

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 1 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

Práctica 1. Determinación de permeabilidad y porosidad de una muestra de arenisca

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 la determinación de la porosidad (Φ) y la permeabilidad absoluta (K) de una muestra de roca, utilizando agua destilada como fluido de trabajo. Algunos 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; además, de obtener datos primarios para determinar tanto la permeabilidad absoluta como la permeabilidad relativa de un sistema fluido-fluido. . La permeabilidad absoluta es una propiedad fundamental que cuantifica la capacidad de una roca (o medio poroso) para que un fluido fluya a través de ésta.

Cuestionario previo

1. ¿Qué es la porosidad?
2. Menciona los tipos de porosidades.
3. ¿Qué es la permeabilidad?
4. ¿Cuáles son las diferencias entre permeabilidad absoluta, efectiva y relativa?
5. ¿Qué es un volumen poroso?
6. Menciona la ley de Darcy y escribe su fórmula.
7. ¿La ecuación de Darcy representa el flujo de fluidos en un yacimiento? ¿por qué?

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 2 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

Objetivo

Las y los alumnos determinarán la porosidad y permeabilidad absoluta de una muestra de arenisca comercial usando una celda de desplazamiento y compararán sus propiedades con las reportadas por el proveedor para analizar las diferencias y similitudes entre datos.

Materiales

- Roca berea (diámetro = 3.81 [cm], longitud = 6.35 [cm])
- Cortadora
- Lija
- Brocha
- Vernier¹
- Balanza analítica Ohaus
- Agua destilada 500 [mL]
- Vaso de precipitados 50 [mL]
- Campana de vidrio
- Bomba de vacío
- Manga de hule (diámetro interior = 3.81 [cm], longitud = 5.08 [cm])
- Celda de desplazamiento (capacidad de cada cilindro = 1000 [mL])
- Probetas de 10, 25 y 50 [mL]
- Papel absorbente
- Guantes de nitrilo

Desarrollo experimental

La prueba de desplazamiento se llevó a cabo para determinar la porosidad (Φ) y la permeabilidad (K) de una muestra de roca berea, utilizando agua destilada. La muestra de roca es un afloramiento comercial, obtenida de un proveedor en Caldwell, Texas. Las propiedades reportadas por el proveedor se muestran en la Tabla 1. A continuación, se describen los pasos para la preparación de la muestra, su montaje en la celda y el desarrollo de la prueba de desplazamiento. La celda fue construida en el laboratorio de interacción roca-fluido y fluido-fluido (LIRFFF) del Departamento de Ingeniería Petrolera, producto del proyecto PAPIME 112020, ver Figura 1. En el video siguiente se puede ver paso a paso el desarrollo del procedimiento; https://drive.google.com/file/d/1Z4uDBPELgwPcDA-tmq59suGHohl3j0ua/view?usp=share_link

¹ Uso adecuado de Vernier: [Cómo usar el Calibrador o Vernier | MecánicaTotal](#)

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 3 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

