

Julio C. Ferrer⁽¹⁾
Abraham E. Arteaga⁽²⁾
Douglas A. Alvarado

Instituto de Investigaciones Petroleras
Universidad del Zulia
Maracaibo, Venezuela

Flujo de Mezclas de Petróleo Pesado y Solventes a Través de Medios Porosos

(Recibido el 3 de Octubre, 1977; y la versión revisada el 3 de Febrero, 1978).

RESUMEN

El desplazamiento miscible con solvente es una de las alternativas para la recuperación de crudos pesados.

Se hizo un estudio de flujo de mezclas de petróleo pesado con solventes a través de medios porosos consolidados. La reología de las mezclas fue determinada con viscosímetros rotacionales y se halló que fueron fluidos newtonianos.

Se determinó que la Ley de Darcy aplicada en su forma convencional produce errores de hasta un 60% y que una nueva correlación presentada por Alvarado que incluye la reducción de permeabilidad por precipitados produce resultados muy satisfactorios. Varios ejemplos de aplicación son presentados.

INTRODUCCION

La necesidad de fuentes energéticas en el mundo se incrementa a cada momento. Las reservas a nivel mundial de petróleos son cada vez más bajas y la recuperación adicional de crudos pesados es un tópico de investigación de gran importancia en la actualidad.

SUMMARY

The miscible displacement with solvents is one of the alternatives for the recovery of heavy crude oils.

A study was made of the flow of mixtures of heavy oils and solvents through consolidated porous medium. The rheology of the mixtures was determined with rotational viscosimeters and the fluids were found to be newtonian.

It was determined that Darcy's law, applied in its conventional form, gives errors of up to 60%. It was also found that a new correlation, proposed by Alvarado, which includes the reduction in permeability due to precipitation gives very satisfactory results. Various examples of application are also presented.

Mediante técnicas de recuperación secundaria es posible recuperar buena parte del petróleo remanente en un yacimiento. Una de las técnicas que ha sido objeto de estudio para la recuperación de crudos pesados es la de desplazamiento miscible con solventes. Esta técnica representa una posibilidad de poder incrementar el recobro de crudo pesado, utilizando para ello, los solventes cuyas características tanto físicas como químicas sean adaptables bajo ciertos criterios a un yacimiento en particular.

En el proceso de desplazamiento con solventes se trata de aumentar la movilidad de los crudos más pe-

(1) Ahora con Santa Fe Drilling Co.

(2) Ahora con Meneven S.A.

sados disminuyendo la viscosidad de éstos por miscibilidad.

La descripción matemática del flujo de las mezclas de petróleo pesado y solventes a través de medios porosos contribuiría a expresar cuantitativa y cualitativamente las relaciones funcionales entre las variables presentes y simular el comportamiento de flujo.

En el presente trabajo se hace un estudio preliminar del flujo de fluidos de mezclas de petróleo pesado con solvente a través de medios porosos consolidados (Berea). En líneas generales se hace un estudio sobre la reducción de permeabilidad al flujo de las mezclas y la relación entre la permeabilidad convencional y la permeabilidad actual fluyente. Se incluye además, el comportamiento reológico de las mezclas y solventes usados y se analizan los datos de flujo a través de medios porosos usando una correlación presentada por Alvarado 1,2 adaptada a fluidos newtonianos.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Aparatos

El equipo utilizado para realizar el estudio de flujo de las mezclas de crudos pesados con solventes se presenta en la Fig. 1. El aparato consta de tres buretas las cuales contienen los fluidos a usarse en el experimento, una bomba de desplazamiento positivo la cual desplaza dichos fluidos a través del sistema y un portanúcleo que contiene el medio poroso. Consta además de un manómetro colocado a la entrada del portanúcleo, que determina la caída de presión a través del medio poroso y de un cilindro graduado para recoger y medir los fluidos.

El sistema de flujo está conectado a un aparato para hacer vacío a fin de eliminar las burbujas de aire dentro del sistema antes de efectuar las pruebas. Más detalles pueden encontrarse en la referencia 4.

Medios Porosos

Las muestras usadas fueron de arenisca consolidadas (Berea) con permeabilidades con rango entre 200 y 500 md. y de aproximadamente dos pulgadas de longitud y una pulgada de diámetro. Las muestras fueron previamente calentadas en un horno eléctrico a temperaturas de 500°F, con el objeto de eliminar el supuesto material orgánico presente en las mismas y también prevenir el probable taponamiento del medio poroso al desactivar el material natural arcilloso presente. La porosidad de las muestras se determinó utilizando el método de saturación y varió entre 19 a 22%.

