

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 1 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

Práctica 3. Desplazamiento inmiscible

Introducción

La generación de metodologías experimentales y la oferta de recursos didácticos, como las demostraciones de laboratorio, pueden contribuir al mejoramiento de los procesos de enseñanza. En esta práctica se presenta la metodología para llevar a cabo un experimento de desplazamiento inmiscible mediante la inyección de agua y aceite mineral con la finalidad de obtener las curvas de permeabilidad relativa. Para llevar a cabo esta práctica, alumnos y alumnas de la carrera de ingeniería petrolera participaron en el desarrollo de los experimentos con la celda de desplazamiento, la cual fue construida en el laboratorio de interacción roca-fluido y fluido-fluido (LIRFFF) del Departamento de Ingeniería Petrolera, producto del proyecto PAPIME 112020.

La celda de desplazamiento consiste en una bomba de doble pistón, una bomba de confinamiento y dos acumuladores. A partir de estos elementos principales y otros subsistemas es posible obtener información valiosa acerca de la dinámica y la eficiencia de la recuperación de fluidos. La caracterización de transmisión de fluidos a través de materiales porosos se realiza por desplazamiento transitorio. Durante una prueba de desplazamiento, la saturación o la composición se propagan a través del medio en la dirección del flujo, resultando en la variación de las propiedades de flujo del sistema roca - fluido.

Cuestionario previo

Investigue por su cuenta y conteste las preguntas siguientes antes de comenzar la práctica.

1. ¿Qué es la permeabilidad y cuáles son los tipos que existen? ¿Cómo se calcula?
2. ¿Qué factores afectan la permeabilidad de las rocas?
3. ¿Por qué es importante los cálculos de la permeabilidad en la Industria Petrolera?
4. ¿Qué es la saturación de agua residual?
5. ¿Qué es un volumen poroso? ¿Cómo se calcula?
6. ¿Por qué los fluidos llegan a ser inmiscibles entre sí?
7. Describa que es la viscosidad y su relación con la movilidad de fluidos.

Objetivo

Las y los alumnos de ingeniería petrolera obtendrán la permeabilidad absoluta, y efectiva utilizando datos de una prueba de desplazamiento, dichos datos también serán usados para construir las curvas de permeabilidad relativa al agua y al aceite de una muestra tipo tapón e

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 2 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

interpretarán las curvas para estimar la mojabilidad de la muestra por medio del análisis y discusión.

Materiales

- a) Roca berea
- b) Cortadora
- c) Lija
- d) Vernier
- e) Balanza analítica Ohaus
- f) Aceite mineral 500 [mL]
- g) Agua destilada 500 [mL]
- h) Agitador magnético
- i) Parrilla de agitación
- j) Matraz aforado de 10 [mL]
- k) Viscosímetro Brookfield
- l) Tensiómetro SITA
- m) Vaso de precipitados 50 [mL]
- n) Campana de vacío
- o) Celda de desplazamiento (capacidad de cada cilindro = 1000 [mL])
- p) Manga de hule (diámetro interior = 3.80 [cm], longitud = 5.79 [cm])

Desarrollo experimental

Se llevó a cabo una prueba de desplazamiento inmiscible de dos fases utilizando un tapón de berea, el cual es un afloramiento comercial. En la **Tabla 1** se muestran las propiedades de la roca y los fluidos utilizados en este experimento.

Tabla 1. Propiedades de los fluidos y roca para la prueba de desplazamiento inmiscible.