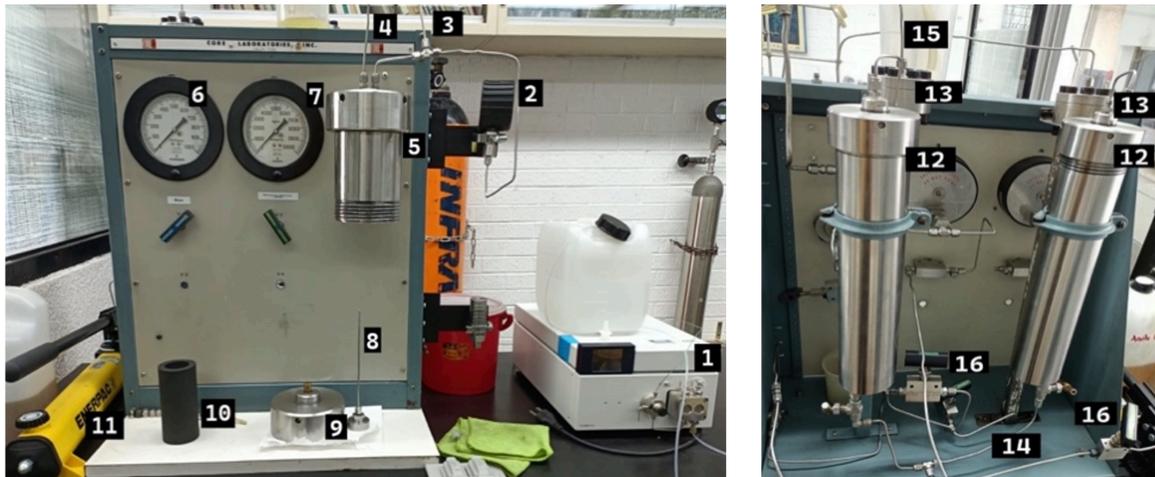


Figura 1. Componentes de la celda; parte delantera: (1) bomba de doble pistón (HPLC P40 Knauer), (2) manómetro conectado a la línea del fluido de trabajo, (3 y 4) líneas de flujo de fluidos de trabajo², (5) portamuestras (6) (7) manómetros³, (8) línea de salida del fluido de trabajo con cabezal ranurado, (9) tapa del efluente del portamuestras, (10) manga de hule, (11) bomba de confinamiento (bomba manual). Parte trasera, debajo: (12) cilindros de almacenamiento de fluido de trabajo, (13) filtros, (14) línea de flujo de aceite hidráulico, (15) línea de flujo del fluido de trabajo, (16) válvulas.

Tabla 1. Permeabilidad y porosidad reportadas por Kocurek Industries. *Recuperado de:*
<https://kocurekindustries.com/our-products/berea-sandstone>

	Permeabilidad	80-100 [mD] KCl, 200-230 [mD] N ₂
	Porosidad	18-21%
	Homogénea	Sí

² La línea 4 no se emplea en este experimento ya que solo se hace el desplazamiento de un fluido.

³ El manómetro número 6 no está en operación. El manómetro 7 muestra la presión a la cual la muestra está confinada.

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 4 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

Procedimiento

A. Preparación de la muestra

1. Cortar la muestra de berea tomando en cuenta que debe cumplir con las dimensiones siguientes: diámetro interior = 3.81 [cm] y longitud = 6.35[cm].
2. Lijar la base superior e inferior de la muestra de berea hasta que estén uniformes. Utilizar guantes
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 con el Vernier.
5. Colocar la muestra en el vaso de precipitados de 50 [mL] y verter agua destilada hasta que la muestra esté cubierta por completo.
6. Colocar el vaso de precipitados 50 [mL] con la muestra de roca en la campana de vidrio y acoplar la bomba de vacío para reducir la presión del sistema y saturar la roca por 3 días.⁴
7. Retirar el vaso de precipitados del vacío y sacar muestra de roca del agua destilada. Pesar nuevamente la muestra en la balanza analítica Ohaus.

B. Montaje de la muestra y preparación de la celda de desplazamiento

8. Colocar la muestra del paso 7 dentro de la manga de hule. Utilizar guantes
9. Introducir la manga en el portamuestras, verificando 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 puertamuestras con el cabezal ranurado y una vez enroscado completamente, empujar a tope la línea de salida de los fluidos de trabajo, para asegurar que la muestra esté en contacto con la superficie de salida de fluidos.
11. Purgar la línea que transporta el aceite hidráulico utilizado para confinar la muestra;

⁴ La bomba de vacío no está conectada al sistema todo el tiempo, sino que se conecta por periodos de tiempo cortos varias veces en esos días.

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 5 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

esto se logra haciendo fluir aceite hidráulico con la bomba manual hasta observar que en la línea (14, Figura 1) no presenta burbujas de aire.

12. Encender bomba HPLC P40 Knauer inyectando a un flujo de 5 [mL/min] agua destilada por la línea de flujo (3, Figura 1) para purgar y detener la bomba hasta que el volumen inyectado sea igual al que se obtiene a la salida de la línea de flujo (efluente).