Las muestras de Berea se colocaron dentro del portanúcleos fijando la muestra mediante un anillo cónico

ajustado a una de las tapas del portanúcleo, posteriormente se selló el espacio entre la superficie exterior del núcleo con un material sellante.

Solventes y Crudos Usados

Los crudos usados fueron Boscán Pesado y Bachaquero II. Dichos crudos son producidos en Campo Boscán y en Campo Bachaquero respectivamente.

Los solventes fueron seleccionados en base al bajo porcentaje de precipitados que producen de acuerdo a un método ASTM 7, y sus propiedades se presentan en las Tablas 2 y 3.

Reología de los Fluidos

Para la determinación de las variables reológicas se usó el viscosímetro Fann Modelo 35A. En la Fig. 2 se presentan los reogramas de lectura en el dial como función de rpm para los solventes utilizados. Los reogramas mostraron que el comportamiento de los mismos fue newtoniano, esto es debido a que el gráfico es una línea recta en papel cartesiano y no presenta punto cedente. La Fig. 3 presenta un reograma típico para una mezcla preparada con crudo de Boscán y Aceite 2. Dichas mezclas presentaron diferentes viscosidades, utilizando bajas concentraciones de crudo (menos del 20%) y altas concentraciones de solventes (mayores de 80%) para simplificar el procedimiento experimental del manejo de las mezclas. La Fig. 3 muestra que la relación entre lectura en el dial y las rpm es una línea recta que pasa por el origen, lo cual demuestra que las mezclas presentan un comportamiento reológico newtoniano y la relación funcional que modela matemáticamente el comportamiento reológico es la ley de Newton de viscosidad:

$$\tau = \mu\gamma \quad (1)$$

donde μ es la viscosidad (constante) del fluido; τ es el esfuerzo de corte (función lineal de la lectura en el dial) y γ es la tasa de corte (función lineal de los rpm).

Flujo de Mezclas de Solventes a través de Medios Porosos.

La fig. 4 presenta un gráfico típico del flujo de mezclas de viscosidad igual a 4.0 cp. (Curvas inferiores), comparadas con el flujo de agua para determinar la permeabilidad absoluta (curvas superiores). Las permeabilidades, fluyentes k_f obtenidas de acuerdo a un procedimiento API 6 fueron de 157 y 205 md. para las mezclas de Boscán-Kerosene y Boscán T-50 respectivamente, menores que la permeabilidad absoluta. Como puede observarse en la misma Fig. 4 la relación entre velocidad de flujo, $v=q/A$, y el gradiente de

presión, $\Delta p/L$, es lineal, sin embargo al utilizar la Ley de Darcy, (ecuación 2), puede traer consigo errores si se considera

$$q = \frac{k A \Delta p}{\mu L} \quad (2)$$

el término de permeabilidad como permeabilidad absoluta, k . Este término de permeabilidad debe ser sustituido por la permeabilidad fluyente, k_f , la cual puede ser estimada de pruebas de laboratorio 4.

Con el objeto de comparar las caídas de presión, Δp , obtenidas experimentalmente para las mezclas consideradas, con las caídas de presión determinados a partir de la Ley de Darcy en su forma convencional (ecuación 2), se seleccionaron dos mezclas Bachaquero II - Kerosene y Boscán-Aceite 2 de viscosidad 4 y 10 cp respectivamente. Los resultados se presentan en la Tabla 4. Como puede observarse en la Tabla 4, las caídas de presión Δp , estimadas usando la Ley de Darcy fueron entre un 20 a 30% menores que los valores experimentales y hasta un máximo, de 62%. Se pudo comprobar experimentalmente que el taponamiento del medio poroso y su consecuente reducción de permeabilidad son función directa al porcentaje de precipitado reportado en la Tabla 3. Mientras mayor es el porcentaje de precipitado para un sistema solvente-crudo, mayor es la reducción de la permeabilidad del medio poroso al flujo del sistema considerado a través de un medio poroso. Este fenómeno puede deberse a la floculación de asfaltenos como fue apuntado por David 3.