	Berea	Agua destilada	Aceite mineral
Densidad [g/cm ³]	2.104	1.00	0.84
Viscosidad [cP] @250 rpm	--	1.00	55.00
Tensión superficial [mN/m]	--	72.4	25.8
Porosidad [%]*	18–21	--	--
Permeabilidad [mD]*	80–120	--	--
Color	Gris	Incoloro	Incoloro

*Datos provistos por el proveedor; <https://kocurekindustries.com/our-products/berea-sandstone>

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 3 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

Procedimiento

A. Preparación de la muestra

1. Cortar la muestra de berea, las dimensiones finales de la muestra fueron las siguientes: diámetro interior = 3.80 [cm] y longitud = 5.79 [cm].
2. Lijar la base superior e inferior de la muestra de berea hasta que estén uniformes. Utilizar guantes para este paso y los siguientes que involucren manipular la muestra de roca.
3. Limpiar y cepillar la muestra de berea con ayuda de la brocha.
4. Pesar la muestra de berea en la balanza analítica Ohaus, medir su longitud y diámetro finales con el Vernier.
5. Colocar la muestra de roca dentro de un vaso de precipitados y llenarlo con agua destilada.
6. Ingresar el vaso de precipitados con la muestra en una campana de vacío para saturarla durante 3 días.
7. Después del tiempo transcurrido, retirar la muestra del agua y pesarla nuevamente.

B. Preparación del equipo de desplazamiento y montaje de la muestra

8. Colocar la muestra (previamente medida, pesada y saturada al vacío) dentro de la manga de hule.
9. Ingresar la manga en el portamuestras y verificar que la manga se encuentre a tope del cabezal ranurado (parte superior de la celda) y verificar lo mismo con la muestra.
10. Cerrar el portamuestras con el cabezal ranurado y enroscarlo completamente. Entonces, empujar a tope la línea de salida de los fluidos de trabajo.
11. Verter el agua destilada en uno de los dos acumuladores (12; **Figura 1**); con el fluido dentro del acumulador accionar la bomba HPLC P40 Knauer a 1 [mL/min], desplazar el fluido hacia las líneas de inyección y (eliminar el aire presente en éstas. Una vez terminada la purga, colocar un tapón al final de la línea de inyección (15; **Figura 1**).
12. Verter aceite mineral en el otro acumulador (12; **Figura 1**), accionar la bomba tipo HPLC P40 Knauer a 1 [mL/min] y repetir procedimiento del paso 11.
13. Purgar las líneas que transportan el aceite hidráulico utilizado para confinar la muestra y con ayuda de la bomba manual subir la presión a 2,000 [psi].

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 4 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

