

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y
PETRÓLEOS**

**PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE TASA DE
IMBIBICIÓN Y VOLUMEN POROSO POR MEDIO DE IMBIBICIÓN
ESPONTÁNEA EN UN SISTEMA ROCA-AGUA-AIRE**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
PETRÓLEOS**

FREDI FERNANDO CAMPUÉS IPIALES

fredicampues01@gmail.com

DIRECTOR: MSc. JOANA SALOMÉ MARTÍNEZ VILLARREAL

joana.martinez@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, Fredi Fernando Campués Ipiales declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

FREDI FERNANDO CAMPUÉS IPIALES

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Fredi Fernando Campués Ipiales, bajo mi supervisión.

JOANA SALOMÉ MARTÍNEZ VILLARREAL
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Fredi Fernando Campués Ipiales

MSc. Joana Salomé Martínez Villarreal

DEDICATORIA

*El tiempo con su ritmo feroz me ha tenido a la deriva
En cada uno de sus minutos he gozado numerosas alegrías,
En cada una de sus horas he llorado dolorosas agonías y
En cada uno de sus días he luchado con vigorosa valentía.*

*Mas como cualquier ser el tiempo me ha marcado
Con la prematura partida de un amado hermano
Que se perdió en las arenas de un precoz reloj dañado.*

*Hace lejanos años en contra del tiempo me había revelado
Guardando una imborrable promesa hacia mi perdido hermano
De lograr cumplir con aquellos sueños que él había dejado.*

*Mi palabra sigue en pie y aquí dejo constancia de aquella promesa
Hoy en contra del mismo tiempo uno de tus sueños materializo
Es aquel que guardé cuando me despedí con tanta tristeza
Por tal motivo este pequeño escrito a ti amado hermano te lo dedico.*

Este texto va dedicado a la memoria de Carlos Alberto Campués Ipiales cuyo espíritu seguirá vivo hasta el final de los tiempos.

AGRADECIMIENTO

Estoy agradecido con Dios por darme a mis amorosos padres y hermanos con los que siempre puedo contar. La mami (María Beatriz Ipiales), el Papi (Luis Alberto Campués), Pipin (Jonathan Campués), Lobo (Geovanny Campués) y el Perrucho (Maximilian Campués) son la parte más importante de mi vida y a quien agradezco con todo mi corazón. Agradezco enormemente a mis padres, quienes han dedicado sus vidas al trabajo arduo con el propósito de otorgarnos el regalo más valioso: la educación. A Pipin, quien ha postergado sus propios sueños para contribuir al cumplimiento de los míos. A Geovanny, siempre alentándome sin importar las circunstancias. Y al Perruchito quien es mi mejor amigo y la alegría más grande que he tenido estos últimos 8 años.

Además, deseo manifestar mi profundo agradecimiento hacia la Ingeniera Joana Martínez, quien me ha ofrecido su apoyo a lo largo de mi trayectoria académica y a quien puedo describir como una destacada figura en el ámbito profesional, docente y, sobre todo, como una valiosa amiga. También, quiero expresar mi reconocimiento al Ingeniero William Paucar, cuyo respaldo, consejos y actitud siempre dispuesta lo han convertido en un buen amigo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3 ALCANCE	2
1.4 FORMACIÓN SOCORRO	2
1.4.1 UBICACIÓN.....	2
1.4.2 LITOLOGÍA.....	3
1.5 PROPIEDADES DE LA ROCA	4
1.5.1 POROSIDAD	4
1.5.1.1 MÉTODO DE MEDIDA DE POROSIDAD POR SATURACIÓN.....	4
1.5.2 PERMEABILIDAD.....	5
1.5.3 SATURACIÓN	5
1.5.4 MOJABILIDAD.....	5
1.5.5 PRESIÓN CAPILAR	6
1.6 CURVA DE PRESIÓN CAPILAR Y PROCESOS DE DESPLAZAMIENTO.....	7
1.6.1 IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA.....	7
1.6.1.1 EXPERIMENTOS DE IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA DE ACUERDO A LAS CONDICIÓN DE FRONTERA.....	8
1.6.1.2 MODELO DE IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA AFO.....	8
1.6.1.2.1 MODELO DE IMBIBICIÓN CILÍNDRICA PARA MUESTRAS LARGAS..	9
1.7 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	11
1.7.1 TENSIÓN SUPERFICIAL E INTERFACIAL	11
1.7.2 VISCOSIDAD.....	12
1.8 PROCESOS DE SEPARACIÓN DE FASES ENTRE FLUIDO Y SÓLIDO	12
1.8.1 FLOTACIÓN	12
1.8.1.1 FUERZA DE EMPUJE	12

1.8.1.1.1 DCL PARA MUESTRA QUE EXPERIMENTA UNA FUERZA DE EMPUJE	13
1.9 CONSIDERACIONES PROBABILÍSTICAS	14
1.9.1 ERROR RELATIVO PORCENTUAL	14
1.9.2 MUESTREO	15
1.10 SURFACTANTES	15
CAPÍTULO 2.....	17
2.1 METODOLOGÍA.....	17
2.1.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	17
2.1.2 ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	17
2.2 ARREGLO BALANZA-MUESTRA-AGUA	17
2.2.1 BALANZA DE ALTA PRESICIÓN	18
2.2.2 SOPORTE DE BALANZA	20
2.2.3 INSTRUMENTO TIPO ASCENSOR.....	20
2.3 MONTAJE Y CALIBRACIÓN DEL ARREGLO	21
2.4 INICIALIZACIÓN	22
2.5 CORRECIÓN DE PESO IMBIBIDO POR SUMERGENCIA	22
2.5.1 A LA SUMERGENCIA ($t=0$)	22
2.5.2 DESPUÉS DE LA SUMERGENCIA ($t > 0$).....	23
2.5.3 CORRECCIÓN	23
2.6 TRATAMIENTO DE DATOS DE PESO IMBIBIDO	24
2.7 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN POROSO	25
2.8 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PESO IMBIBIDO EN MUESTRAS TRATADAS CON SURFACTANTE	25
CAPÍTULO 3.....	26
3.1 RESULTADOS.....	26
3.1.1 MUESTRAS.....	26
3.1.2 PUESTA EN INICIO.....	26
3.1.3 DATOS OBTENIDOS.....	29
3.1.4 CURVAS DE PESO Y TASA DE IMBIBICIÓN VS TIEMPO	32
3.1.5 DETERMINACIÓN DE VOLUMEN POROSO	40
3.1.6 PRUEBAS EN MUESTRAS TRATADAS CON SURFUCTANTE HIDROFÓBICO	41
CAPÍTULO 4.....	44
4.1.1 CONCLUSIONES	44
4.1.2 RECOMENDACIONES	45
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46

RESUMEN

El estudio de desplazamiento entre el gas y el agua causado por la imbibición en yacimientos de gas desempeña un papel sumamente importante en el desarrollo de hidrocarburos ya que la imbibición está inmersa en fenómenos como la invasión de reservorios, el bloqueo de gas por agua y el efecto negativo de la imbibición al provocar la intrusión de agua en los bordes y en el fondo de los reservorios fracturados. Para contribuir a esta importante temática se ha desarrollado un procedimiento de laboratorio que explica cómo llevar a cabo una prueba de imbibición espontánea usando muestras cuyas caras estaban en completo contacto con el fluido mojante. Se aplicó imbibición espontánea a muestras de la formación Socorro de Ancón que fueron seleccionadas debido a su proximidad al yacimiento de gas de ecuatoriano. En este estudio se ensambló un arreglo balanza-muestra-agua que permitió la recopilación de datos de peso, tasas de imbibición y tiempo. Estos datos posteriormente se utilizaron para crear representaciones gráficas que mostraron el comportamiento de estas variables con el tiempo. Además, a partir de los datos obtenidos se midió el volumen poroso de imbibición por el fluido mojante usando el método de saturación. Finalmente, al disponer de un procedimiento funcional y replicable se alteró la movilidad del agua en las muestras con la aplicación de un surfactante hidrofóbico para comparar el efecto de esta sustancia en el peso de imbibición.

PALABRAS CLAVE: imbibición, bloqueo por agua, surfactante hidrofóbico.

ABSTRACT

The study of displacement between gas and water caused by imbibition in gas reservoirs plays an extremely important role in hydrocarbon development, as imbibition is intertwined with phenomena such as reservoir invasion, gas blocking by water, and the negative impact of imbibition by causing water intrusion at the edges and bottom of fractured reservoirs. To contribute to this significant topic, a laboratory procedure has been developed that explains how to conduct a spontaneous imbibition test using samples with faces in complete contact with the wetting fluid. Spontaneous imbibition was applied to samples from the Socorro of Santa Elena formation, which were selected due to their proximity to the Ecuadorian gas reservoir. In this study, a setup of balance-sample-water was assembled, allowing the collection of data on weight, imbibition rates, and time. These data were subsequently used to create graphical representations that depicted the behavior of these variables over time. Additionally, based on the obtained data, the imbibed porous volume by the wetting fluid was measured using the saturation method. Finally, with a functional and replicable procedure in place, the water mobility in the samples was altered by applying a hydrophobic surfactant to compare its effect on the imbibition weight.

KEYWORDS: imbibition, water blocking, hydrophobic surfactant.

CAPÍTULO 1

1 GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN

Se desarrolla un procedimiento que detalla los pasos a seguir en la adquisición de datos de la tasa de imbibición y la estimación de volumen poroso por medio de imbibición espontánea en un sistema roca-agua-aire aplicado a muestras de la formación Socorro de Ancón ubicada en la costa ecuatoriana. Para esto se monta un arreglo balanza-muestra-agua, el cual pretende describir imbibición espontánea (Li & Horne, 2001). En este arreglo el fluido newtoniano incompresible fluye por toda la superficie de la muestra cuando esta se encuentra sumergida en el fluido bajo la influencia de la presión capilar (Xu et al., 2011). La balanza de alta precisión mide las variaciones de peso en la muestra con el pasar del tiempo. Este procedimiento es repetido varias veces (2 veces en 5 muestras diferentes) hasta alcanzar un valor de peso constante. Posteriormente, los valores son registrados y se genera una curva de peso vs tiempo. Por otro lado, también se emplea esta técnica para determinar el volumen poroso imbibido de la muestra al considerar el volumen de fluido absorbido por esta. El volumen se determina mediante el peso y la densidad de la muestra, es decir, restando el peso seco que se dispone al inicio menos el peso saturado que se tiene al final de la prueba. También, se desarrolla un análisis comparativo del peso de imbibición al variar la mojabilidad de la muestra, esto se lo lleva a cabo con ayuda de un surfactante hidrofóbico de tal manera que la movilidad del agua se vea afectada. Finalmente, se realiza el análisis de los resultados los cuales de acuerdo a su confiabilidad permiten validar la eficacia y replicabilidad del procedimiento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar un procedimiento experimental para la determinación del peso y tasa de imbibición y volumen poroso por medio de imbibición espontánea en un sistema roca-agua-aire.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Montar un arreglo balanza-muestra-agua para determinar datos de peso y tasa de imbibición con el pasar del tiempo.
- Experimentar imbibición espontánea en muestras de la formación Socorro para la obtención de datos de peso y tasa de imbibición.

- Comparar el peso de imbibición obtenida con nuevos valores de peso de imbibición al variar la humectabilidad de la muestra con la ayuda de un surfactante.

