

Comportamiento reológico de mezclas de crudos en condiciones de flujo en cañerías

Mauricio E. Garay⁽¹⁾

1- SUMARIO

Cuando en tareas de producción se trabaja con petróleos en oleoductos, se utilizan simuladores comerciales. Estos simuladores suponen que, cuando se agrega un nuevo crudo al oleoducto, la viscosidad de la mezcla, entre el crudo que circulaba anteriormente y el crudo que circula con el agregado del nuevo petróleo, se comporta de acuerdo a la tradicional ley de las mezclas. Por lo tanto, si se mezclan n crudos en una mezcla m , se tiene que:

$$\eta_m = \sum_i^n x_i \cdot \eta_i \quad (1)$$

Donde η_m es la viscosidad de la mezcla, x_i son las concentraciones en peso de cada uno de los crudos, y η_i son las viscosidades de cada componente.

Como la viscosidad es una magnitud que depende, en los líquidos, de las interacciones moleculares se partió de la hipótesis de que esta ley podía no ser válida, ya que no tiene en cuenta dichas interacciones.

Para comprobarlo experimentalmente, se determinó la viscosidad de un crudo muy viscoso perteneciente a la provincia de Mendoza, en las condiciones de gradiente de corte y temperatura de flujo en cañería. Este crudo fue mezclado con gasoil y con dos crudos livianos (ambos de comportamiento reológico conocido), a diferentes concentraciones y se determinó su viscosidad en condiciones de flujo en cañería.

Los resultados muestran claramente que el apartamiento de la viscosidad medida con la calculada a través de la ley de las mezclas es muy importante.

1- SUMMARY

When you work in production tasks with oils in pipelines, commercial simulators are used. These simulators assume that, when a new oil is added to the pipeline the mixture viscosity, between the oil running before and the oil running with the addition of the new oil behaves following the traditional rules governing mixtures. Consequently, if n oils are mixed in a m mixture, you find that

$$\eta_m = \sum_i^n x_i \cdot \eta_i \quad (1)$$

⁽¹⁾ Alumno de Ingeniería de Petróleos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo; con el presente trabajo obtuvo en el corriente año el primer premio del Concurso Nacional Estudiantil de la Society of Petroleum Engineers.

Where η_m is the mixture viscosity, x_i are the concentrations in weight of each oil, and η_i are the viscosities of each component.

As viscosity is a magnitude depending on liquids, from the molecular interactions they use the hypothesis that this rule could not be valid since it does not account for these interactions.

To prove with experiments the viscosity of a very viscous oil from Mendoza province was determined in the conditions of cut gradient and flux temperature in a pipeline. This oil was mixed with diesel-oil and with two light oils (both of reological known behaviour), at different concentrations and so its viscosity in pipeline flux conditions was determined.

The results clearly demonstrate that the difference between the measured viscosity and that calculated using the formula for mixtures is significant.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se presentará un estudio sobre la validez de la ley de las mezclas en petróleo, ya que muchos simuladores comerciales la utilizan.

Viscosidad: es la propiedad que caracteriza la resistencia de un fluido a fluir ($\eta = \text{eta}$). Se observa que la velocidad de flujo a través de un tubo es inversamente proporcional a la viscosidad. Para obtener una definición precisa de η , se considera un fluido que fluye de modo estacionario entre dos láminas grandes, planas y paralelas (fig. 1). La experiencia muestra que la velocidad v_x del flujo del fluido es máxima en medio de las dos láminas y desciende hasta cero en cada lámina. Las flechas de la figura indican la magnitud de v_x (perfil de velocidades) en función de la coordenada vertical y . La condición de la velocidad de flujo cero en el límite entre un sólido y un fluido, llamada la condición de no deslizamiento, es un hecho experimental. Las capas horizontales adyacentes de fluido fluyen a diferentes velocidades, "se deslizan" unas sobre otras. Cuando dos capas adyacentes se deslizan una junto a otra, cada una ejerce sobre la otra una fuerza de fricción (F_x) que opone resistencia. Esta fuerza es debida a la transferencia de la cantidad de movimiento molecular, y es esta fricción interna del fluido lo que da origen a la viscosidad. Los experimentos muestran que F es directamente proporcional al área A , entre las láminas y al gradiente $\dot{\gamma}$ de velocidad de flujo, siendo la constante de proporcionalidad la viscosidad η del fluido.