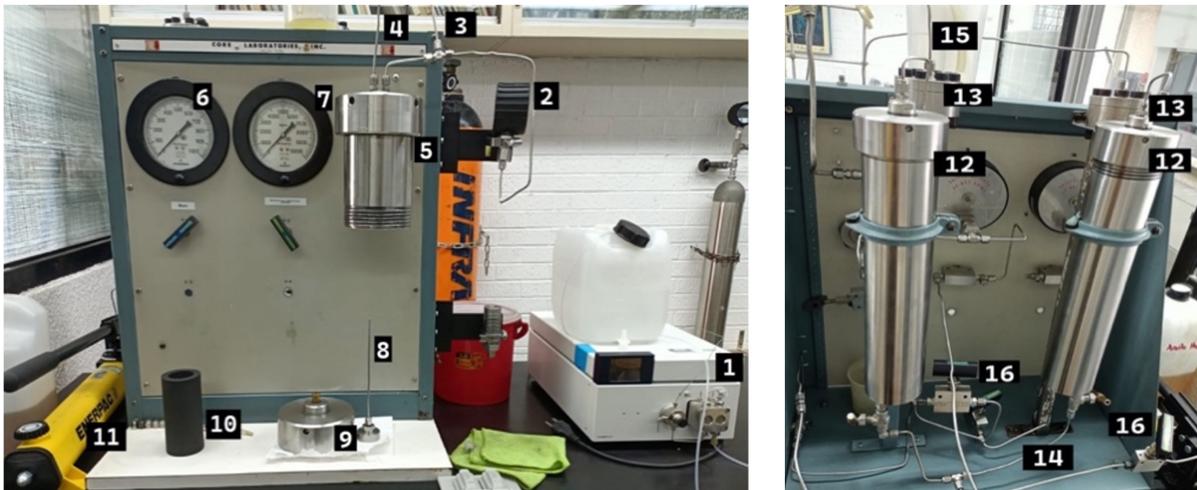


Figura 1. Componentes de la celda de desplazamiento. Parte delantera, arriba: (1) bomba de doble pistón (HPLC P40 Knauer), (2) manómetro conectado a la línea de flujo del fluido de trabajo, (3) línea de flujo del fluido de trabajo, (4) línea de flujo de un segundo fluido de trabajo, (5) celda donde se ingresa la muestra, (6) (7) manómetros¹, (8) línea de salida del fluido de trabajo, (9) cabezal ranurado, (10) manga de hule, (11) bomba de confinamiento (bomba manual). Parte trasera, debajo: (12) cilindros de almacenamiento de fluido de trabajo de capacidad de 1000 [mL], (13) filtros que impiden el paso de sólidos, (14) línea de flujo de aceite hidráulico, (15) línea de flujo del fluido de trabajo, (16) válvulas que permiten cerrar/abrir las líneas.

C. Prueba de desplazamiento

Inyección y desplazamiento de agua destilada

14. Retirar el tapón de la línea de inyección del agua destilada y conectarla a la celda de desplazamiento y abrir la válvula del acumulador para permitir el flujo de agua por las líneas de inyección.

15. Inyectar el agua a un flujo constante de 1 [mL/min] con la bomba HPLC P40 Knauer.

16. Colocar una probeta en la línea de salida para colectar el fluido desplazado por la roca. La probeta debe tener una capacidad menor (5 mL) que el volumen poroso ocupado. Cambiar de probeta tantas veces como sea necesario hasta que termine el desplazamiento.²

17. Registrar los valores de presión observados en el manómetro (2; **Figura 1**), cada 3

¹ El manómetro número 6 no está en operación. El manómetro 7 muestra la presión a la cual la muestra está confinada.

² El desplazamiento termina cuando fluyen 3 volúmenes porosos (VP) a través de la muestra. Para este caso 1VP = 12.75 cm³ de agua.

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 5 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

minutos hasta que la diferencia de presión se mantenga constante.³ Detener el gasto y cerrar la válvula del acumulador del agua destilada.

Inyección y desplazamiento de aceite mineral

18. Previo a la inyección de aceite, desplazar por 15 min el agua destilada, repitiendo el paso 13 de la sección B.

19. Una vez que la presión se mantiene estable, detener el gasto, cerrar la válvula del acumulador, desconectar la línea de inyección del agua destilada y colocar el tapón.

20. Retirar el tapón de la línea de inyección del aceite mineral y conectar la línea a la celda de desplazamiento. Abrir la válvula del acumulador permitiendo el flujo del aceite por las líneas de inyección.

21. Con la bomba tipo HPLC P40 Knauer, inyectar el aceite mineral a un flujo constante de 1 [mL/min].

22. Colectar el agua desplazada, a través de la roca, por la inyección de aceite utilizando probetas en la línea de salida. La probeta debe tener una capacidad menor (5 mL) que el volumen poroso ocupado. Cambiar de probeta tantas veces como sea necesario hasta que termine el desplazamiento.⁴

23. El paso 17 de la sección C se repite. Aplica para el acumulador del aceite mineral.

Inyección y desplazamiento de agua destilada

24. Previo a la inyección de agua, se desplaza el aceite remanente de la línea por 15 min. Repetir el paso 13, sección B.

25. Una vez que la presión se mantiene estable, detener el gasto, cerrar la válvula del acumulador, desconectar la línea de inyección del aceite mineral y colocar el tapón.

26. Retirar el tapón de la línea de inyección del agua destilada y conectarla a la celda de desplazamiento; abrir la válvula del acumulador para permitir el flujo del agua por las líneas de inyección.