1.3 ALCANCE

La medición de la tasa de imbibición se realizará mediante el montaje de un arreglo balanza-muestra-agua y a partir de los resultados obtenidos se validará un procedimiento para la toma de datos de peso y tasa de imbibición y cálculo de volumen poroso de imbibición en el laboratorio. La experimentación se realizará en muestras de la formación Socorro de Santa Elena.

1.4 FORMACIÓN SOCORRO

1.4.1 UBICACIÓN

La formación Socorro se encuentra en Ancón, está ubicada en los acantilados de esta parroquia dentro de las áreas Ancón y Cacique, en la parte septentrional de la península de Santa Elena, a unos 15 kilómetros de la vía que conecta Guayaquil y Salinas. Esta parroquia dispone de una superficie de 78 km², limita al norte con Santa Elena, al sur con el océano Pacífico, al este con la parroquia Atahualpa, y al oeste con la Parroquia Antoncito. En la Figura 1, se puede evidenciar la ubicación del área de afloramientos de la formación Socorro.

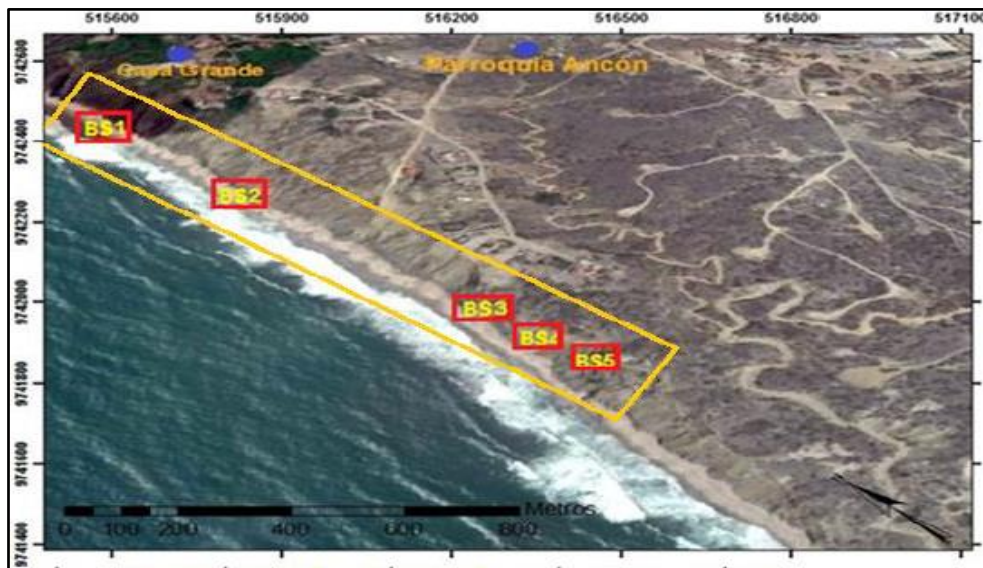


Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio de los afloramientos de la formación Socorro.

Fuente: (Cuadros, 2018).

1.4.2 LITOLOGÍA

Litológicamente, en la Formación Socorro predominan arcillolitas y areniscas. Las areniscas son de grano fino a grueso masivas y laminadas. En la base de la formación Socorro se han reconocido depósitos de conglomerados y areniscas (Nativi, 2018). Para un análisis más detallado de la litología de la Formación Socorro se presenta la Tabla 1, la cual describe el estudio de facies de diferentes muestras obtenidas de esta formación.

TABLA 1. Facies sedimentarias de los núcleos de pozos de la Formación Socorro

IMAGEN	DESCRIPCIÓN
	<p>Arenisca de grano medio a grueso, moderadamente a bien escogida; color gris claro a medio, Presenta estratificación cruzada de ángulo alto, delineada por material orgánico, carbonoso. Presenta clastos de arcilla y material carbonoso disperso. Sin impregnación de hidrocarburos.</p>
	<p>Arenisca de grano fino a medio, bien escogida, color gris claro en parte gris medio oxidado, generalmente masiva, aunque puede presentar localmente estratificación de ángulo bajo o laminación convoluta (deformación sinsedimentaria); puede presentar láminas discontinuas de: material orgánico, carbonoso, dispersos. Bioturbación ausente sin impregnación de hidrocarburos.</p>
	<p>Arenisca de grano fino, color gris muy claro, bien escogida. Presenta láminas continuas y discontinuas de: arcilla, color gris oscuro a negro, material carbonoso materia orgánica y carbón. También estructuras por licuefacción, laminación convoluta y material carbonoso particulado disperso. Bioturbación baja.</p>
	<p>Arenisca de grano muy fino a fino, bien escogida, con laminación paralela, ondulada, rizaduras de corriente o raramente cruzada, con comunes láminas continuas y discontinuas de material orgánico, carbonos. Bajo índice de bioturbación. Sin impregnación de hidrocarburo.</p>

Fuente: (Cuadros, 2018)

1.5 PROPIEDADES DE LA ROCA

1.5.1 POROSIDAD

La porosidad es una propiedad innata de las rocas y se la puede definir como el espacio vacío en el que se puede almacenar los fluidos. Generalmente se mide como un porcentaje de volumen o una fracción que se puede expresar como un decimal (AAPG, 2020). La Figura 2 muestra el espacio entre granos que puede albergar fluidos conocido como volumen poroso.

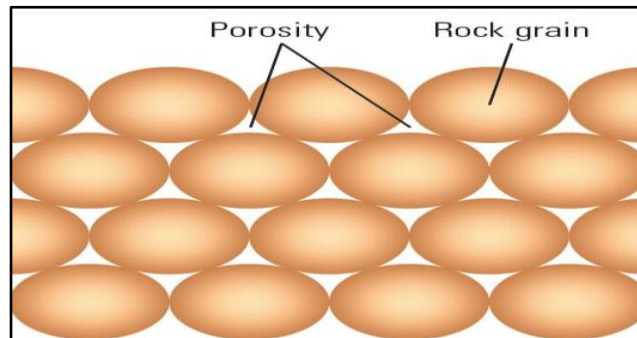


Figura 2. Porosidad en rocas reservorio.

Fuente: (SLB, 2023).

La porosidad se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{V_p}{V_b}$$

Ecuación 1. Porosidad

Donde:

Φ : Porosidad.

V_p : Volumen poroso.

V_b : Volumen total.

1.5.1.1 MÉTODO DE MEDIDA DE POROSIDAD POR SATURACIÓN

El volumen poroso se puede determinar por el método de saturación, el cual se lo realiza a partir de la diferencia entre la masa la muestra saturada con superficie seca y la masa seca al horno (Franklin J.A, 1979).

$$V_{poroso} = \frac{P_{saturado} - P_{seco}}{\rho_{Fluido}}$$

Ecuación 2. Volumen poroso por medio de peso de muestra seca y saturada

1.5.2 PERMEABILIDAD

La permeabilidad es una propiedad intrínseca de un material que determina la facilidad con la que un fluido puede moverse a través de este. El Darcy (D) es la unidad estándar de permeabilidad. La permeabilidad en las rocas del yacimiento puede oscilar entre 0,1 mD y más de 10 D (AAPG, 2019).

La permeabilidad se puede expresar por la siguiente ecuación:

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

Ecuación 3. Permeabilidad

Donde:

k: permeabilidad.

μ : viscosidad del fluido.

A: área transversal a través de la cual ocurre el flujo.

L: longitud de la muestra.

Δp : caída de presión.

q: caudal a través del medio poroso.

1.5.3 SATURACIÓN

Es la cantidad relativa de agua, petróleo y gas que está presente en los poros de una roca y se expresa comúnmente a manera de porcentaje del volumen poroso (SLB, 2023). Esta propiedad se puede expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$S_o + S_g + S_w = 1$$

Ecuación 4. Saturación

Donde:

S_o : Saturación de petróleo en el medio poroso.

S_g : Saturación de gas en el medio poroso.

S_w : Saturación de agua en el medio poroso.

1.5.4 MOJABILIDAD

La mojabilidad puede ser descrita como la preferencia que tiene un sólido de empaparse ya sea con un líquido o gas conocidos como fase mojante. Sobre la superficie sólida la

fase mojante tenderá a extenderse y si se trata de un sólido poroso, este absorberá la fase mojante, desplazando así a la fase no mojante (SLB, 2023).

Una de las formas más comunes de identificar la mojabilidad de una roca es por medio del ángulo de contacto, un ejemplo de este es la Figura 3, la cual esquematiza la distribución del sistema heterogéneo líquido-gas-sólido y el ángulo de contacto entre fases (Riascos, 2012). En el caso del agua, el ángulo de contacto es menor de 90 grados, lo que indica preferencia de mojabilidad del sólido por el líquido. Por lo contrario, si el ángulo supera los 90 grados se dice que se tiene preferencia de mojabilidad del líquido por el sólido.

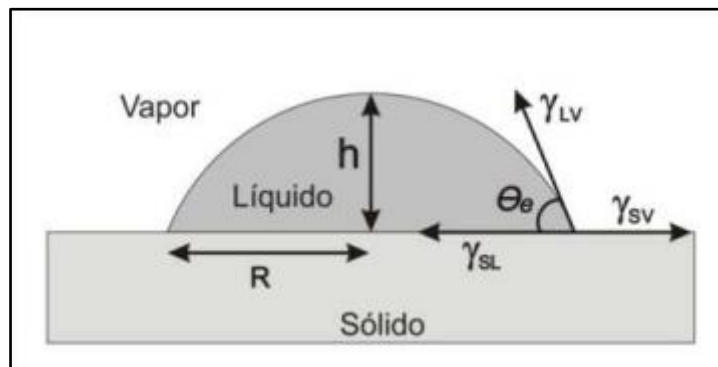


Figura 3. Mojabilidad en un sistema líquido-gas-sólido.

Fuente: (Pérez et al., 2009).

Para un sistema gas, agua y sólido, la ecuación que permite determinar la mojabilidad por medio del ángulo de contacto es:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{GL}}$$

Ecuación 5. Ángulo de contacto

Donde:

γ_{SG} : tensión interfacial entre la fase sólida y gaseosa.

γ_{SL} : tensión interfacial entre la fase sólida y líquida.

γ_{GL} : tensión interfacial entre la fase gaseosa y líquida.

θ : ángulo de contacto.

1.5.5 PRESIÓN CAPILAR

La presión capilar se puede definir como la diferencia entre la presión de la fase no mojante P_{nw} y la presión en el fluido mojante P_w (Ahmed, 2019, pág. 178). La presión capilar matemáticamente se puede expresar como:

$$P_c = P_{nw} - P_w$$

Ecuación 6. Presión capilar

1.6 CURVA DE PRESIÓN CAPILAR Y PROCESOS DE DESPLAZAMIENTO

La curva de presión capilar es la relación que describe la presión que se necesita para obtener una cierta saturación de fase no mojannte en una roca. Las rocas poseen una distribución de tamaños de gargantas porales, de tal manera que a medida que se aplica más presión a la fase no mojannte, se invaden aperturas de poros cada vez más pequeñas (SLB, 2023). En la obtención de la curva de presión capilar ocurren dos procesos fundamentales conocidos como imbibición y drenaje, los cuales son aquellos procesos que permiten el estudio de permeabilidad de medios porosos. En la Figura 4 se puede evidenciar estos procesos; el primero consiste en desplazar la fase mojannte con la fase no mojannte y se denomina proceso de drenaje. El segundo proceso consiste en desplazar la fase no mojannte con la fase mojannte. Este último se denomina proceso de imbibición y la curva resultante se denomina curva de imbibición de presión capilar (Ahmed, 2019, pág. 189).