Los datos del flujo de mezclas de solventes pueden ser analizados también con una correlación presentada por Alvarado 1,2. Este autor extiende las ecuaciones de flujo en capilares a medios porosos y define el esfuerzo de corte promedio dentro de los capilares del medio poroso, τ_ϕ y la deformación de corte promedio, $\dot{\gamma}_\phi$, por las siguientes ecuaciones:

$$\tau_\phi = \frac{\beta k / \phi \Delta p}{2L} \quad (3)$$

$$\dot{\gamma}_\phi = \frac{4v}{\sqrt{k \phi}} \quad (4)$$

La relación entre ambas variables está dada por 1,2

$$v^{n'} = \frac{\beta (k/\phi) \phi \Delta p}{(2n' + 1) K' L} \quad (5)$$

donde:

- v — Velocidad promedio, cm/seg.
- Δp — Caída de presión a través del medio poroso, dinas/cm².
- k — Permeabilidad, cm²
- ϕ — Porosidad, fracción
- n' — Índice de flujo, adimensional
- K' — Índice de consistencia, poise-seg ^{$n'-1$} , y
- β — Parámetro adimensional

Para fluidos newtonianos $n' = 1$, $K' = \mu \gamma$ ($\beta = 8$) la ecuación 5 se reduce a la Ley de Darcy. La ecuación 5 puede ser expresada también, en función de las ecuaciones 3 y 4 así:

$$\tau_\phi = K' \dot{\gamma}_\phi^{n'} \quad (6)$$

y para fluidos newtonianos: $K' = \mu \gamma^{n'} = 1$, con esto la ecuación 6 puede escribirse:

$$\tau_\phi = \mu \dot{\gamma}_\phi \quad (7)$$

En papel log-log el intercepto para $\dot{\gamma}_\phi = 1$, es igual a la viscosidad del fluido newtoniano. En la Fig. 5 se muestra un gráfico de τ_ϕ contra tasa de deformación, $\dot{\gamma}_\phi$, en papel log-log para una mezcla Boscán-Aceite 2 de viscosidad igual a 10 cp. Puede observarse que se obtiene una línea recta a 45° lo cual indica que el fluido es newtoniano y la viscosidad de la mezcla se determina para τ_ϕ evaluada a $\dot{\gamma}_\phi = 1$.

CONCLUSIONES

- 1.- Los solventes usados y las mezclas preparadas con Crudo Boscán y Bachaquero II mostraron un comportamiento newtoniano.
- 2.- La Ley de Darcy debe ser modificada para el caso de mezclas de petróleo pesado con solventes para incluir el efecto de reducción de permeabilidad debido al taponamiento del medio poroso.
- 3.- La reducción de permeabilidad de los medios porosos es función directa del porcentaje de precipitados que formen los solventes con los crudos pesados usados. Se comprobó experimentalmente que a medida que aumenta el porcentaje (%) de precipitado de cualquier solvente para un crudo específico, mayor es la reducción de permeabilidad de un medio poroso, alcanzándose reducciones de hasta un 60%.
- 4.- En análisis reológico del flujo de las mezclas usadas a través de los medios porosos considerados puede

hacerse utilizando una correlación presentada por Alvarado 1 adaptada a fluidos newtonianos.

NOMENCLATURA

- k = Permeabilidad de un medio poroso, md.
- k_f = Permeabilidad fluvente, md.
- n' = Índice de consistencia, poise-seg $n'-1$
- L = Longitud de un medio poroso, cm.
- n' = Índice de flujo, adimensional
- q = Tasa de flujo, cm³/seg.
- v = Velocidad lineal de flujo, cm/seg.
- β = Parámetro adimensional
- $\bar{\gamma}_\phi$ = Tasa de corte promedio para un medio poroso, seg⁻¹

μ = Viscosidad, poise

$\bar{\tau}_\phi$ = Esfuerzo de corte promedio para un medio poroso, dinas/cm²

ϕ = Porosidad, fracción

τ = Esfuerzo de corte, dinas/cm²

$\dot{\gamma}$ = Tasa de deformación, seg⁻¹

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen la asistencia económica prestada por el Instituto de Investigaciones Petroleras (IN-PELUZ), para la realización de esta investigación.