27. Con la bomba tipo HPLC P40 Knauer, inyectar el agua a un flujo constante de 1 [mL/min].

28. Colectar el aceite desplazado, a través de la roca, por la inyección de agua utilizando probetas en la línea de salida. La probeta debe tener una capacidad menor (5 mL) que el volumen poroso ocupado. Cambiar de probeta tantas veces como sea necesario hasta que

³ ± 0.02 psi para bereas por 15 minutos

⁴ El objetivo es que se desplace el agua, lo que se comprueba al coleccionar la primera gota de aceite. Normalmente, debe hacerse fluir 3 volúmenes porosos (VP) a través de la muestra para asegurarse de que todo el fluido de interés ha sido desplazado. Para este caso 1VP = 12.75 cm³ de agua.

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 6 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

termine el desplazamiento.⁵

30. Registrar los valores de presión cada minuto hasta que la diferencia de presión se mantenga constante. Detener el gasto y cerrar la válvula del acumulador del agua destilada.

31. Desmontar y pesar la muestra.

NOTA: El procedimiento se puede ver en video disponible en la liga siguiente https://drive.google.com/file/d/1xcdt5x00URzAEt2QwrDcRto2O6Fd2rm9/view?usp=share_link

Resultados

Con los datos registrados se generaron las **Tablas 2, 3, 4 y 5**, las cuales se presentan a continuación. Dichas tablas serán utilizadas para contestar lo que se pide a continuación. En el anexo encontrará las ecuaciones necesarias para realizar los cálculos que se solicitan.

- a) Hacer tres tablas de permeabilidad absoluta (k) y efectiva al aceite (k_o) y efectiva al agua (k_w) por volúmenes porosos inyectados (VP_i) de fluido usando datos de las Tablas 3, 4 y 5. Para obtener los VP_i y k , utilice las expresiones siguientes. En el Anexo encontrará más detalles sobre los cálculos.

$$VP_i = \frac{t q}{VP_o}$$

$$k = \frac{q \mu L}{A \Delta P} [mD]$$

Donde $q = [cm^3/min]$; $\mu = [cP]$; $L = [cm]$; $A = [cm^2]$; $\Delta P = [psi]$. Obtenga el factor de conversión mediante el análisis dimensional para obtener unidades de miliDarcy [mD]. Utilice la información de **Tabla 2**. La densidad y viscosidad del agua condiciones ambiente.

- b) Elabore los gráficos de VP_i vs k , k_o y k_w con las tablas obtenidas en el inciso anterior ¿La permeabilidad se mantuvo constante, cambio? Detallar su respuesta.
- c) Comparar la permeabilidad absoluta promedio con las que se obtuvieron en el Práctica 2 “Desplazamiento miscible” (ver resultados abajo) con salmueras de cloruro de sodio, bromuro de sodio y glicerina. ¿A qué se deben las diferencias?

Permeabilidad absoluta a la salmuera de NaBr (K1)	113.524	[mD]
Permeabilidad absoluta a la salmuera de NaCl (K2)	81.503	[mD]
Permeabilidad absoluta a la la mezcla de salmuera y glicerina (K3)	58.000	[mD]

⁵ El objetivo es que se desplace la mayor cantidad de aceite, se dice que se alcanza la ruptura al colectar la primera gota de agua. Normalmente, debe hacerse fluir 3 volúmenes porosos (VP) a través de la muestra para asegurarse de que todo el fluido de interés ha sido desplazado. Para este caso $1VP = 12.75 \text{ cm}^3$ de agua.

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 7 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

d. Los datos adquiridos de la prueba de desplazamiento se utilizaron para construir las curvas de permeabilidad relativa al agua y al aceite presentadas en el archivo Excel “Práctica 3 Desplazamiento Inmiscible”. Observe las curvas de permeabilidad obtenidas en esta práctica (**Figura 2A**) y comente sobre las diferencias que existen en comparación con las curvas presentadas en la **Figura 2B**. En el Anexo encontrará las ecuaciones utilizadas para construir las curvas de permeabilidad relativa. También puede consultar el archivo Excel como material de apoyo.