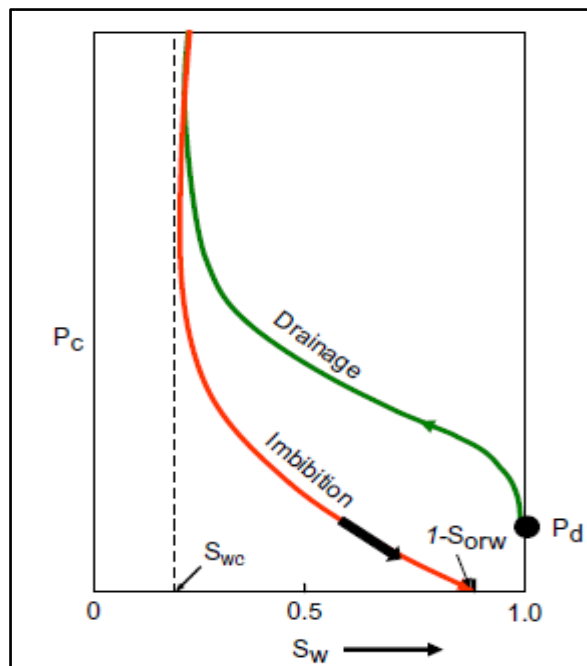


Figura 4. Curva de presión capilar por imbibición y drenaje.

Fuente: (Ahmed, 2019, pág. 189).

1.6.1 IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA

La imbibición espontánea es un proceso controlado por las fuerzas capilares en el cual una fase mojannte desplaza una fase no mojannte bajo la influencia únicamente de la fuerza capilar (Gao & Hu, 2016). La imbibición espontánea al ser un proceso dominado

por la presión capilar hace que la tasa de imbibición dependa significativamente de las propiedades del medio poroso, los fluidos y sus interacciones. Estos incluyen: la porosidad, la permeabilidad, la estructura de los poros, los tamaños de la matriz, las formas y las condiciones de contorno, las viscosidades de los fluidos, la saturación inicial del agua, la mojabilidad de los sistemas roca-fluido y la tensión interfacial entre las fases (Li & Horne, 2001).

1.6.1.1 EXPERIMENTOS DE IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA DE ACUERDO A LAS CONDICIÓN DE FRONTERA

La imbibición espontánea se puede clasificar en imbibición contra corriente y paralela según las direcciones de flujo de las fases mojantes y no mojantes. Si se considera imbibición espontánea contracorriente, al sumergir una muestra en agua se podría tener diferentes tipos de imbibición dependiendo de las condiciones de contorno. En la Figura 5 se evidencia los diferentes tipos de imbibición según la condición de borde: (a) todas las caras abiertas (AFO), (b) dos extremos cerrados (TEC), (c) dos extremos abiertos (TEO), y (d) un extremo abierto (OEO) (Zhang et al., 2019).

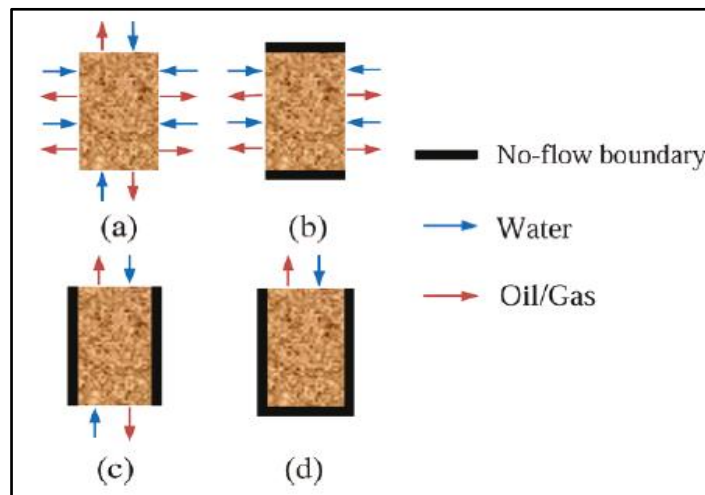


Figura 5. Esquema de tipos de imbibición de acuerdo a las condiciones de contorno.

Fuente: (Zhang et al., 2019).

1.6.1.2 MODELO DE IMBIBICIÓN ESPONTÁNEA AFO

AFO es el método comúnmente utilizado porque es el más fácil de realizar y tiene la tasa de recuperación más alta (Zhang et al., 2019). La experimentación por AFO no es una geometría simple de modelar debido a que la forma de la curva de producción depende de la relación de aspecto de longitud a diámetro del núcleo (L/R) (Mason et al., 2009). El mayor problema es la determinación de las condiciones de contorno apropiadas (Mason et al., 2015).

La imbibición en una muestra cilíndrica con todas las caras abiertas se puede dividir en dos partes. Desde los extremos planos hay una región de imbibición cónica. Desde la superficie cilíndrica exterior hay imbibición en el toroide restante. Por lo que la imbibición en el cilindro es la suma de la imbibición en la superficie externa del toroide y en el extremo del cono (Mason et al., 2009).

De acuerdo a la longitud de la muestra se puede tener una región de imbibición toroidal larga y corta (Figura 6). Para estas dos secciones toroidales diferentes se derivan dos modelos de imbibición AFO (Mason et al., 2009).

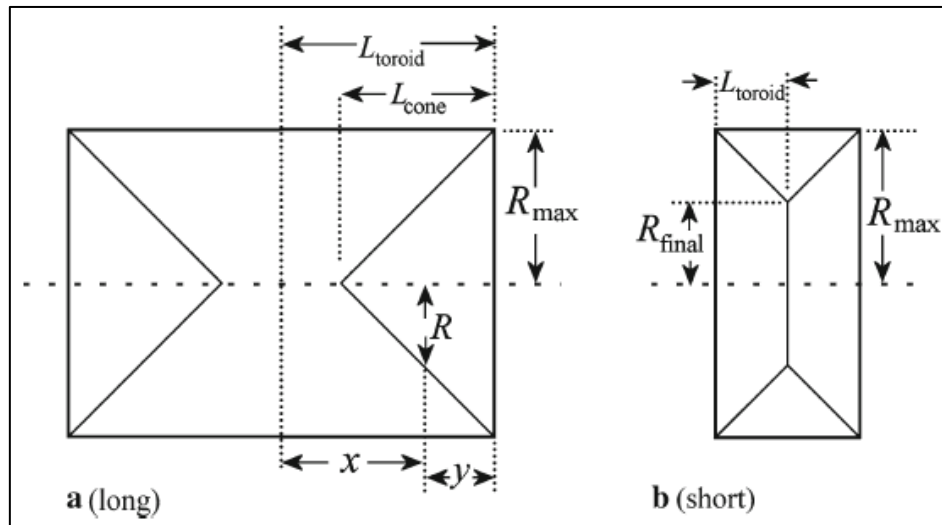


Figura 6. Regímenes de imbibición cónica y toroidal en muestras largas y cortas.

Fuente: (Mason et al., 2009)

1.6.1.2.1 MODELO DE IMBIBICIÓN CILÍNDRICA PARA MUESTRAS LARGAS

Uno de los modelos descritos por (Mason et al., 2009), menciona que para muestras lo suficientemente largas, los conos se llenan por completo justo cuando el flujo radial llega al eje central. La muestra se considera larga si la medida de la mitad de esta es mayor a su radio. A partir de lo mencionado se llega a obtener la fracción del cilindro invadido por la fase mojante, la cual se puede encontrar mediante la suma del volumen absorbido por el toroide y el volumen absorbido por el cono.

La fracción del cilindro invadido se calcula con la siguiente ecuación:

$$f = 1 - \left(\frac{R_f}{R_{max}}\right)^2 \left(1 - \frac{L_{cone}}{L_{toroid}}\right) - \frac{L_{cone}}{L_{toroid}} \left(\frac{2}{3} \left(\frac{R_f}{R_{max}}\right)^3 + \frac{1}{3} \left(1 - \left(\frac{L_f}{L_{cone}}\right)^3\right)\right)$$

Ecuación 7. Fracción del cilindro invadido para muestras largas bajo imbibición AFO.

Donde:

f: fracción de la muestra llena.

R_f: distancia radial del frente al eje.

R_{max}: radio de la base abierta del cono.

L_{cone}: longitud del cono.

L_{toroid}: longitud del toroide.

L_f: distancia de la cara abierta al frente del cono.

A su vez, R_f puede ser conocida por la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{1}{2} R_f^2 + \frac{1}{3} \frac{b R_f^3}{a} \right] \ln \left[\frac{(a + b R_{max}) R_f}{(a + b R_f) R_{max}} \right] + \frac{1}{6} \left[\left(\frac{a}{b} \right)^2 \ln \left(\frac{a + b R_f}{a + b R_{max}} \right) - \frac{a}{b} (R_f - R_{max}) - (R_f^2 - R_{max}^2) \right] = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2K}{\phi} \frac{M C_{spread} \sigma}{(S_{wf} - S_{wi})}} t_f$$

Ecuación 8. Distancia radial del frente de fluido al eje del cilindro

Donde:

a: L_{toroid} - L_{cone}.

b: L_{cone}/R_{max}.

t_f: Tiempo en que el frente ha alcanzado R_f y L_f.

K: Permeabilidad.

Φ: Porosidad.

M: Factor de Movilidad.

C_{spread}: Factor determinado por el ancho y la forma de la distribución del tamaño de los poros.

σ: Tensión Interfacial.

S_{wi}: Saturación de la fase mojante inicial.

S_{wf}: Saturación de la fase mojante detrás del frente.

Por otro lado, L_f se obtiene de la siguiente ecuación:

$$L_{cone}^2 \left(\left(\frac{L_f}{L_{cone}} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{L_f}{L_{cone}} \right)^3 \right) = \sqrt{\frac{2K}{\phi}} \frac{MC_{spread}\sigma}{(S_{wf} - S_{wi})} t_f$$

Ecuación 9. Tiempo en que el frente ha alcanzado R_f y L_f .

1.7 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

1.7.1 TENSIÓN SUPERFICIAL E INTERFACIAL

Cuando se encuentran dos fluidos miscibles en contacto se debe considerar las fuerzas que actúan en la interfaz. En la Figura 7 se puede evidenciar el actuar de estas fuerzas, si estos dos fluidos son líquido y gas, se utiliza el término tensión superficial. Por otro lado, las fuerzas que actúan en la interfaz de dos líquidos se denominan tensión interfacial (Ahmed, 2019, pág. 176).

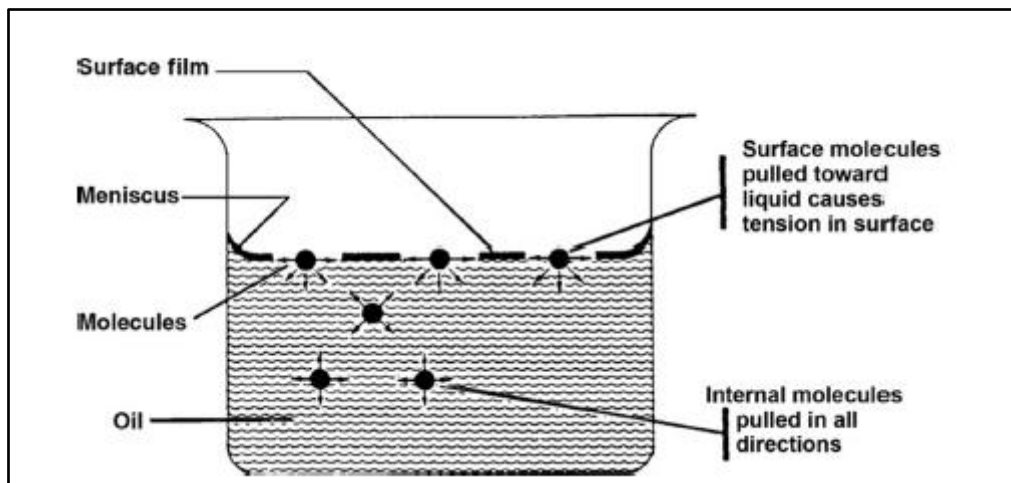


Figura 7. Ilustración de la tensión interfacial.