$$F = -\eta \cdot A \cdot \dot{\gamma} \quad (3)$$

donde $\dot{\gamma}$ es el gradiente de corte que en forma general es $\dot{\gamma} = \vec{\nabla} \cdot \vec{v}$. Para nuestro caso en dos

dimensiones, el gradiente de corte quedaría $\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy}$.

La ecuación (3) es la Ley de Newton de la Viscosidad, que también puede expresarse como:

$$\tau = -\eta \cdot \frac{dv_x}{dy} \quad ; \quad (4)$$

donde τ es el esfuerzo tangencial o cortante que una capa adyacente ejerce sobre la otra.

Los fluidos se clasifican en newtonianos o no newtonianos. Esta clasificación se hace en función de cómo se comporta η a medida que varía $\frac{dv_x}{dy}$ (fig. 2). El **fluido newtoniano** es aquel en el que η es independiente de $\frac{dv_x}{dy}$. Por lo tanto, existe una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. En cambio, en el **fluido no newtoniano**, η varía a medida que lo hace $\frac{dv_x}{dy}$; entonces, existirá una relación no lineal entre ellos.

Cuando en tareas de producción se trabaja con petróleos en oleoductos, se utilizan simuladores comerciales. Estos simuladores suponen que, cuando se agrega un nuevo crudo al oleoducto, la viscosidad de la mezcla, entre el crudo que circulaba anteriormente y el crudo que circula con el agregado del nuevo petróleo, se comporta de acuerdo a la tradicional ley de las mezclas. Por lo tanto, si se mezclan n crudos en una mezcla m , se tiene que:

$$\eta_m = \sum_i^n x_i \cdot \eta_i \quad (5)$$

Donde η_m es la viscosidad de la mezcla, x_i son las concentraciones en peso de cada uno de los crudos, y η_i son las viscosidades de cada componente.

Según (1) existe una gran variedad de ecuaciones empíricas y semiempíricas que podrán funcionar con un grado mayor de aproximación o no, dependiendo del sistema a analizar. Algunas, de las ecuaciones mencionadas son:

Leyes Ideales

$$\theta(\eta) = \sum_i^n X_i \cdot \theta(\eta_i) \quad (6)$$

Ecuación de Arrhenius, ASTM

$$\log \eta = \sum_i^n X_i \cdot \log \eta_i \quad (7)$$

Ecuación de Kendall y Monroe

$$\eta = X_1 \cdot \eta_1^{1/3} + X_2 \cdot \eta_2^{1/3} \quad (8)$$

Donde $\theta(\eta)$ es alguna función de η . Por lo dicho en (1), todas estas ecuaciones no son demasiado precisas, cuando se utilizan en líquidos, debido a que no consideran las interacciones moleculares, ya sea de los líquidos miscibilizados o las interacciones soluto – solvente. Como ya se ha dicho, la viscosidad es una magnitud que depende, en los líquidos, de las interacciones moleculares. Por lo tanto, se partió de la hipótesis de que estas leyes no podían ser válidas, ya que no tienen en cuenta dichas interacciones.

Para comprobarlo experimentalmente, se determinó la viscosidad de un crudo muy viscoso perteneciente a la provincia de Mendoza (A), en las condiciones de gradiente de corte y una temperatura media de flujo en cañería. Este crudo fue mezclado a diferentes concentraciones con gasoil, con un segundo crudo B y con un tercer crudo C. Ambos de comportamiento reológico conocido.

3- METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con el objeto de demostrar la hipótesis ya mencionada, se prepararon tres tipos de mezclas binarias entre un crudo A y gasoil, entre el crudo A y un crudo B y finalmente entre el crudo A y un crudo C. A su vez estas tres mezclas se prepararon a tres concentraciones distintas cada una. Las tres concentraciones en peso diferentes de A utilizadas fueron: al 70%, al 50% y al 30% (ver tabla 1), y se las designará como indica la tabla 1. Las determinaciones de viscosidad se hicieron a una temperatura de 60°C y a un gradiente de corte entre 1 – 50 1/s, debido a que se consideró que son valores habituales medios en cañería. Los datos finales obtenidos son los valores medios entre cinco mediciones.

3.1- Equipo experimental

Las viscosidades se midieron con un viscosímetro Haake modelo RV20 con reocontroller RC20, conectado a PC 486, con cabezal de medición M5 y rotores MV1 y MV2, dependiendo del rango de viscosidades.

Las temperaturas se controlaron con un baño termostático Haake, mediante una sonda de temperatura Pt 100 que permite mediciones con precisión de $0,1^{\circ}\text{C}$.

4- RESULTADOS EXPERIMENTALES

El petróleo base A, resultó ser un fluido no newtoniano, como lo indica la gráfica 1. Resulta evidente, que la viscosidad disminuye en forma apreciable con el gradiente de corte.

La determinación de la viscosidad en toda la serie de muestras, arrojó los siguientes resultados:

Mezclas Petróleo A – Gasoil: las muestras 1, 2 y 3, resultaron ser fluidos newtonianos, debido a la relación lineal que existe entre la viscosidad y el gradiente de corte. En el gráfico 2 se puede observar el comportamiento de las viscosidades de las mezclas. Debido a que son fluidos newtonianos, se determinaron las viscosidades de las mezclas con un promedio de todas las mediciones; indicándose, además, los errores correspondientes a dicha operación. Estos valores están indicados en la tabla 3.

Mezclas Petróleo A – Petróleo B: las muestras 5 (50% de A y 50% de B) y 6 (30% de A y 70% de B) resultaron ser fluidos newtonianos. En cambio, la muestra 4 (70% de A y 30% de B) resulta ser un fluido no newtoniano. Estos resultados pueden ser observados en gráfico 3 y en tabla 5.

Mezclas A – Petróleo C: se determinó que la muestra 7 (70% de A y 30% de C) es no newtoniana. En cambio las muestras 8 (50% de A y 50% de C) y 9 (30% de A y 30% de C) son newtonianas. Los valores obtenidos para la muestra 7 (70% de A y 30% de C) se muestra en la tabla 6. La tabla 7 da los valores de las viscosidades en las muestras que resultaron newtonianas. El gráfico 4 indica la variación de la viscosidad con el gradiente de corte, para todas la mezclas Petróleo A – Petróleo C

4-1 VERIFICACIÓN DE ECUACIONES DE LEYES DE LAS MEZCLAS

Reemplazando valores en las ecuaciones de leyes de las mezclas, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 8 hasta la tabla 16. Por ser el petróleo A no newtoniano, los cálculos se efectúan a tres gradientes de corte distintos, dentro de los característicos para flujo en cañería.

4-2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Mezclas Petróleo A – Gasoil: se puede observar que la muestra 1, que posee 70% de A (crudo muy viscoso), tiene menor viscosidad que la muestra 2, que sólo presenta un 50% de A. Por lo tanto, no sólo no cumple con las ecuaciones, sino que tampoco disminuyen las viscosidades de acuerdo a las concentraciones de cada componente.

Mezclas Petróleo A – Petróleo B: se pudo observar una disminución de las viscosidades, de acuerdo a las concentraciones. En las dos concentraciones más altas de B, se cumple la ley de Arrhenius con muy buena aproximación.

Mezclas Petróleo A – Petróleo C: se puede observar en las tablas 14, 15 y 16, que las ecuaciones de las leyes de las mezclas no se verifican. Además se puede vislumbrar un comportamiento extraño que no se pudo explicar. Éste se observó en la muestra 7 (70% de A y 30% de C), en la cual mezcla de dos crudos pseudoplásticos da como resultado un dilatante.

5- CONCLUSIONES

La variación de la viscosidad depende del gradiente de corte, por lo que debe calcularse en las condiciones de flujo de cañería, teniendo en cuenta la no newtoneidad en los casos que corresponda, antes de introducir los datos en un simulador.