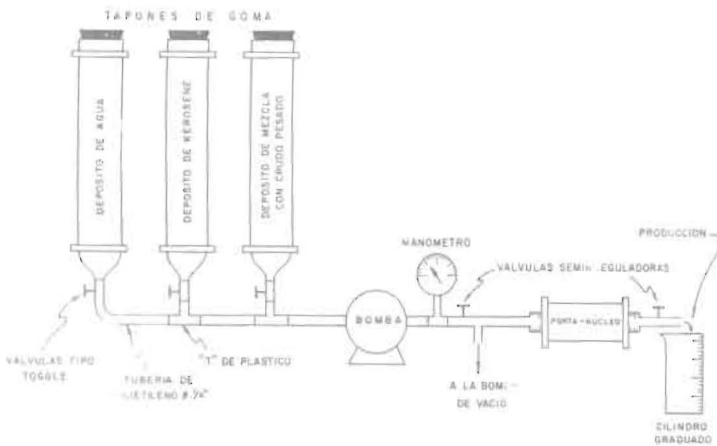


Fig 1.- Modelo utilizado durante las pruebas con Bomba de Desplazamiento

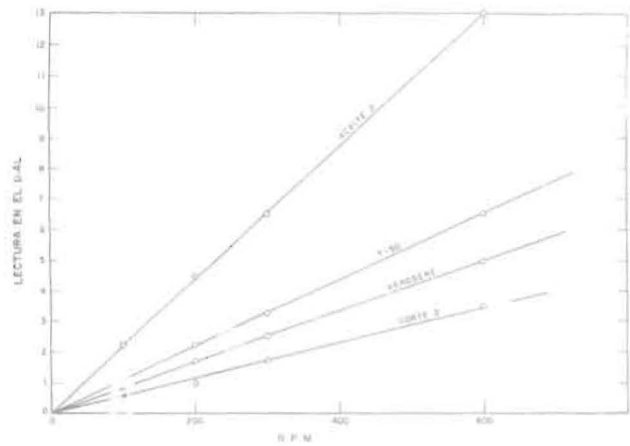


Fig 2.- Comportamiento reológico de los solventes Aceite 2, T-50, Kerosene y Corte 2

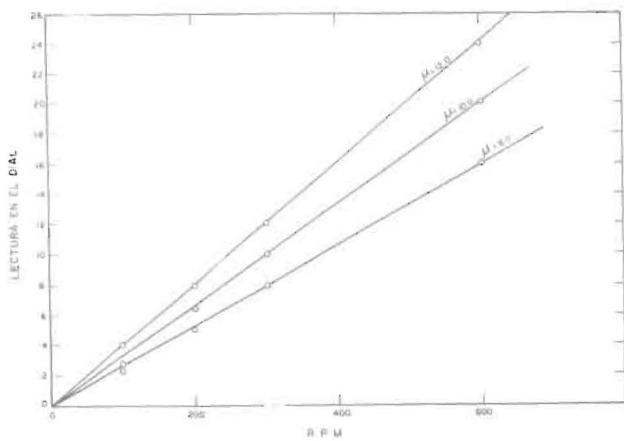


Fig 3.- Gráfico de Lectura en el Dial como función de las RPM para la mezcla Boscón-Acete 2

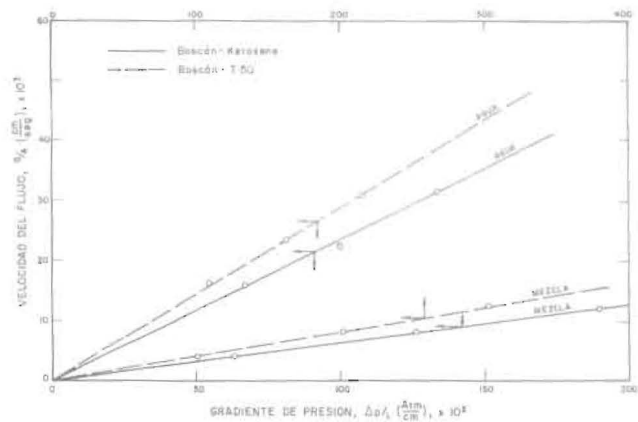


Fig 4.- Gráfico comparativo de Velocidad de Flujo (ft) contra Gradiente de Presión ($\Delta P/L$) de mezclas con Boscón Pesado, usando Kerosene y T-50, para una viscosidad +50 cp.