Fuente: (Ahmed, 2019, pág. 176).

Las fases pueden presentarse como una combinación de petróleo/gas, petróleo/agua o agua/gas, cuya unidad de medida son las dinas/cm. Las tensiones serán una función de la temperatura, la presión y la composición de cada fase (PETROWIKI, 2015).

1.7.2 VISCOSIDAD

La viscosidad de un fluido es una medida de la resistencia de un fluido a fluir. La unidad de medida de la viscosidad es el poise (P), el cual es equivalente a dina-seg/cm² (SLB, 2023).

VISCOSIDAD DEL GAS

A continuación, se presenta ciertas viscosidades de diferentes gases a una determinada temperatura.

TABLA 2. Viscosidades de los gases

TIPO DE GAS	FÓRMULA	VISCOSIDAD 15°C (cP)
AIRE		1,80E-02
NITRÓGENO	N ₂	1,73E-02
OXÍGENO	O ₂	2,00E-02
ARGÓN	Ar	2,19E-02
HIDRÓGENO	H ₂	8,70E-03
HELIO	He	1,94E-02

Fuente: (lazzero technologie, 2023).

VISCOSIDAD DEL AGUA

La viscosidad del agua es significativamente baja en comparación con otros líquidos como el petróleo. La viscosidad dinámica del agua a 25°C es de 0.890 cP (AntonPaar, 2023). Esta baja viscosidad permite al agua circular de manera más fácil a través de los medios porosos.

1.8 PROCESOS DE SEPARACIÓN DE FASES ENTRE FLUIDO Y SÓLIDO

1.8.1 FLOTACIÓN

Un objeto al ser sumergido en algún líquido es más ligero y pesa menos que lo que pesa en el aire. Ante lo mencionado se puede decir que un fluido ejercerá una fuerza hacia arriba sobre el objeto y esta tenderá a levantarlo. La fuerza que experimenta se llama fuerza de flotación o empuje y se denota por F_B (Cengel & Cimbala, 2018, pág. 89).

1.8.1.1 FUERZA DE EMPUJE

La fuerza de empuje se debe al aumento de la presión en un fluido ante un incremento de profundidad. La Figura 8 describe la acción de la fuerza de empuje en un objeto sumergido en un líquido. Se puede apreciar que la fuerza hidrostática (F_{sup}) actúa hacia abajo sobre la superficie superior de la placa y la mayor fuerza (F_{inf}) actúa hacia arriba sobre la superficie inferior de la placa. “La diferencia entre estas dos fuerzas es una fuerza neta hacia arriba, la cual es la fuerza de empuje” (Cengel & Cimbala, 2018, pág. 89).

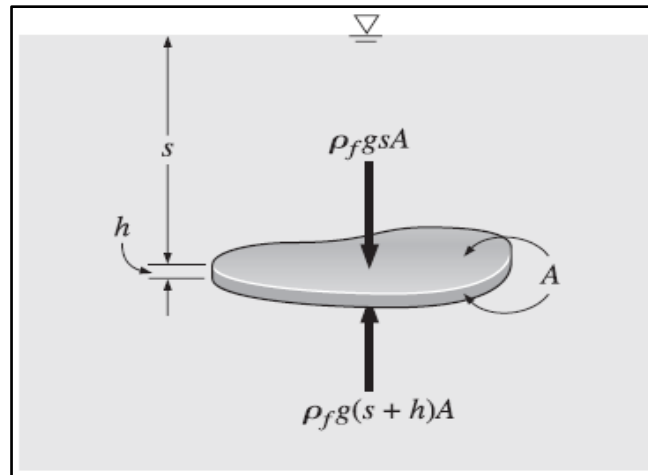


Figura 8. Placa plana de espesor uniforme h sumergida en un líquido, paralela a la superficie libre.

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2018, pág. 89).

La fuerza de empuje se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$F_B = F_{inf} - F_{sup} = \rho_f g (s + h)A - \rho_f g s A = \rho_f g h A = \rho_f g V$$

Ecuación 10. Fuerza de empuje

Donde:

F_{sup} : fuerza hidrostática.

F_{inf} : fuerza inferior.

ρ_f : densidad del fluido.

g : gravedad.

h : espesor de la placa.

s : distancia libre a la superficie.

A : área de la placa.

V : volumen de la placa.

1.8.1.1.1 DCL PARA MUESTRA QUE EXPERIMENTA UNA FUERZA DE EMPUJE

El diagrama de cuerpo (DCL), es la representación gráfica que muestra las fuerzas que actúan sobre un objeto. En la Figura 9 se evidencia el diagrama de cuerpo libre de una

muestra sumergida totalmente, experimentando la fuerza de empuje debido al contacto con el agua.

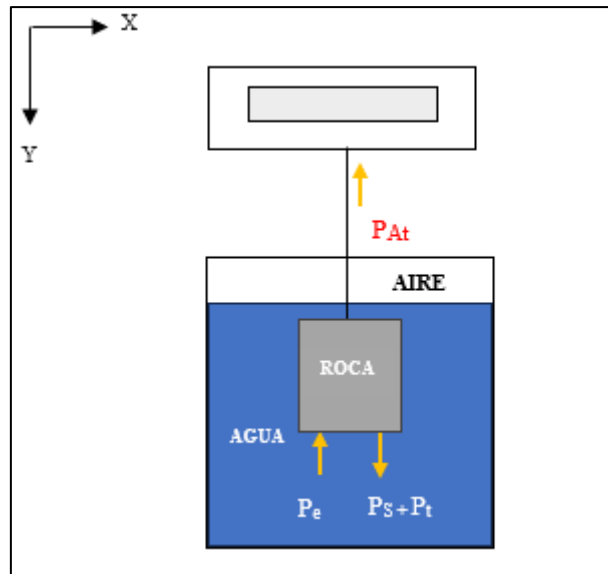


Figura 9. DCL para una muestra sumergida completamente en agua.

Elaborado por: El autor.

Para este caso se tiene que:

$$\sum Fy = -P_A + (P_s + P_t) - P_e = 0 \dots \dots \dots (11)$$

De donde:

P_{At}: Peso aparente registrado por la balanza (g)

P_s: Peso de la muestra seca (g)

P_t: Peso que adquiere la muestra por imbibición al tiempo t.

P_e: Peso de empuje.

1.9 CONSIDERACIONES PROBABILÍSTICAS

1.9.1 ERROR RELATIVO PORCENTUAL

El error es la discrepancia que existe entre la magnitud “verdadera” y la magnitud obtenida (Pilaquina, 2021). El error absoluto porcentual se determina mediante la siguiente ecuación:

$$E_{RP} = \frac{E_A}{V_V} * 100 = \frac{|V_v - V_a|}{V_v} * 100$$

Ecuación 12. Error absoluto porcentual.

Donde:

E_{RP} : error relativo porcentual.

E_A : error absoluto.

V_V : valor verdadero.

V_a : valor aproximado.

1.9.2 MUESTREO

Una muestra es conocida como una parte representativa de una población. Se debe realizar la selección de la muestra cuando la población es infinita o la población es finita, pero de gran tamaño. El muestreo se clasifica en dos grupos los probabilísticos y los no probabilísticos. Uno de estos son los probabilísticos en los cuales “todos los sujetos de una población tienen igual probabilidad de ser seleccionados para formar parte de la muestra representativa”. (Hernández & Carpio, 2019).

1.9.3 MUESTREO SISTEMÁTICO

Este del tipo probabilístico donde es necesario conocer la población y, de igual forma, se deben numerar todos los elementos. La primera unidad de análisis es elegida al azar; las siguientes unidades se toman, sistemáticamente, a partir de un número que se obtiene a través de la siguiente fórmula (Hernández & Carpio, 2019):

$$K = \frac{N}{n}$$

Ecuación 13: Intervalo de selección sistemática.

Donde:

N: tamaño de la población.

n: tamaño de la muestra.

K: intervalo o paso de selección.

1.10 SURFACTANTES

Estas sustancias son agentes de humectación, las cuales químicamente están compuestas de moléculas anfifílicas; es decir, moléculas de dos polaridades, una parte polar y la otra no polar (Gómez et al., 2021). En la Figura 10 se puede apreciar los grupos no polares hidrófobos, solubles en hidrocarburo (colas) y grupos polares hidrofílicos (cabezas) solubles en agua (Trujillo et al., 2013, pág. 6).

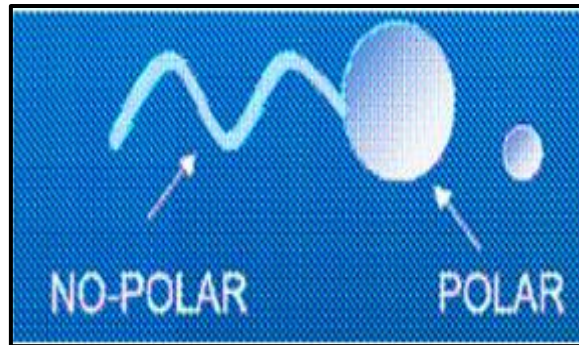


Figura 10. Estructura molecular de un surfactante.

Fuente: (Trujillo et al., 2013, pág. 7)

El efecto de los surfactantes es la disminución de la tensión superficial e interfacial; actuando como un detergente que al momento de encontrarse en la interfase o superficie disminuye la fuerza de atracción entre las moléculas que existen en un líquido sin desequilibrar el sistema (Gómez et al., 2021).

“La disolución de un surfactante en sistemas donde se tienen dos líquidos inmiscibles y un sólido, puede hacer que la mojabilidad del sólido cambie, mediante la variación del ángulo de contacto, puesto que el ángulo de contacto decrece a medida que se inyecta tensioactivos” (Morales, 2011).

CAPÍTULO 2

2 ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

2.1 METODOLOGÍA

2.1.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo se desarrollará bajo la guía de los siguientes métodos:

- **MÉTODO EMPÍRICO.** - genera cierto conocimiento por medio de experiencias replicables, controladas y documentadas, es decir experimentos.
- **MÉTODO DEDUCTIVO.** - parte de una idea general hacia algo más concreto. Recopilación de toda la información de interés que contribuya a desarrollar la temática planteada.

2.1.2 ANÁLISIS Y RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Las técnicas de investigación consideradas son las siguientes:

- **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**
La información recopilada acerca del tema planteado proviene de publicaciones, revistas, libros e internet.
- **OBSERVACIÓN.** se capta de forma metódica y por medio de la vista el fenómeno de estudio.

También, es importante mencionar que se realizará un análisis cualitativo y cuantitativo durante el desarrollo del estudio.

2.2 ARREGLO BALANZA-MUESTRA-AGUA

Consiste en un sistema de medición de peso de alta precisión en tiempo real que permite cuantificar el cambio de peso en la muestra conforme el fluido mojante va ocupando el espacio poroso de la muestra debido a imbibición espontánea AFO. El arreglo que se toma de referencia corresponde al usado en las diferentes publicaciones de experimentación de imbibición espontánea a condiciones normales de presión y temperatura. Este arreglo consta de una balanza de alta precisión, soporte de balanza, cable USB, un computador, muestras o núcleos, vaso de precipitación y agua. La Figura 11 ejemplifica el arreglo usado en esta prueba.