Se comprueba otra vez, que la viscosidad es una manifestación de interacciones moleculares, sobre todo en el caso de mezclas con gasoil. En la muestra n° 2 (50% de A y 50% de gasoil) se pudo observar que la viscosidad era mayor que en la muestra n° 3 (30% de A y 70% de gasoil) a pesar de la

mayor concentración en A (crudo muy viscoso). Ello se debe a que el crudo A es muy asfáltico y el gasoil, tiene la particularidad de precipitar a los mismos. Al existir partículas más grandes (agregados de asfaltenos), la viscosidad aumentó. En muchos casos, en la extracción por bombeo, las parafinas producen el atascamiento de las bombas. Para solucionar este inconveniente, se inyecta gasoil o kerosene, que produce la disolución de las parafinas pesadas. Sin embargo esto produce, en aquellos petróleos asfálticos, la precipitación de los mismos, y por consiguiente la disminución del rendimiento del pozo.

Los resultados muestran claramente que el apartamiento de la viscosidad medida con la calculada a través de las ecuaciones de las mezclas, es muy importante en la mayoría de los casos.

Por lo tanto, no puede usarse ninguna ley de las mezclas, sin una previa comprobación experimental, de los valores reales de las viscosidades de la mezcla.

NOMENCLATURA

η_m = viscosidad de la mezcla.

η_i = viscosidad de cada componente.

X_i = concentración en peso de cada componente.

F_x = fuerza de fricción interna, en el flujo de un fluido.

$\dot{\gamma}$ = gradiente de corte o de flujo general

dv_x/dy = gradiente de corte o de flujo en bidimensional.

τ = esfuerzo de corte o tangencial.

$\theta(\eta)$ = alguna función de la viscosidad.

n = cantidad de componentes en el sistema de mezclas

REFERENCIAS

1. Adamsom, Arthur W.: "The Difussional Behavior And Viscosity Of Liquid Mixtures", Soc. Pet. Eng. (1963), paper 1348, volume 219, P. 158
2. Shu W. R.: "A Viscosity Correlation For Mixtures Of Heavy Oils, Bitumen And Petroleum Fractions". SPE 11280 (1989)
3. Wazer, Lyons Kim: "Viscosity and flow measurement a laboratory handbook of Rhedo"
4. Sunil L. Kokal and Selim G. Sayegh: "Asphaltenes: The Colesterol of Petroleum". SPE (1995), paper 29787
5. Carmen García Carvajal y Mirna: "Aspectos Físico - Químicos sobre la Floculación de Asfaltenos". Revista Sociedad Venezolana de Química, volumen 15, setiembre de 1992.

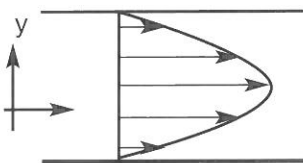


Fig. 1

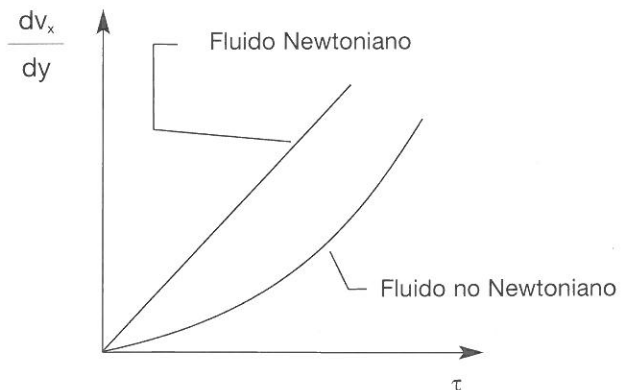


Fig. 2

	PETROLEO A		
	70%	50%	30%
GASOIL	Muestra n° 1	Muestra n° 2	Muestra n° 3
PETROLEO B	Muestra n° 4	Muestra n° 5	Muestra n° 6
PETROLEO C	Muestra n° 7	Muestra n° 8	Muestra n° 9