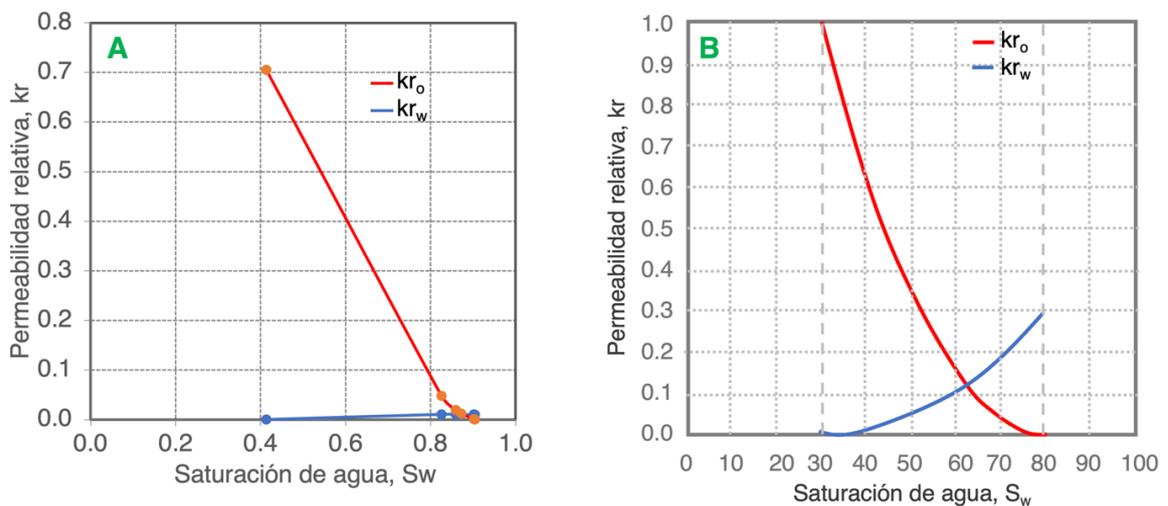


Figura 2. A Curvas de permeabilidad relativa agua-aceite obtenidas con datos de esta práctica. B Curvas de permeabilidad relativa agua-aceite, modificado de Crotti 2002.

Tabla 2. Características de la muestra de berea antes y después de la prueba de desplazamiento.

Diámetro	3.803	[cm]
Longitud	5.797	[cm]
Área de la roca	11.359	[cm ²]
Volumen de la roca	65.848	[cm ³]
Masa de la muestra seca	138.537	[g]
Masa de la muestra saturada al vacío	151.284	[g]
Diferencia de masa; entre muestra seca y saturada	12.747	[g]

Tabla 3. Datos de presión manométrica obtenidos durante la inyección de agua, sección A.

Tiempo [min]	Presión man [psia]
0	0
3	0.06
6	1
9	2.05

Tiempo [min]	Presión man [psia]
42	3.22
45	3.27
48	3.34
51	3.37

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 8 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

12	2.23
15	2.3
18	2.46
21	2.56
24	2.73
27	2.82
30	2.91
33	2.97
36	3.07
39	3.16

54	3.41
57	3.44
60	3.46
63	3.48
66	3.49
69	3.5
72	3.51
75	3.55

Tabla 4. Datos de presión manométrica obtenidos durante la inyección del aceite mineral, sección B.