Figura 11. Esquema arreglo balanza-muestra-agua para prueba de imbibición espontánea.

Elaborado por: el Autor.

A continuación, se describe cada uno de los elementos que forman parte del arreglo a utilizarse en la adquisición de datos de peso de fluido mojante debido a la imbibición espontánea AFO.

2.2.1 BALANZA DE ALTA PRECISIÓN

Este instrumento permite cuantificar el peso de fluido mojante, que por imbibición se alberga en el espacio poroso de la muestra. El tipo de balanza que se utiliza en esta prueba es del tipo RADWAG PS 100.R1 con una máxima capacidad de 1000 g y mínima capacidad de 20 mg y una legibilidad de 0.001 g que opera de manera funcional a temperaturas que se encuentran entre +10° a +40 °C (Figura 12). Por otro lado, este equipo dispone de una función muy simple y útil conocida como USB FREE LINK la cual transmite en tiempo real y almacena los datos de peso en un ordenador de manera directa.



Figura 12: Balanza de precisión PS 1000.R1

Fuente: (RADWAG, 2023).

Es importante mencionar que este modelo dispone de pesaje debajo del platillo permitiendo pesar objetos suspendidos lo cual es muy indicado debido a que el arreglo a considerar requiere de suspender la muestra para llevar a cabo la prueba de imbibición espontánea AFO. Lo mencionado se ejemplifica en la Figura 13.



Figura 13. Pesaje debajo del platillo

Elaborado por: el Autor

2.2.2 SOPORTE DE BALANZA

Para disponer de un pesaje del tipo colgante se hace uso de un soporte de balanza (Figura 14). Este soporte proporcionará elevación y además contribuirá a reducir las vibraciones del medio.



Figura 14. Soporte para pesaje de las cargas bajo la balanza.

Fuente: (RADWAG, 2023)

2.2.3 INSTRUMENTO TIPO ASCENSOR

Este instrumento permite elevar y descender el vaso de precipitación hacia o desde la muestra de tal manera que sea posible sumergirla o sacarla a flote. Este instrumento se evidencia en la Figura 15.



Figura 15. Dispositivo tipo ascensor

Elaborado por: El autor.

2.3 MONTAJE Y CALIBRACIÓN DEL ARREGLO

Una vez que se cuenta con todos los equipos, instrumentos y materiales se procede a armar y calibrar el equipo siguiendo los pasos a continuación.

- 1) Tomar mediciones de longitud y diámetro de la muestra. Es importante disponer de esta información al momento de determinar el peso de empuje teórico $P'e$.
- 2) Colocar el soporte de la balanza en el área de trabajo a utilizarse de tal forma que este se encuentre completamente fijo. Para alcanzar una óptima estabilización se debe ajustar las perillas que se encuentran debajo de la base del soporte.
- 3) Asentar la balanza sobre el soporte de tal manera que el orificio de pesaje bajo el platillo se encuentre alineado con el orificio del soporte.
- 4) Nivelar la balanza. Se ajustan las perillas o patas de la balanza hasta alcanzar la nivelación adecuada. Esto se lo puede realizar guiándose del nivel que se encuentra tras la balanza.
- 5) Conectar el cable de suministro de energía y el cable USB a la balanza. El cable USB que se utiliza es del tipo A en un extremo, el cual va conectado al computador y en el otro extremo es del tipo B y este se conecta a la balanza.
- 6) Encender la balanza y encerrar. Los botones para encender y encerrar se encuentran en el tablero principal del equipo.
- 7) Calibrar la balanza por medio de la calibración externa incorporada en las funciones del equipo la cual requiere de un peso patrón de referencia.
- 8) Encerrar la balanza con el gancho y el hilo suspendido en el orificio del pesaje bajo el platillo. A estos se los cuelga previamente en el orificio de pesaje bajo el platillo para encerrar su peso. Esto se lo realiza para restar el peso que, tanto el hilo como el gancho pueden llegar a adicionar a las medidas registradas por la balanza.
- 9) Colgar la muestra a ser evaluada en el orificio del pesaje bajo el platillo. Esto se lo realiza con ayuda del gancho y el hilo.
- 10) Colocar el instrumento tipo ascensor sobre la base del soporte. Adicionalmente, sobre el instrumento tipo ascensor colocar el vaso de precipitación con agua (200 ml).
- 11) Encender el ordenador, abrir una hoja de Excel, y seleccionar una celda desde la cual se comenzará a registrar las mediciones de peso al iniciar la transmisión continua de datos.

2.4 INICIALIZACIÓN

Con el equipo montado se procede a dar inicio a la adquisición de datos, la cual debe seguir los siguientes pasos:

- 1) Activar la función USB Free Link incorporada en la balanza.
- 2) Con el instrumento tipo ascensor sumergir la muestra por completo. Es una buena práctica elevar previamente el vaso de precipitación hacia la parte baja de la muestra, lo más cercano posible, para evitar movimientos bruscos al momento de iniciar la sumergencia.
- 3) Observar que las mediciones de peso imbibido vayan en constante incremento.
- 4) Dejar el equipo en funcionamiento y esperar el tiempo que sea necesario hasta que se tenga un valor de peso constante, el cual indicará que la muestra alcanzó su máxima saturación.

2.5 CORRECIÓN DE PESO IMBIBIDO POR SUMERGENCIA

Una vez que se evidencie que las variaciones de peso sean constantes se debe parar la toma de mediciones.

Antes de trabajar con los datos obtenidos es necesario considerar que, como consecuencia de sumergir un sólido bajo un líquido se tendrá valores de peso menores a los esperados, esto se explica por el actuar de la fuerza de empuje F_B . Ante lo mencionado se debe considerar dos puntos clave en la experimentación:

- A la sumergencia.
- Después de la sumergencia.

2.5.1 A LA SUMERGENCIA (t=0)

La muestra se encuentra sumergida en el agua al instante t=0. De la ecuación 11 se asume $P_{t=0}$ debido a que a un t=0 no existiría aún ingreso de fluido a la muestra.

Se llega a tener:

$$P_{Ao} = P_s - P_e \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

P_{AO} : peso aparente registrado por la balanza al punto de sumergencia t=0.

2.5.2 DESPUÉS DE LA SUMERGENCIA (t > 0)

Con el pasar del tiempo el agua comenzará a introducirse en el espacio poroso por imbibición espontánea. De la ecuación 11 se tiene que:

$$P_{At} = (P_s + P_t) - P_e \dots \dots \dots (15)$$

Donde:

P_{At} : peso aparente registrado por la balanza a la sumergencia a $t > 0$.

2.5.3 CORRECCIÓN

Si graficamos P vs t con los datos obtenidos al inicio se tendrá un valor de peso inconsistente, esto se puede evidenciar en la Figura 16, la cual muestra que los valores de peso son menores al valor de peso de la muestra seca. Esto se explica por la pérdida de peso que experimenta la muestra debido al actuar de la fuerza de empuje hasta alcanzar el equilibrio.

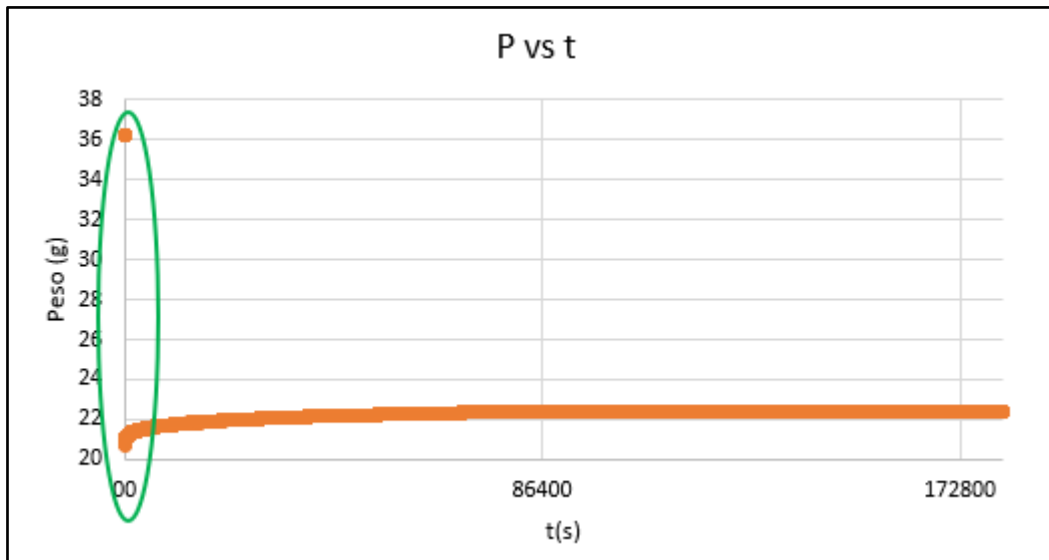


Figura 16. Valores de peso imbibido menores al peso seco por fuerza de empuje.

Elaborado por: el Autor.

Para corregir esto se debe considerar un peso de empuje teórico P'_e el cual se determina a partir de la ecuación 10. Al dividir a esta última por la gravedad se llega a calcular P'_e :

$$P'_e = \rho_f V = \rho_f A h = \rho_f \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 L$$

Ecuación 16. Peso de empuje teórico.

Donde:

P'_e : peso de empuje teórico.

L: longitud de la muestra.

D: diámetro de la muestra.

Finalmente, para corregir los valores de peso al punto de sumergencia P_{AO} y después de este se debe sumar el peso de empuje teórico $P'e$.

En la ecuación 14 si se suma a cada extremo un valor de $P'e$ se obtiene:

$$P_{AO} + P'e = P_s - P_e + P'e = P_s \dots \dots \dots (17)$$

De esta manera corregimos la pérdida de peso por empuje a $t=0$.

Por otro lado, en la ecuación 15 si se suma a cada extremo un valor de $P'e$ se obtiene:

$$P_{At} + P'e = (P_s + P_t) - P_e + P'e = (P_s + P_t) \dots \dots \dots (18)$$

De esta manera corregimos la pérdida de peso por empuje a $t>0$.

2.6 TRATAMIENTO DE DATOS DE PESO DE IMBIBICIÓN

Para el tratamiento de los datos obtenidos se debe considerar lo siguiente:

- 1) Obtener el tiempo acumulativo en segundos de los datos de tiempo registrados.
- 2) Estimar el peso de empuje teórico $P'e$.
- 3) Establecer el peso a la sumergencia P_{AO} .
- 4) Estimar el peso de empuje experimental P_e por medio de la diferencia entre el peso seco y el peso a la sumergencia.
- 5) Determinar el error relativo porcentual entre el peso de empuje experimental P_e y el empuje calculado o teórico $P'e$.
- 6) Realizar las correcciones de peso por sumergencia.
- 7) Discriminar los valores de peso que se obtienen durante el tiempo que lleva sumergir la muestra a la altura deseada.
- 8) Obtener los valores de peso imbibido acumulativo de los datos de peso registrados.
- 9) Del total de datos (tiempo acumulativo y peso acumulativo imbibido) seleccionar una muestra significativa.
- 10) Generar las curvas de peso y tasa de imbibición vs tiempo.

Es importante mencionar que cada vez que se termina una prueba las muestras deben ser secadas a una temperatura de 105°C , esto se le realiza siguiendo las pautas utilizadas en las diferentes bibliografías de experimentos de imbibición espontánea.