Petróleo A	
Gradiente de Corte [1/s]	η [mPa.s]
4,98	2520
7,36	2510
9,75	2500
12,10	2490
14,40	2480
16,70	2470
19,10	2460
23,70	2450
28,30	2440
35,50	2430
40,20	2420
45,00	2410
49,60	2400

Tabla 2

Muestra n° 4 (70%A-30%B)	
Gradiente de Corte [1/s]	η [mPa.s]
8,15	295
16,10	293
21,20	291
26,50	290
29,20	288
34,30	287
37,00	286
39,70	284
42,10	285
47,40	284
49,80	283

Tabla 4

Tabla 1

	η [mPa.s]
Muestra n° 1 (70%A-30%B)	28 ± 2
Muestra n° 2 (50%A-50%B)	34 ± 2
Muestra n° 3 (30%A-70%gasoil)	13 ± 2

Tabla 3

	η [mPa.s]
Muestra n° 5 (50%A-50%B)	117 ± 2
Muestra n° 6 (30%A-70%B)	34 ± 2

Tabla 5

Muestra 7 (70%A-30%C)	
Gradiente de Corte [1/s]	
	η [mPa.s]
5,52	353
8,15	352
10,8	355
16	358
18,6	359
21	360
26,6	362
29,2	366
31,9	371
34,3	373
37	374
39,7	377
42,1	382
44,7	385
47,4	388
49,8	389

Tabla 6

	η [mPa.s]
Muestra n° 8 (50%A-50%C)	156 ± 2
Muestra n° 9 (30%A-70%C)	34 ± 2

Tabla 7

> **Muestra n° 1:** 70% de A + 30% de gasoil

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Gasoil	Muestra n° 1 Experimental	Muestra n° 1 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 1 Ley de las mezclas según Arrhenius
4,98	2520	3,42	28	1727	314
16,7	2470	3,42	28	1692	310
40,2	2420	3,42	28	1658	306

Tabla 8

> **Muestra n°2:** 50% de A + 50% de gasoil

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Gasoil	Muestra n° 2 Experimental	Muestra n° 2 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 2 Ley de las mezclas según Arrhenius
4,98	2520	3,42	34	1278	97
16,7	2470	3,42	34	1253	96
40,2	2420	3,42	34	1228	95

Tabla 9

➤ **Muestra n° 3:** 30% de A + 70% de gasoil

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Gasoil	Muestra n° 3 Experimental	Muestra n° 3 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 3 Ley de las mezclas según Arrhenius
4,98	2520	3,42	13	758	25
16,7	2470	3,42	13	743	25
40,2	2420	3,42	13	728	24

Tabla 10

➤ **Muestra n°4:** 70% de A + 30% de B

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Petróleo B	Muestra n° 4 Experimental	Muestra n° 4 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 4 Ley de las mezclas según Arrhenius
8,15	2500	5,54	295	1714	364
29,2	2440	5,54	288	1673	358
49,8	2400	5,54	283	1645	354

Tabla 11

➤ **Muestra n° 5:** 50% de A + 50% de B

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Petróleo B	Muestra n° 5 Experimental	Muestra n° 5 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 5 Ley de las mezclas según Arrhenius
8,15	2500	5,54	117	1258	119
29,2	2440	5,54	117	1228	118
49,8	2400	5,54	117	1208	117

Tabla 12

➤ **Muestra n° 6:** 30% de A + 70% de B

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Petróleo B	Muestra n° 6 Experimental	Muestra n° 6 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 6 Ley de las mezclas según Arrhenius
8,15	2500	5,54	34	748	34
29,2	2440	5,54	34	730	34
49,8	2400	5,54	34	718	34

Tabla 13

> **Muestra n° 7:** 70% de A + 30% de C

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Petróleo C	Muestra n° 7 Experimental	Muestra n° 7 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 7 Ley de las mezclas según Arrhenius
8,15	2500	31,1	352	1694	597
29,2	2440	39,2	366	1656	633
49,8	2400	40,6	389	1630	634