Tiempo [min]	Presión man [psia]
0	0
3	12.5
6	26.1
9	44.9
12	63.7
15	65.4
18	63.1
21	60
24	57.3
27	55.4
30	53.9
33	52.8
36	51.6
39	51.1

Tiempo [min]	Presión man [psia]
42	50.4
45	49.8
48	49.2
51	48.7
54	48.3
57	47.8
60	47.4
63	47
66	46.8
69	46.5
72	46.2
75	36.3

Tabla 5. Datos de presión manométrica obtenidos durante la inyección de agua destilada, sección C. Continua en la página siguiente.

Tiempo [min]	Presión man [psia]
0	24.8
3	18.4
6	14.6
9	11.5
12	12.3
15	21.7
18	30.7
21	39.5
24	48.3
27	56.7

Tiempo [min]	Presión man [psia]
102	85.2
105	85.3
108	85.4
111	85.5
114	85.6
117	85.7
120	85.8
123	85.9
126	85.91
129	86

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 9 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

30	65.8
33	73.3
36	77.1
39	78.6
42	79.5
45	80.3
48	81
51	81.6
54	82.1
57	82.4
60	82.7
63	83
66	83.2
69	83.4
72	83.6
75	83.8
78	84
81	84.2
84	84.3
87	84.5
90	84.7
93	84.8
96	85
99	85.1

132	86.1
135	86.2
138	86.3
141	86.4
144	86.5
147	86.6
150	86.61
153	86.7
156	86.71
159	86.8
162	86.9
165	87
168	87.1
171	87.11
174	87.12
177	87.2
180	87.21
183	87.2
186	87.3
189	87.31
192	87.4
195	87.41
198	87.4
201	87.5

Nota: También puede consultar el archivo Excel para verificar que los cálculos realizados sean correctos. En este enlace se describe brevemente lo que se hizo en el archivo: https://drive.google.com/file/d/1YWbR2MPzns7-vYj9LkDW1AL_TiR88DP8/view?usp=share_link

Cuestionario de apoyo

Para mejorar esta práctica demostrativa agradecemos se conteste el cuestionario de apoyo siguiente:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScxPSYfyz8IRidZAKpQr5NgWVDXhv2fzTJF1dnSyleqUWGwuQ/viewform?usp=sf_link

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 10 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

Anexo: Cálculos

La permeabilidad es la capacidad que tiene el medio poroso para permitir el flujo de fluidos a través de los poros interconectados que se encuentran en él. En una prueba de desplazamiento la permeabilidad absoluta se determina saturando una muestra de núcleo al 100% de un fluido (A). Si se inyecta otro fluido (B) se puede estimar la permeabilidad efectiva del medio a B y la saturación residual en la roca. Al reinyectar el fluido A se puede determinar la permeabilidad efectiva del medio a este fluido y su saturación residual en la roca.

Esta propiedad se expresa matemáticamente como:

$$k = \frac{q \mu L}{A \Delta p} [mD]$$

k = permeabilidad, [mD]

q = gasto, [cm^3/seg]

μ = viscosidad, [cP]

L = longitud, [cm]

A = área, [cm^2]

ΔP = presión a la que está sometido el medio, [psi]

$$k = \left(\frac{1 \left[\frac{cm^3}{min} \right] \times 1 [cP] \times 5.797 [cm]}{11.359 [cm^2] \times 2.05 [psi]} \right) \times c [mD]$$

Nota: c es una constante para determinar la permeabilidad, la cual se obtiene a partir de la conversión de unidades y el análisis dimensional. ¿A cuánto equivale dicha constante si la permeabilidad es de 60.97 mD?

$$k = 60.9752 [mD]$$

Para obtener el volumen poroso ocupado (VP_o) y el volumen poroso inyectado (VP_i) se utilizan las expresiones siguientes

$$VP_o = \frac{masa_{muestra saturadas} - masa_{muestra seca}}{\rho_{fluido de trabajo}}$$

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 11 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

$$VP_o = \frac{151.284 [g] - 138.537 [g]}{1 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} = 12.747 [cm^3]$$

$$VP_i = \frac{t q}{VP_o}$$

$$VP_i = \frac{9[min] \times 1 \left[\frac{cm^3}{min} \right]}{12.747[cm^3]} = 0.7060$$