C. Prueba de desplazamiento

13. Confinar la muestra a 2,000 [psi] con ayuda de la bomba manual.
14. Colocar una probeta debajo de la línea de salida de fluidos de trabajo para contabilizar los volúmenes porosos desplazados. Cambiar la probeta cuando ésta se llene.
15. Inyectar a gasto constante de 1.0 [mL/min] (caso A) el agua destilada con ayuda de la bomba tipo HPLC P40 Knauer. Registrar los valores de presión observados en el manómetro conectado a la línea 3 (ver Figura 1) cada minuto hasta que la diferencia de presión se mantenga constante (± 0.02 psi para la berea) por 5 minutos.⁵
16. Inyectar a gasto constante de 1.5 [mL/min] (caso B) el agua destilada con ayuda de la bomba tipo HPLC P40 Knauer. Registrar los valores de presión observados en el manómetro, cada 3 minutos hasta que la diferencia de presión se mantenga constante (± 0.02 psi para la berea) por 10 minutos.⁶
17. Detener la inyección de fluido apagando la bomba HPLC P40 Knauer, paso 15, y cerrar las líneas de flujo.
18. Desenroscar el cabezal ranurado inferior de la celda y retirar el aceite hidráulico con el

⁵ En las pruebas para la industria, la diferencia de presión de ± 0.02 [psi] para muestras berea debe mantenerse constante por al menos 20 minutos, o bien por lo menos fluir un mínimo de 5 volúmenes porosos antes de dictaminar que la diferencia de presión se mantiene constante. Para esta práctica se tenía el tiempo limitado por lo que el procedimiento se ajustó a 2 horas aproximadamente.

⁶ El gasto de inyección puede variar dependiendo del tipo de muestra y fluido de trabajo. Para muestras de carbonato el gasto de inyección puede seleccionarse en [0.5 mL/min] considerando agua como fluido de trabajo. Para las bereas el gasto debe mantenerse por debajo de los [2mL/min] para evitar daño y producción de finos durante la prueba.

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 6 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

cual se confinó la muestra.

19. Retirar la manga de hule de la celda y con mucho cuidado extraer la muestra de berea.

20. Colocar la muestra de berea en la balanza analítica Ohaus para pesarla.

Resultados

Con los datos registrados durante el procedimiento se generaron las **Tablas 2 y 3**, las cuales contienen propiedades de la muestra de roca berea antes y después de la prueba de desplazamiento. Utilizando la información de dichas tablas, realizar las actividades siguientes. En el Anexo se encuentran ecuaciones de apoyo

- a) Haga un gráfico de la presión con respecto al tiempo, usar los datos del caso B de la **Tabla 2**. ¿A partir de qué tiempo se estabiliza la presión? Nota: la presión varía por arriba y debajo de un valor y se estabiliza cuando la diferencia de presión es igual a ± 0.01 [psi], en este caso por 10 [min].
- b) ¿Cuál es la porosidad efectiva, en porcentaje, de la muestra de berea utilizada en este experimento? Utilizar la fórmula:

$$\phi = \frac{\text{Volumen ocupado por agua destilada}}{\text{Volumen de la roca}}$$

- c) ¿Cuál es la permeabilidad absoluta en [mD] de la muestra de berea al agua destilada para el caso B? Utilizar la ecuación de Darcy y la presión en términos absolutos. Considerar cuando la diferencia de presión es constante.
- d) Completar la **Tabla 4** y comparar los resultados con los reportados por el proveedor en **Tabla 1**, ¿a qué podrían deberse las diferencias observadas?
- e) ¿Es posible utilizar los datos del caso A (ver **Tabla 2**) para determinar la permeabilidad? ¿Por qué?

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 7 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

Tabla 2. Lecturas del manómetro conectado a la línea de flujo del fluido de trabajo durante la prueba de desplazamiento a 1.0 [mL/min] (A) y 1.5 [mL/min] (B).