Tabla 14

> **Muestra n° 8:** 50% de A + 50% de C

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Petróleo C	Muestra n° 8 Experimental	Muestra n° 8 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 8 Ley de las mezclas según Arrhenius
8,15	2500	31,1	155	1231	262
29,2	2440	39,2	155	1206	292
49,8	2400	40,6	155	1187	295

Tabla 15

> **Muestra n° 9:** 30% de A + 70% de C

Gradiente de Corte [1/s]	Viscosidad [mPa.s]				
	Petróleo A	Petróleo C	Muestra n° 9 Experimental	Muestra n° 9 Ley de las mezclas tradicional	Muestra n° 9 Ley de las mezclas según Arrhenius
8,15	2500	31,1	63	847	133
29,2	2440	39,2	63	833	154
49,8	2400	40,6	63	821	156

Tabla 16

Petróleo A

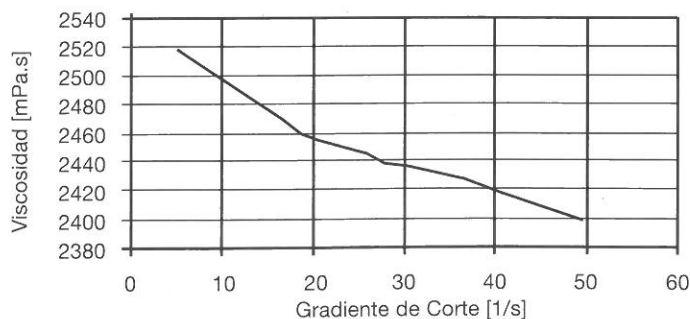


