

En la tabla 8 se muestran los modelos para cada una de las curvas así como el coeficiente de regresión que

en cada caso fluctúa ente 98,4 y 99,4 %, dando de esta manera una medida de la calidad del ajuste estadístico.

Tabla 8
Modelos reológicos y coeficientes de regresión para cada una de las curvas en gráfico anterior

Reconstitución	% Emulgente	Modelo Reológico	R ² (%)
1	105/(36+9)	$r = 1,1918, \gamma^{0,5734}$	99,32
2	105/(39+6)	$r = 0,8138, \gamma^{0,6312}$	98,39
3	90/(51+9)	$r = 0,7578, \gamma^{0,6052}$	99,32
4	90/(54+6)	$r = 0,7233, \gamma^{0,5651}$	98,63
5	97,5/(45+7,5)	$r = 0,8188, \gamma^{0,6183}$	98,62

En la figura 7 se muestra la relación de la viscosidad aparente vs gradiente de velocidad para cada una de las muestras reconstituidas después de 30 días. En todos los casos después de los 7 días se apreció la sedimentación del agua, sin embargo al someterse a las mismas condiciones de agitación (1400 rpm) durante 15 min, fue posible la reconstitución de las mismas con características muy similares a las obtenidas cuando fue preparada la emulsión inicialmente. Este aspecto es de gran importancia

si se tiene en cuenta que durante el transporte se puede garantizar la agitación con un régimen de flujo adecuado y posteriormente se puede separar el agua del petróleo.

En sentido general se puede afirmar según los resultados obtenidos tanto en la medición de la viscosidad como en la observación visual y microscópica que la estabilidad de las emulsiones preparadas es buena.

Tabla 9
Resumen de los valores de viscosidad aparente para cada gradiente de velocidad

γ (s ⁻¹)	105/(36+9)	105/(39+6)	90/(51+9)	90/(54+6)	97,5/(45+7,5)
	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)	μ (Pa.s)
4,5	0,687	0,577	0,478	0,452	0,549
7,47	0,541	0,394	0,351	0,304	0,382
12,51	0,415	0,310	0,264	0,232	0,309
20,88	0,331	0,246	0,223	0,180	0,246
40,76	0,242	0,190	0,162	0,131	0,184
58,13	0,203	0,159	0,138	0,115	0,153
97,02	0,161	0,132	0,117	0,094	0,124
161,6	0,138	0,121	0,105	0,073	0,114
267,8	0,119	0,111	0,085	0,070	0,103
450	0,109	0,104	0,075	0,059	0,096

Según la figura 7, los menores valores de viscosidad se lograron en las relaciones 90/(54+6)

y 90/(51+9), lo que coincide con el resultado obtenido en el epígrafe anterior.

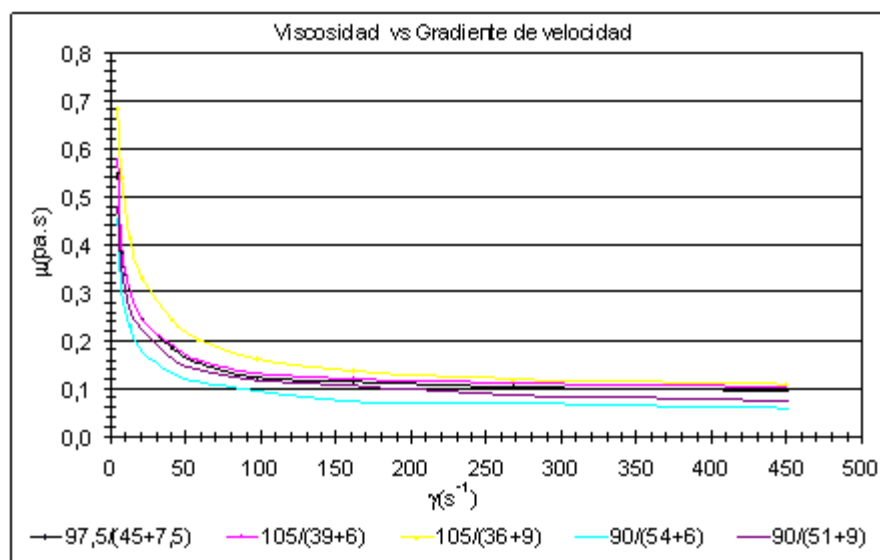


Fig. 7 Gráfico de viscosidad aparente vs gradiente de velocidad.

Conclusiones

Se puede concluir que:

1. El petróleo crudo cubano utilizado en la formulación de las emulsiones tiene un comportamiento newtoniano y una alta viscosidad (13,627 Pa.s a 30 ± 2 °C).
2. Con ayuda del programa STATISTICA 7 se realizó un diseño experimental con 15 ensayos agrupados en 5 relaciones diferentes de O/(W+E) y del mismo se puede concluir que todas las emulsiones formulada son directas (O/W) y el comportamiento reológico de las mismas es pseudoplástico con coeficientes de regresión superior a 98,76 %. Además los menores valores de viscosidad se lograron en las relaciones (90/(51+9) y 90/(54+6)) que corresponden al menor porcentaje de petróleo y las mayores cantidades de emulgente.
3. Los valores de viscosidad en todos los casos se encuentran por debajo de 0,8 Pa.s y los mayores cambios de esta se observan a valores de gradiente de velocidad inferiores a 50 s^{-1} a partir de este valor la viscosidad permanece prácticamente constantes, tendiendo a un comportamiento newtoniano.
4. La estabilidad de las emulsiones es buena y aunque el agua se separa del petróleo después

de los 7 días en reposo, estas se reconstituyen fácilmente al someterse a las mismas condiciones de agitación utilizada en la preparación de la misma (1400 rpm durante 15 min).

Bibliografía

- 1 Bird, B. R.; Stewart, E. W. Lightfort, N. E.: "Fenómenos de Transporte". Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de la Habana, 1979.
- 2 Briceño, M. I., "Heavy Crude Oil Pipeline Transportation", Universidad de los Andes, Venezuela, 2007.
- 3 Falcon *et al* "Registro de invención N° 22255, ONITEEM, Cuba, 1994
- 4 Garcell, L. "Transferencia de cantidad de movimiento, calor y masa". Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1988.
- 5 Placencia P.A. & Martínez C David "Formulación de emulsiones de petróleo pesado en agua a nivel piloto y estudio de las Pérdidas Friccionales en la tubería", Petroecuador, 2006.
- 6 Rodríguez T. Héctor L. "Efecto del pH de la fase acuosa y de agentes emulsionantes sobre las características de las emulsiones acuosas del petróleo crudo cubano", Tesis en opción al título de master en Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, 2006
- 7 Vera C. G, Ersted Aragao: "Obtención y análisis de la estabilidad de las emulsiones directa del petróleo crudo cubano con agentes emulsionantes seleccionados para facilitar su transportación."