Tiempo [min]	Δ Presión [psia]	Δ presión [psi] entre lecturas			
0	0.53	0	30	3.25	0.07
1	2.28	1.75	33	3.31	0.06
2	2.44	0.16	36	3.37	0.06
3	2.43	0.01	39	3.41	0.04
4	2.42	0.01	42	3.46	0.05
5	2.42	0	45	3.51	0.05
6	2.42	0	48	3.58	0.07
7	2.42	0	51	3.65	0.07
8	2.42	0	54	3.7	0.05
9	2.42	0	57	3.76	0.06
10	2.42	0	60	3.79	0.03
11	2.5	0.08	63	3.81	0.02
12	2.5	0	66	3.86	0.05
13	2.49	0.01	69	3.9	0.04
14	2.5	0.01	72	3.94	0.04
15	2.5	0	75	3.95	0.01
			78	3.99	0.04
			81	4.05	0.06
			84	4.06	0.01
			87	4.09	0.03
			90	4.12	0.03
			93	4.13	0.01
			96	4.13	0
			99	4.12	0.01
			102	4.11	0.01
			105	4.1	0.01

Tiempo [min]	Δ Presión [psia]	Δ presión [psi] entre lecturas
B: [1.5mL/min]; registro cada tres minutos		
18	2.94	0.44
21	3.03	0.09
24	3.13	0.1
27	3.18	0.05

Tabla 3. Datos de la muestra de roca y fluido de trabajo para la prueba de desplazamiento.

Propiedades de la muestra de berea	
Diámetro	3.81 [cm]
Longitud	6.35 [cm]
Masa en seco	152.197 [g]
Área	11.40 [cm ²]
Volumen	72.40 [cm ³]
Masa muestra saturada	165.868 [g]
Diferencia de masas	13.67 [g]
Volumen poroso (ocupado por el fluido)	13.67 [cm ³]
Propiedades agua destilada	
Viscosidad	1 [cP]
Densidad	1 [g/cm ³]

	Diseño y construcción de una celda de desplazamiento	Entidad académica	Facultad de ingeniería
		Versión	1.0
		Página	Página 8 de 9
		Clave proyecto	PE112020
		Fecha de emisión	Octubre 2022

Tabla 4. Comparación de las propiedades de la muestra de berea reportadas por el proveedor y las obtenidas con los datos de laboratorio.

	Valores conocidos	Valores obtenidos
Permeabilidad	80 -100 [mD] KCl 200 - 230 [mD] N ₂	
Porosidad	18-21%	

Cuestionario de apoyo

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

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc7Xt5zEAF85BWC25IJ7BqBpHBSMxN0Jv2Acq71Rj_NwI7H3w/viewform?usp=sf_link

Anexo: Cálculos

Cálculo del volumen de la muestra de berea:

$$V = \frac{\pi d^2 h}{4} = \frac{\pi \times 3.81[cm]^2 \times 6.35[cm]}{4} = 72.40 [cm^3]$$

Cálculo de la diferencia de masa entre la roca seca y la roca saturada (al final del experimento).

$$\begin{aligned} \text{Masa ocupada} &= \text{masa muestra saturada} - \text{masa en seco} \\ \text{Masa ocupada} &= 165.868 [g] - 152.197 [g] = 13.67 [g] \end{aligned}$$

Cálculo del volumen poroso ocupado por el agua destilada en la muestra de roca.

sabemos que $\rho = \frac{m}{v}$ por lo que despejando el volumen:

$$V = \frac{\text{Masa ocupada}}{\rho_{\text{agua destilada}}} = \frac{13.67 [g]}{1 \left[\frac{g}{cm^3} \right]} = 13.67 [cm^3]$$

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

Bibliografía

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

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

Enlaces de apoyo

Uso del vernier

<https://www.youtube.com/watch?v=Fl1MqK3VztE>

Kocurek Industries

<https://kocurekindustries.com/our-products/berea-sandstone>

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.