Gráfico 1

Petróleo A - Gasoil

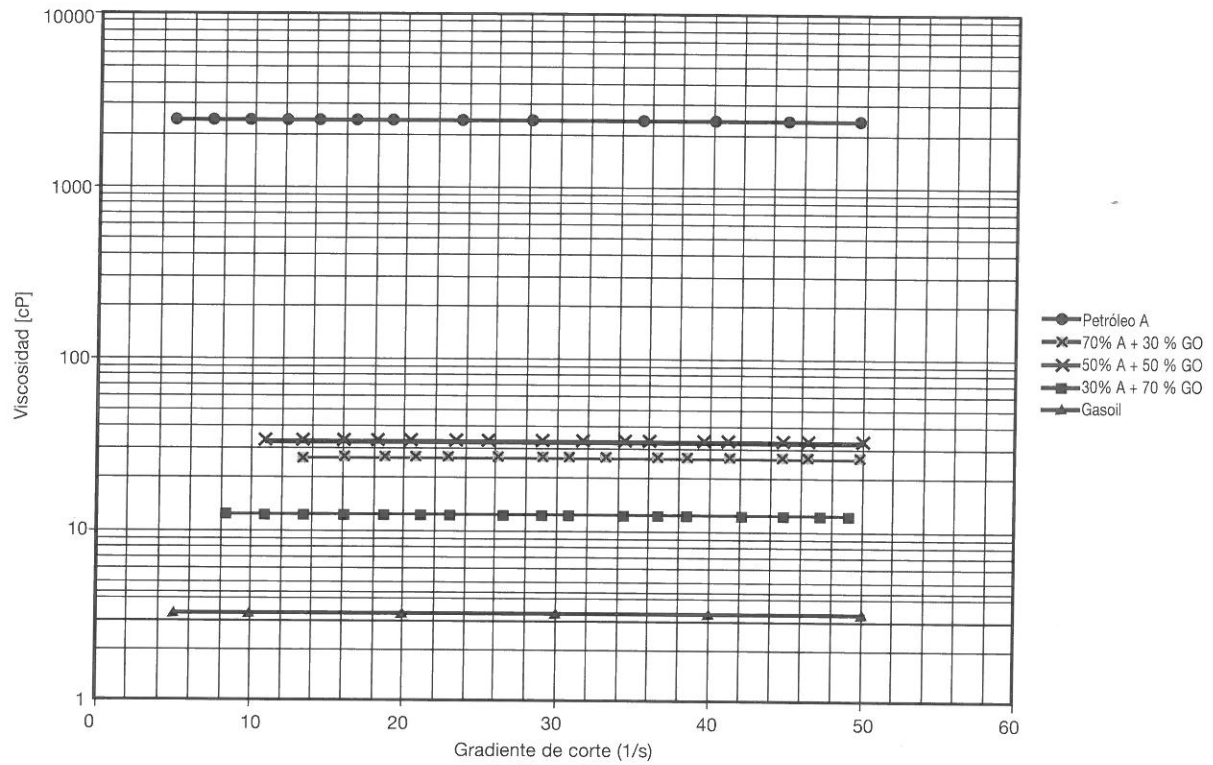


Gráfico N° 2

Petróleo A - Petróleo B

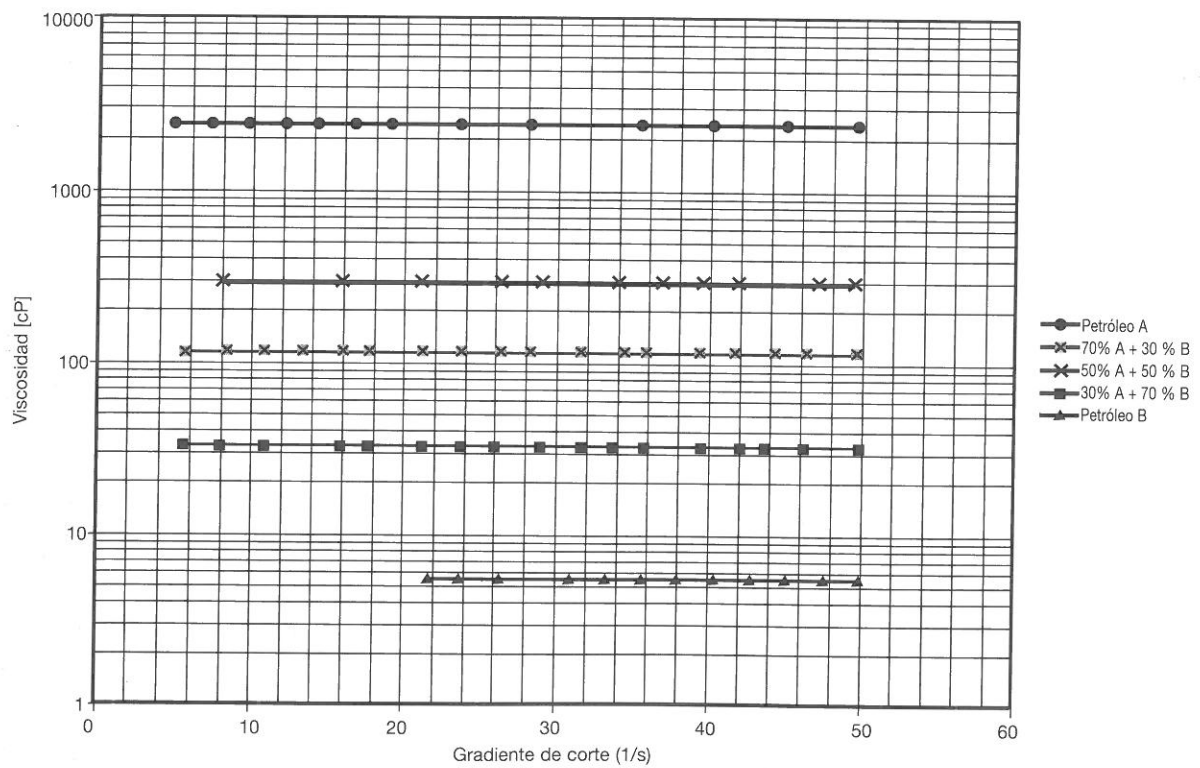


Gráfico N° 3

Petróleo A - Petróleo C

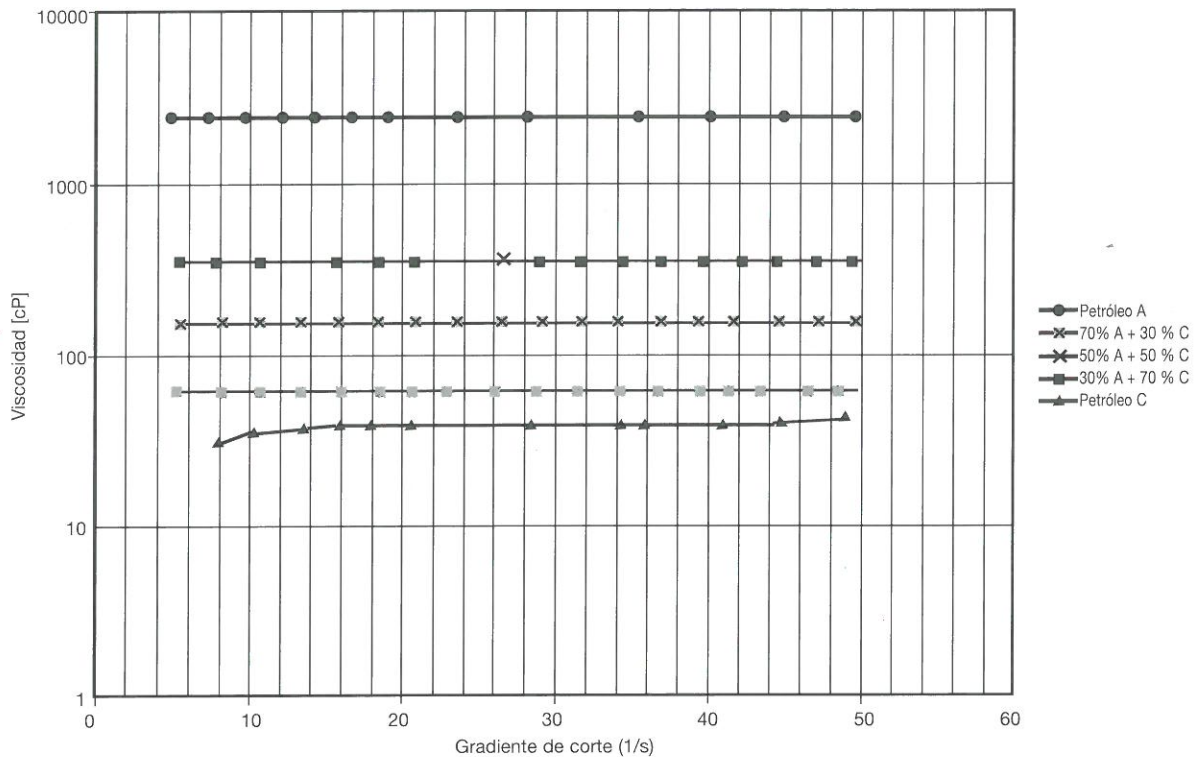


Gráfico N° 4

AGRADECIMIENTOS

Dra. Adriana Fornés

Ing. Silvia Maturano

Ing. Lourdes Guiñazú

Cecilia Gorosito

Juan Manuel Tovar

Y.P.F. S.A. por la donación de los equipos que hicieron posible la realización de las experiencias.

ENSHI

ESCUELA NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE INDUSTRIAL

(Creada por Resolución N° 123/97 y modificatoria N° 22/98)

- Capacitación sobre seguridad en el trabajo, prevención de riesgos, higiene industrial y sus interacciones con el ambiente.
- Cursos modulizados y adecuados a las necesidades de cada actividad y al nivel funcional de los participantes: Desde el obrero no calificado hasta la más alta gerencia.
- Clases en la sede de la Facultad y/o in company.
- Programas orientados a todo el abanico productivo de bienes y servicios: Industria de la construcción, minería, petróleo, gran industria química, etc.
- Certificación y carnet de acreditación.

INFORMES Y CONTRATACIONES:

Facultad de Ingeniería - Centro Universitario - Parque General San Martín

(5500) Mendoza

Tel/Fax: 54-261-4494169

Conmutador: 54-261-4234448 - 54-261-4494002 - Fax: 54-261-4380120

e-mail: fing@raiz.uncu.edu.ar