Para el estudio de la permeabilidad relativa se generarán curvas de permeabilidad vs la saturación por el método de Johnson-Bossler-Naumann (JBN), el cual se utiliza para el cálculo de las permeabilidades relativas individuales de los desplazamientos en estado estacionario. Este método supone que el núcleo es homogéneo y se desprecia la presión capilar y la gravedad. Como datos se utiliza el volumen de los fluidos producidos, la diferencia de presión. Los volúmenes porosos de agua inyectada (Q_{wi}), como fluido desplazante, se obtienen de la forma siguiente:

$$Q_{wi} = \frac{V_{tot_acum}}{VP}$$

Donde: Q_{wi} = volúmenes porosos de agua desplazante inyectada
 V_{tot_acum} = volumen total acumulado, [cm^3]
 VP = volumen poroso, [cm^3]

El flujo fraccional se define como la cantidad de un fluido producido con respecto a la cantidad de fluido inyectando, matemáticamente se expresa como:

$$f_{wL} = \frac{q_w}{q_o + q_w} \frac{\Delta t}{\Delta t}$$

Donde: q_w = gasto de agua
 q_o = gasto de aceite
 Δt = diferencia de tiempo

Recordando que el gasto (q) es el volumen (V), del fluido que fluye por un medio en un determinado tiempo (t),

$$q = \frac{V}{t}$$

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 12 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

Despejando al volumen y reescribiendo la fórmula en términos de volumen para determinar el flujo fraccional del agua y del aceite, se obtiene:

$$V = q t$$

$$f_{wL} = \frac{V_w}{V_o + V_w}$$

Donde: f_{wL} = flujo fraccional del agua a la salida
 V_w = volumen de agua, [cm^3]
 V_o = volumen de aceite, [cm^3]

$$f_{oL} = \frac{V_o}{V_o + V_w}$$

Donde: f_{oL} = flujo fraccional del aceite a la salida
 V_w = volumen de agua, [cm^3]
 V_o = volumen de aceite, [cm^3]

Al inyectar un fluido en un medio poroso se presenta una interacción entre dos fases, es decir, la fase desplazada A, se encontraba saturando al medio, y la fase desplazante B, se inyecta para mover al fluido que ocupa el medio. A medida que B penetra varias zonas y expulsa a A, las saturaciones del medio poroso cambian conforme avanza el desplazamiento. La saturación de la fase desplazada disminuye, mientras que la saturación de la fase desplazante aumenta. Por lo anterior, se deduce que la saturación cambia con el tiempo al mantener constante la inyección, además, la saturación no es la misma a la entrada, parte media y a la salida de los fluidos, ya que las zonas cercanas al extremo de salida son las últimas en ser invadidas. Asumiendo que el agua es la fase desplazante, la saturación de agua promedio en el medio es:

$$\bar{S}_w = S_{wr} + \frac{V_{o_desplazado}}{VP}$$

Donde: \bar{S}_w = saturación promedio de la fase desplazante (agua), [*adim*]
 S_{wr} = saturación de agua residual, [*adim*]
 $V_{o_desplazado}$ = volumen de aceite desplazado, [cm^3]
 VP = volumen poroso, [cm^3]

Para la saturación a la salida de la roca (la aproximación de Welge):

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 13 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

$$S_{wL} = \bar{S}_w - Q_{wi} f_{oL}$$

Donde: S_{wL} = saturación de la fase desplazante a la salida de la muestra
 \bar{S}_w = saturación promedio de la fase desplazante, [adim]
 V_{o_despl} = volumen de aceite desplazado, [cm³]
 Q_{wi} = volúmenes porosos de agua desplazante inyectada
 f_{oL} = flujo fraccional del aceite a la salida