2.7 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN POROSO

El volumen poroso que llega a ocupar el fluido mojante hasta que se alcanza el peso de equilibrio, se determina mediante la relación entre diferencia del peso seco y el peso a la máxima saturación con la densidad del fluido mojante.

2.8 ADQUISICIÓN DE DATOS DE PESO IMBIBIDO EN MUESTRAS TRATADAS CON SURFACTANTE

Antes de experimentar imbibición espontánea se debe dar el tratamiento a la muestra con el agente tensioactivo o surfactante. Para tratar la muestra es necesario disolver el agente en un disolvente (agua) a la concentración recomendada por el fabricante. En la Figura 17 se observa cómo se satura la muestra seca con la disolución por medio de un equipo que permite la saturación, como es la bomba de vacío y el desecador de cristal, esto asegurará una óptima saturación y por ende una mayor exposición del medio poroso al surfactante. Finalmente se deja secar hasta alcanzar el peso seco original de la muestra.



Figura 17. Muestras tratadas con surfactante.

Elaborado por: el Autor.

Con la muestra tratada y seca es posible generar la curva de peso imbibido vs tiempo siguiendo el procedimiento detallado en este capítulo.

CAPÍTULO 3

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 RESULTADOS

A continuación, se presenta un ejemplo aplicativo de la adquisición de datos de tasa de imbibición espontánea AFO y volumen poroso de la muestra 1 donde se muestran los resultados obtenidos mediante el uso del procedimiento detallado en el Capítulo 2.

3.1.1 MUESTRAS

Tabla 3 Características de las muestras utilizadas en las pruebas de imbibición.

MUESTRA N°	Diámetro D(cm)	Longitud L(cm)	Vol. Poroso (cm ³)	Vol. Bulk (cm ³)	Porosidad %	Kg mD
1	2,51	3,2	3,070	15,834	19,39%	-
2	2,51	4,48	4,910	22,167	22,15%	66,69
3	2,51	4,2	4,500	20,782	21,65%	60
4	2,51	3,2	3,050	15,834	19,26%	-
5	2,51	4,27	3,600	21,128	17,04%	-

Elaborado por: el Autor

Cabe mencionar que los valores de porosidad y ciertos valores de permeabilidad fueron obtenidos por medio del equipo Poroperm. En las muestras 1,4 y 5 no se pudo obtener un valor de permeabilidad debido a que las muestras presentaban un grado de cementación muy alto ocasionando que se requiera de una alta presión de confinamiento, la cual superó la presión de trabajo del equipo Poroperm generando resultados erróneos. Por otro lado, también es importante mencionar que debido a la poca disponibilidad de muestras de Socorro se decidió utilizar dos muestras de la arenisca U y T obtenidas de pozos petroleros de la Cuenca Oriente.

3.1.2 PUESTA EN INICIO

Una vez encendida la balanza se registra un valor de peso continuo de 37.031 gramos el cual corresponde al peso seco de la muestra suspendida sin contacto alguno con el agua. Esto se evidencia en la Figura 18.

	A	B	C
1	HORA	PESO (g)	FECHA
2	14:09:57	SUI 37.031 g	5/6/2023
3	14:09:57	SUI 37.031 g	5/6/2023
4	14:09:58	SUI 37.031 g	5/6/2023
5	14:09:59	SUI 37.031 g	5/6/2023
6	14:10:00	SUI 37.031 g	5/6/2023
7	14:10:01	SUI 37.031 g	5/6/2023
8	14:10:02	SUI 37.031 g	5/6/2023
9	14:10:03	SUI 37.031 g	5/6/2023
10	14:10:04	SUI 37.031 g	5/6/2023
11	14:10:04	SUI 37.031 g	5/6/2023

Figura 18. Medida de peso seco al iniciar la prueba.

Elaborado por: el Autor

Al poner en contacto la muestra con el agua se registran valores de peso cambiantes, los cuales disminuyeron durante cierto tiempo, como se evidencia en la Figura 19. Esto hecho se explica por el incremento de altura que el nivel de agua alcanza conforme se mueve el ascensor hacia arriba. Al incrementar la altura del nivel del agua, la muestra se sumerge cada vez más experimentando una fuerza de empuje mayor que ocasiona la disminución en los valores de peso registrados por la balanza. Esto perdura hasta que se logra la sumergencia total, luego los valores comienzan a incrementar. Estos valores no son tomados en cuenta debido a su naturaleza cambiante por lo que se consideran como atípicos.

	A	B	C
1	HORA	PESO (g)	FECHA
15	14:10:08	SUI 37.031 g	5/6/2023
16	14:10:09	SUI 35.908 g	5/6/2023
17	14:10:10	SUI 34.026 g	5/6/2023
18	14:10:11	SUI 32.122 g	5/6/2023
19	14:10:12	SUI 30.897 g	5/6/2023
20	14:10:13	SUI 29.069 g	5/6/2023
21	14:10:13	SUI 27.271 g	5/6/2023
22	14:10:14	SUI 25.541 g	5/6/2023
23	14:10:15	SUI 23.423 g	5/6/2023
24	14:10:16	SUI 21.231 g	5/6/2023
25	14:10:17	SUI 21.232 g	5/6/2023

Figura 19. Decremento de valores de peso después del contacto.

Elaborado por: el Autor

Al llegar a sumergir por completo la muestra en agua se aprecia que a 21.231 gramos comienza a experimentarse un incremento paulatino de peso (Figura 20). Dado este comportamiento se considera este peso como el peso a la sumergencia P_{AO} .

	A	B	C
1	HORA	PESO (g)	FECHA
23	14:10:15	SUI_ 23.423 g	5/6/2023
24	14:10:16	SUI_ 21.231 g	5/6/2023
25	14:10:17	SUI_ 21.232 g	5/6/2023
	0:18	SUI_ 21.293 g	5/6/2023
	0:19	SUI_ 21.450 g	5/6/2023
	0:19	SUI_ 21.552 g	5/6/2023
29	14:10:20	SUI_ 21.558 g	5/6/2023
30	14:10:21	SUI_ 21.565 g	5/6/2023
31	14:10:22	SUI_ 21.570 g	5/6/2023
32	14:10:23	SUI_ 21.573 g	5/6/2023
33	14:10:24	SUI_ 21.576 g	5/6/2023

Figura 20. Incremento de los valores de peso sobre el punto de sumergencia.

Elaborado por: el Autor

Después de 155520 segundos (43 horas), se aprecia un peso constante que rodeaba los 23.34 gramos. A partir de este valor se observa pesos poco cambiantes que indican que la mayor saturación de fluido mojante esta por alcanzarse. Este hecho se puede visualizar en la Figura 21.

	A	B	C
1	HORA	PESO (g)	FECHA
180092	10:23:50	SUI_ 23.341 g	7/6/2023
180093	10:23:51	SUI_ 23.341 g	7/6/2023
180094	10:23:52	SUI_ 23.344 g	7/6/2023
180095	10:23:52	SUI_ 23.344 g	7/6/2023
180096	10:23:53	SUI_ 23.343 g	7/6/2023
180097	10:23:54	SUI_ 23.343 g	7/6/2023
180098	10:23:55	SUI_ 23.343 g	7/6/2023
180099	10:23:56	SUI_ 23.343 g	7/6/2023
180100	10:23:57	SUI_ 23.343 g	7/6/2023
180101	10:23:57	SUI_ 23.343 g	7/6/2023

Figura 21. Valor constante de peso imbibido.

Elaborado por: el Autor

Según (Xu et al., 2021), a medida que el peso imbibido se acerca a un valor constante, el aumento será tan pequeño que se puede hablar de una situación de estado estacionario.

3.1.3 DATOS OBTENIDOS

El intervalo de tiempo en el que se registra una medida de peso es de un segundo en formato [hh:mm:ss]. Como se observa en la Figura 22, el acumulativo de tiempo corresponde a la suma de cada unidad de tiempo [ss] en la que se registró un valor de peso.

	A	C	D
1	HORA	FECHA	Δt [ss]
2	14:09:57	5/6/2023	00
3	14:09:57	5/6/2023	01
4	14:09:58	5/6/2023	02
5	14:09:59	5/6/2023	03
6	14:10:00	5/6/2023	04
7	14:10:01	5/6/2023	05
8	14:10:02	5/6/2023	06
9	14:10:03	5/6/2023	07
10	14:10:04	5/6/2023	07
11	14:10:04	5/6/2023	08
12	14:10:05	5/6/2023	09
13	14:10:06	5/6/2023	10

Figura 22. Acumulativo de tiempo en segundos.

Elaborado por: el Autor

Por otro lado, el volumen sumergido es de 15.933 cm³, el cual representa al volumen total de la muestra. En este caso el volumen sumergido es igual al volumen total de la muestra debido a que se realiza un experimento del tipo AFO.

$$V = \pi * \left(\frac{2,51}{2}\right)^2 * 3,22 = 15.933 \text{ cm}^3$$

Al tomar una densidad de 1 g/cm³ el valor numérico del peso de empuje es igual al valor de volumen sumergido de la muestra.

$$P'_e = 1 * 15.933 = 15.933 \text{ g/cm}^3$$

De manera distinta, el peso de empuje experimental obtenido es de 15.80 gramos. Este peso produjo valores por debajo del peso seco de la muestra como resultado de la

acción de la fuerza de empuje hacia arriba. Para determinar este peso basta con restar el peso seco P_s , menos el peso a la sumergencia P_{AO} .

$$P_e = 37,031 - 21,231 = 15,80 \text{ g}$$

El error relativo porcentual entre el peso de empuje experimental y el empuje calculado o teórico es de 0.83%. Se obtiene un error porcentual bajo por lo que se corrobora la selección del peso a la sumergencia y el peso de empuje experimental.

$$E_{RP} = \frac{|15.933 - 15.80|}{15.933} * 100 = 0.83\%$$

Realizada la corrección de peso por sumergencia a los valores de peso obtenidos se evidencia que los pesos registrados son mayores al peso seco (Figura 23), de esta manera se tiene certeza de que se experimentó imbibición espontánea en la muestra.

	A	B	I
1	HORA	PESO (g)	PESO CORR. (g)
24	14:10:16	SUI_ 21.231 g	37,164
25	14:10:17	SUI_ 21.232 g	37,165
26	14:10:18	SUI_ 21.293 g	37,226
27	14:10:19	SUI_ 21.450 g	37,383
28	$(P_s+P_t) = P_{At} + P'e$	21.552 g	37,485
29	14:10:20	SUI_ 21.558 g	37,491
30	14:10:21	SUI_ 21.565 g	37,498
31	14:10:22	SUI_ 21.570 g	37,503
32	14:10:23	SUI_ 21.573 g	37,506
33	14:10:24	SUI_ 21.576 g	37,509
34	14:10:25	SUI_ 21.579 g	37,512
35	14:10:26	SUI_ 21.580 g	37,513

Figura 23. Corrección por peso de empuje.

Elaborado por: el Autor

Por otro lado, en el acumulativo de peso imbibido se observa un rápido incremento de peso al inicio el cual disminuye su velocidad gradualmente al aproximarse a la máxima saturación de fluido que la muestra es capaz de albergar a las condiciones normales del experimento. Este comportamiento se evidencia en la Figura 24.