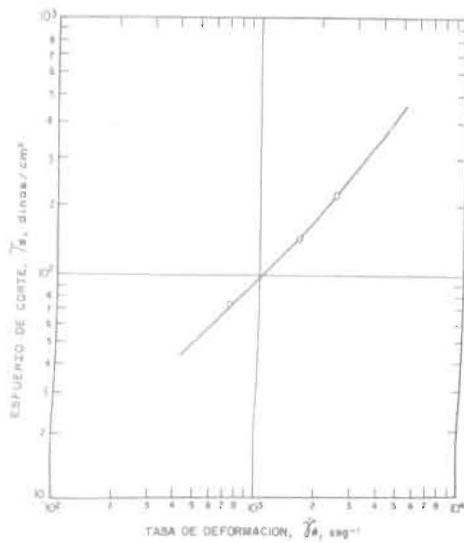


Fig. 5 - Gráfico de Esfuerzo de Corte (T_R) contra Tasa de Deformación ($\dot{\gamma}$) de la mezcla Boscán-Aceite 2, de viscosidad = 10.0 cp, para la Muestra No. 6.

Tabla 4

Valores de caída de presión Δp obtenidos experimentalmente para las mezclas usadas y, valores predichos a partir de la ecuación de Darcy usando los valores de permeabilidad obtenidas para las mezclas.

a) Mezcla Boscán-Aceite 2, Viscosidad (cp) = 10.0, Muestra No. 6 ($k = 296$ md)

q bombeo	q, (cm ³ /seg)	Δp exp (atms)	Δp (Darcy)	error relativo (%)
5	0.018	0.953	0.618	35.1
10	0.040	1.887	1.375	27.1
15	0.061	2.840	2.084	26.6

b) Mezcla Bachaquero II - Kerosene; Viscosidad (cp) = 4.0, Muestra No. 8 ($k = 339$ md)

q bombeo	q, (cm ³ /seg)	Δp exp (atms)	Δp (Darcy)	error relativo (%)
5	0.021	0.319	0.256	19.7
10	0.041	0.639	0.494	22.7
15	0.062	0.969	0.716	26.1

TABLA 1

CRUDOS USADOS Y SUS PROPIEDADES A TEMPERATURA AMBIENTE A 77°F

CRUDO	GRAVEDAD API	VISCOSIDAD (cp)	AGUA y SEDIMENTOS (%)
BOSCAN	10.2	46.400.0	3.0
BACHAQUERO II	13.6	6.500.0	0.0

TOMADA DE LA REFERENCIA 5

TABLA 2

SOLVENTES USADOS Y SUS PROPIEDADES A 77 °F

SOLVENTES	PUNTOS DE EBULLICION (°F)	VISCOSIDAD (cp)	°API
T-50	390	3.25	38.20
CORTE - 2	400	1.50	46.20
KEROSENE	362	2.50	37.20
ACEITE 2	370	6.50	27.70

TABLA 3

PORCENTAJE DE PRECIPITADO PARA MEZCLAS CON LOS DIFERENTES CRUDOS Y SOLVENTES USADOS

SOLVENTES	BACHAQUERO II (C)	BOSCAN (C)
T- 50	0.68	2.80
CORTE 2	2.03	3.82
KEROSENE	0.25	0.71
ACEITE 2	1.02	0.41

Tomada de la referencia 5

BIBLIOGRAFIA

1. Alvarado D.A., "The Flow of Macroemulsions thorough Porous Media", *Tesis de Ph.D.*, Departamento de Ingeniería de Petróleo, Stanford University, Mayo, 1975.
2. Alvarado, D.A., y Marsden, S.S. Jr., "Flow of Oil in-Water. Emulsions Through Tubes and Porous Media", Trabajo SPE No. 5859 presentado en la Reunión Anual Regional de California No. 46 SPE-AIME, Long Beach, Calif., 8-9 Abril, 1976.
3. David, A., "Asphaltene Flocculation During Solvent Stimulation of heavy Oils" Trabajo presentado ante la 71 reunión de AICHE, Febrero, 1972.
4. Ferrer, J.C., y Arteaga A.E., "Flujo de Mezclas de Petróleo Pesado en Medios porosos", *Trabajo Especial de Grado*, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Febrero, 1976.
5. Vega A.A., y González J.A., "Reducción de viscosidad de crudos pesados Mediante el uso de Solventes para fines de Transporte y Desplazamientos en Medios Porosos", *Trabajo Especial de Grado*, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Petróleo, Enero, 1976.
6. API, *Recommended Practice for Determining Permeability of Porous Media*, Mayo, 1935.
7. *Annual Book of ASTM Standards*, Método ASTM D 2042-66, 1972.