La inyectividad relativa (I_r) se describe en términos de la capacidad de admisión de un fluido en un medio. Éste se determina a partir de las mediciones de caudal y caída de presión tomadas en una prueba desplazamiento y matemáticamente se expresa como :

$$I_r = \frac{\left(\frac{q}{\Delta P}\right)}{\left(\frac{q}{\Delta P}\right)_i}$$

Donde: I_r = inyectividad relativa
 q = caudal de inyección $\left[\frac{cm^3}{seg}\right]$
 ΔP = cambio de presión [psi]
 $\left(\frac{q}{\Delta P}\right)$ = capacidad de admisión en cualquier punto de la inyección
 $\left(\frac{q}{\Delta P}\right)_i$ = capacidad de admisión al iniciar la inyección, sólo fluye aceite a través del sistema en presencia de agua inmóvil

La permeabilidad relativa individual para agua y aceite en el medio poroso pueden determinarse en cualquier instante del desplazamiento. La permeabilidad relativa al aceite está dada por:

$$K_{roL} = f_{oL} \frac{d\left[\frac{1}{Q_{wi}}\right]}{d\left[\frac{1}{Q_{wi} I_r}\right]}$$

Donde: K_{roL} = permeabilidad relativa del aceite a la salida
 f_{oL} = flujo fraccional del aceite a la salida
 I_r = inyectividad relativa
 Q_{wi} = volúmenes porosos de agua desplazante inyectada

La permeabilidad relativa al agua está dada por:

$$K_{rwL} = K_{roL} \frac{\mu_w(1 - f_{oL})}{\mu_o f_{oL}}$$

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 14 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

Para efectos prácticos en la determinación de las curvas de permeabilidad y su representación gráfica, se define la siguiente relación de cocientes:

$$\frac{K_{rWL}}{K_{roL}} = \frac{\mu_w (1 - f_{oL})}{\mu_o f_{oL}}$$

Considerando que: $(1 - f_{oL}) = f_{wL}$

$$\frac{K_{rWL}}{K_{roL}} = \frac{\mu_w f_{wL}}{\mu_o f_{oL}}$$

Donde:

- K_{rWL} = permeabilidad relativa del agua a la salida
- K_{roL} = permeabilidad relativa del aceite a la salida
- μ_w = viscosidad del agua
- μ_o = viscosidad del aceite
- f_{oL} = flujo fraccional del aceite a la salida
- f_{wL} = flujo fraccional del agua a la salida

Bibliografía

Dandekar, A.Y. (2013, febrero 21). Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties (2nd ed.). CRC Press.

Ahmed, T. (2019, enero 3). Reservoir Engineering Handbook (5th ed.). Gulf Professional Publishing.

Tiab, D.; Donaldson, E. C. (2015, septiembre 23) *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties* (4th ed.) Gulf Professional Publishing.

Johnson, E.F.; Bossler, D.P.; Naumann Bossler, V.O. (1959) Calculation of Relative Permeability from Displacement Experiments, Petroleum Transactions, AIME, 216, 370–372.

Crotti, M. (2002, julio 22) Promedios de curvas de Permeabilidad relativa. Primera Parte: Desplazamientos no-estacionarios. http://www.inlab.com.ar/Prom_Curv_KR_1.htm (Consultada en 12 de febrero de 2023)

Ennyta. (2017) Determinación de la Permeabilidad de las Rocas a través de Diversos Permeámetros. <https://steemit.com/spanish/@ennyta/determinacion-de-la-permeabilidad-de-las-rocas-a-traves-de-diversos-permeametros>. (Consultada en 11 de febrero de 2023)

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 15 de 15
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Diciembre 2022

Agradecimientos

Esta práctica y el material didáctico asociado a ésta se llevó a cabo con el apoyo del proyecto PAPIME PE112020 “Diseño y construcción de una celda de desplazamiento para favorecer el aprendizaje en Ingeniería Petrolera”



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.