PESO (g)	PESO CORR. (g)	Δ PESO (g)
SUI_ 21.231 g	37,164	0,001
SUI_ 21.232 g	37,165	0,062
SUI_ 21.293 g	37,226	0,219
SUI_ 21.450 g	37,383	0,321
SUI_ 21.552 g	37,485	0,327
SUI_ 21.558 g	37,491	0,334
SUI_ 21.565 g	37,498	0,339
SUI_ 21.570 g	37,503	0,342
SUI_ 21.573 g	37,506	0,345
SUI_ 21.576 g	37,509	0,348
SUI_ 21.579 g	37,512	0,349
SUI_ 21.580 g	37,513	0,35
SUI_ 21.581 g	37,514	0,351

Figura 24. Acumulativo de valores de peso imbibido.

Elaborado por: el Autor

Como la cantidad de datos obtenidos en la experimentación es muy grande se decide extraer una muestra representativa del universo total de valores de peso medidos por la balanza (Figura 25). El muestreo a usar es del tipo sistemático donde se elige un paso de $k = t$ segundos, de tal forma de llegar a tener una muestra de tamaño n que sea representativa de la población N de datos de peso imbibido.

$\Delta t(15\text{min})$	Δ PESO (g)
00	0,000
900	0,834
1800	0,991
2700	1,080
3600	1,147
4500	1,201
5400	1,247
.	.
.	.
158400	2,118

Figura 25. Muestra representativa de valores de peso imbibido, con $K = 900$ s.

Elaborado por: el Autor

3.1.4 CURVAS DE PESO Y TASA DE IMBIBICIÓN VS TIEMPO

A continuación en la Tabla 4. se presenta un resumen de los valores de entrada que se obtuvieron de las distintas pruebas realizadas a las muestras que experimentaron imbibición espontánea. Es importante mencionar que todos las pruebas fueron realizadas a condiciones ambientales (25 °C y 1 atm), considerando los siguientes valores: $\rho_w=1\text{g/cm}^3$, $\rho_{air}= 0.0012 \text{ g/cm}^3$, $\mu_w= 0.890 \text{ cP}$ y $\mu_{air}= 0.0182 \text{ cP}$.

Tabla 4. Resumen de valores de entrada obtenidos de las pruebas de imbibición.

	PRUEBA 1					PRUEBA 2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
V. sumergido (cm³)	15,834	22,167	20,782	15,834	21,128	15,834	22,167	20,782	15,834	21,128
P'e (g)	15,834	22,167	20,782	15,834	21,128	15,834	22,167	20,782	15,834	21,128
Ps (g)	37,031	49,764	49,897	36,858	50,731	36,26	48,78	49,89	36,683	50,714
P_{AO} (g)	21,231	28,724	30,114	21,159	29,614	20,725	27,587	30,185	20,757	29,741
Pe (g)	15,8	21,04	19,783	15,699	21,117	15,535	21,193	19,705	15,926	20,973
ERP	0,21%	5,09%	4,81%	0,85%	0,05%	1,89%	4,40%	5,18%	0,58%	0,74%
K (s)	900	60	60	900	900	900	60	60	900	900

Elaborado por: El Autor.

A continuación se presentan las curvas de peso y tasa de imbibición vs tiempo obtenidas de las diferentes pruebas realizadas.

MUESTRA N° 1

En la Figura 26 se presentan las curvas de peso imbibido vs tiempo de las pruebas 1 y 2 llevadas a cabo en la muestra 1. Para la prueba 1 y 2 se observa que los valores de peso de imbibición se ralentizan por debajo de los 5184 segundos. En ambas pruebas se alcanza la máxima saturación de fluido a los 129600 segundos donde se observa un valor de peso constante de aproximadamente 2.1 y 1.7 gramos respectivamente. Este equilibrio se logra evidenciar cuando las curvas se aplanan.

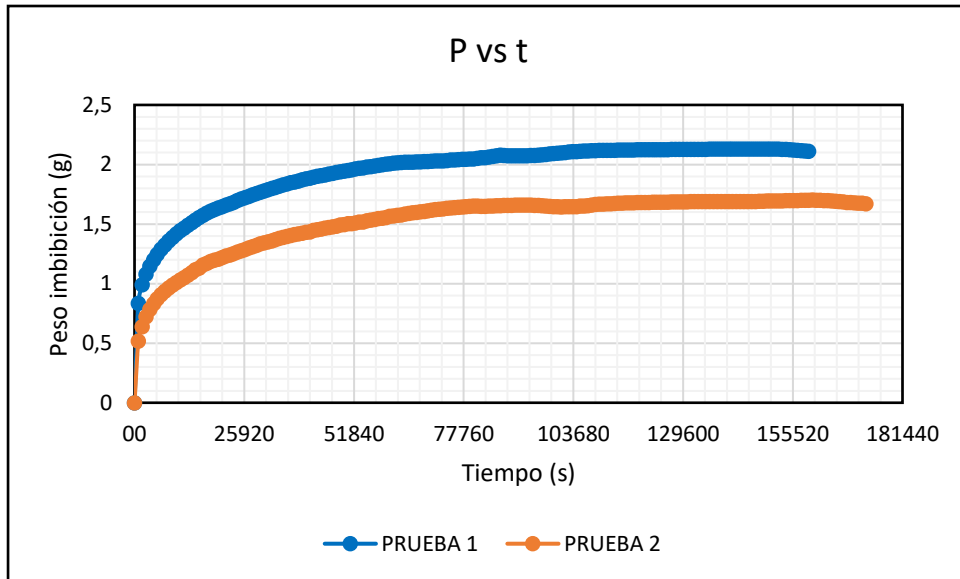


Figura 26. Gráfico de peso imbibido vs tiempo, muestra N°1.

Elaborado por: El Autor.

Por otra parte, la Figura 27 muestra que en la prueba 1 al inicio del experimento se alcanzan tasas que superan los 0.055 cm³/min declinando rápidamente hasta llegar a valores cercanos a 0,02 cm³/min, posteriormente el medio se satura y esto hace que la tasa de imbibición disminuya gradualmente. A su vez, en la prueba 2 se aprecia un máximo de tasa de imbibición del orden de 0.0350 cm³/min, la cual también decrementa en los primeros tiempos. Sobre los 600 minutos en ambas curvas se presentan tasas por debajo de los 0.0025 cm³/min, esto significa que la transferencia neta adicional de líquido entre el medio poroso y el fluido mojante es casi nula, esto quiere decir que se alcanzó la máxima saturación de fluido a las condiciones normales con las que se desarrolló el experimento.

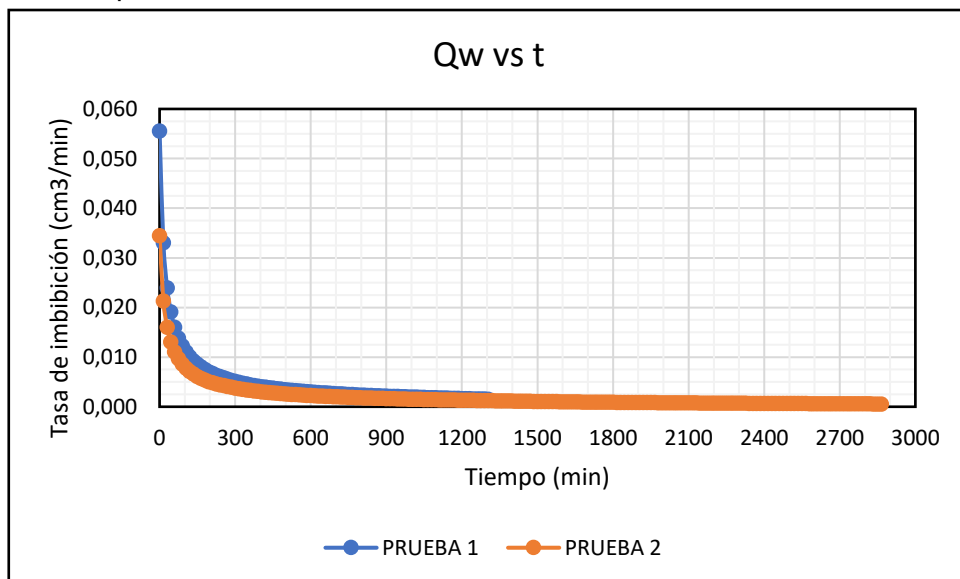


Figura 27. Tasa de imbibición vs tiempo, muestra N°1.

Elaborado por: el Autor

Al comparar los gráficos de tasa y peso de imbibición de la Prueba 1 y 2 presentados en la Figura 26 y 27, se evidencia que la prueba 1 experimenta tasas y pesos más altos de imbibición en comparación con la prueba 2. Este comportamiento se explica debido a que en la prueba 1 se parte de un peso seco mayor al peso seco de la prueba 2, lo cual implica que en la prueba 2 se tenga una S_{wi} mayor. El efecto de diferentes S_{wi} en una muestra que experimenta imbibición espontánea fue explicado por (Gao & Hu, 2016), los cuales concluyeron que: "Un aumento de la saturación de agua inicial puede aumentar la movilidad de la muestra al agua debido a la mayor humectabilidad del agua causada por la interacción agua-roca, pero al mismo tiempo disminuir el gradiente de presión capilar (la fuerza impulsora)". El aumento de mojabilidad al agua hace que incremente el potencial de absorción de agua y conduce a una rápida absorción de este fluido al comienzo de la experimento de imbibición.

Un aspecto a destacar de esta muestra es que presenta bajos valores de porosidad y permeabilidad por lo que el tiempo que le lleva alcanzar un valor de peso constante o una tasa nula es considerablemente alto. Esto se debe a que el peso al equilibrio es proporcional a una medida de presión capilar mínima además de otros parámetros estructurales como: la porosidad, permeabilidad, tensión superficial, ángulo de contacto, tamaño de los poros, área de la sección transversal y gravedad (Cai et al., 2012).

MUESTRA N° 2

En la Figura 28 se muestra que las pruebas 1 y 2 experimentan una ganancia de peso inicial la cual comienza a relentizarse por debajo de los 346 segundos. No obstante, el peso se estabiliza sobre los 1728 segundos a un valor de peso de 1,1 y 1,092 gramos respectivamente.

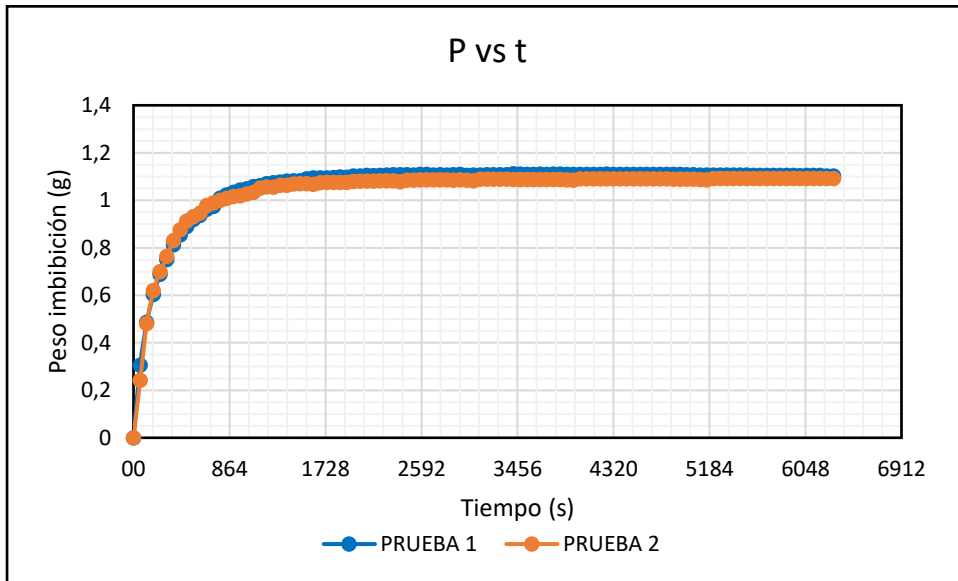


Figura 28. Gráfico de peso imbibido vs tiempo, muestra N°2.

Elaborado por: El Autor.

Por otra parte, la Figura 29 muestra que la tasa de imbibición alcanzada por la prueba 1 es de de 0,3 cm³/min la cual es mayor en comparación con la prueba 2 que presenta una tasa máxima de 0,250 cm³/min. En ambas pruebas las tasas decrecen rapidamente hasta valores cercanos a 0.12 cm³/ml a un tiempo menor a 10 minutos. Luego sobre los 100 minutos las tasas exhiben valores reducidos ubicandose por debajo de los 0,02 cm³/min.

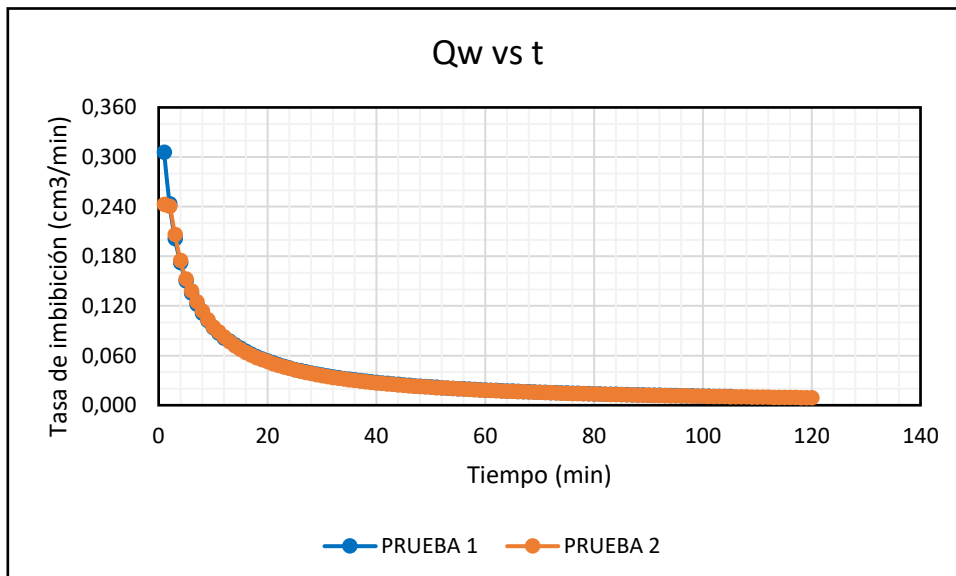


Figura 29 Tasa de imbibición vs tiempo, muestra N°2.

Elaborado por: El Autor.

Si se comparan los gráficos de tasa de imbibición vs tiempo en las dos pruebas (Figura 29), se observa que al inicio la tasa de imbibición en la prueba 1 presenta un valor ligeramente mayor que en la prueba 2, esto se debe a que la prueba 1 disponía de una Swi mayor que la prueba 2 ocasionando altas tasas iniciales debido a que el proceso de imbibición estaba gobernado por el aumento de la movilidad del agua.

MUESTRA N° 3

El comportamiento del peso de imbibición de esta muestra se evidencia en la Figura 30, de la cual se puede notar que, por debajo de los 100 segundos los valores de peso cambian rápidamente con el tiempo en ambas pruebas, luego se relentizan alrededor de 259 segundos y comienzan a estabilizarse sobre este tiempo. Ambas curvas tienden a aplanarse a un valor constante de 0.5 y 0.54 gramos respectivamente.

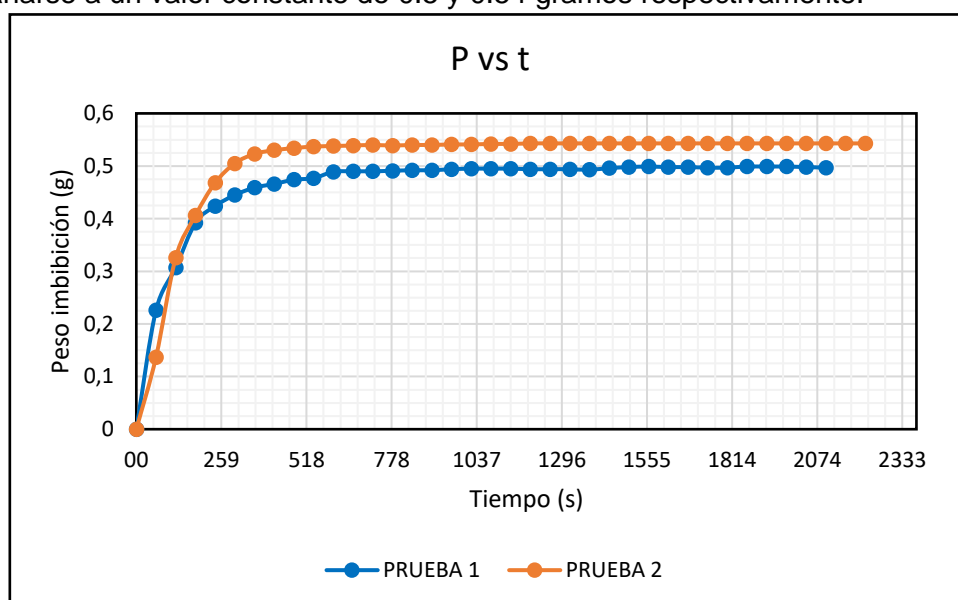


Figura 30. Gráfico de peso imbibido vs tiempo, muestra N°3.

Elaborado por: El Autor.

La tasas de imbibición iniciales en la prueba 1 alcanzan valores que superan los 0.22 cm³/min (Figura 31). En contraste, la prueba 2 experimenta tasas menores en el orden de 0.160 cm³/min. Posteriormente las tasas decrecen hasta 0.05cm³/min en un tiempo no mayor a 10 minutos. Finalmente se observa que las tasas caen por debajo de 0.02cm³/min indicando que se llegó a la máxima saturación de la muestra.

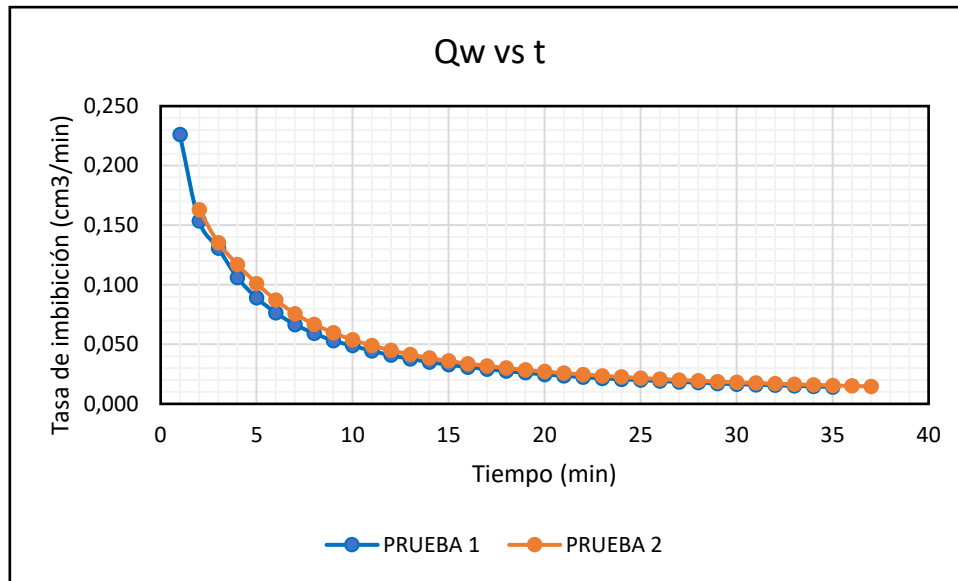


Figura 31. Tasa de imbibición vs tiempo, muestra N°3

Elaborado por: El Autor.

Al comparar los gráficos de tasa de imbibición de la Prueba 1 y 2 que se presentan en la Figura 31, se puede observar que la prueba 1 experimenta tasas superiores en comparación con la prueba 2. En este caso, el incremento de la mojabilidad al agua causado por una mayor S_{wi} tienen un impacto predominante en el proceso de imbibición al inicio por lo cual las tasas en la prueba 1 son más altas. Sin embargo en la prueba 2 se observa que las tasas de imbibición tienden a crecer superando a las tasas de la prueba 1. Esto se explica debido a que la presión capilar puede controlar el proceso de imbibición, teniendo la muestra seca el mayor gradiente de presión capilar (Gao & Hu, 2016). Ante esto, es posible decir que la muestra seca de la prueba 1 absorbe más agua que la prueba 2 debido a la influencia de la presión capilar.

Es importante mencionar que a las muestras 2 y 3 les tomó un lapso corto de tiempo alcanzar un valor constante de peso imbibido y una tasa de imbibición casi nula debido a que presentan valores de porosidad y permeabilidad relativamente mayores.

MUESTRA N° 4

En este caso, la Figura 32 muestra que tanto la prueba 1 y 2 relentizan sus valores de peso por debajo de 5184 segundos y se estabilizan sobre los 129600 segundos a valores de peso constante de 1.77 y 2.08 gramos respectivamente.

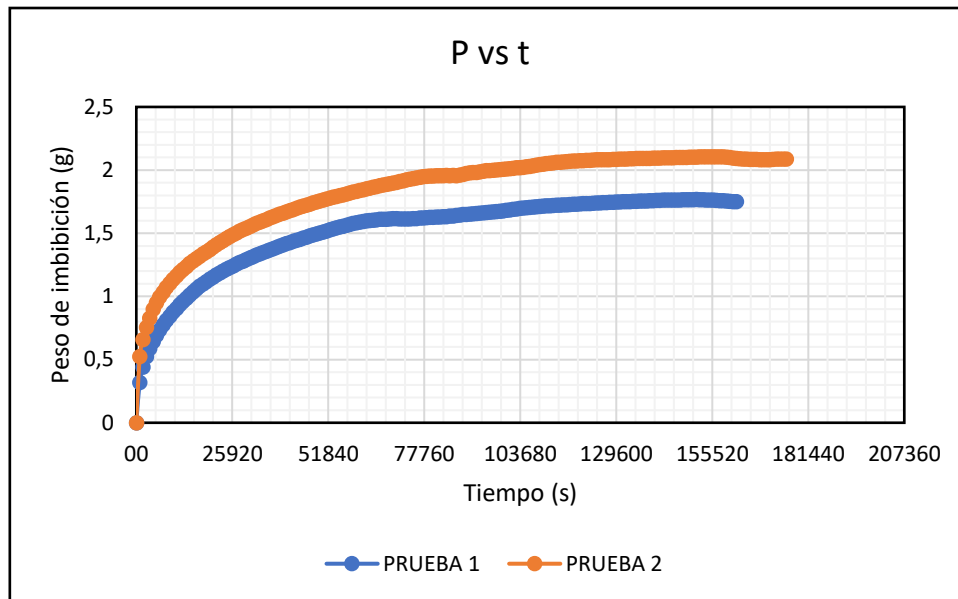


Figura 32. Gráfico de peso imbibido vs tiempo, muestra N°4.

Elaborado por: El Autor.

A su vez, la tasa de imbibición de la prueba 1 inicia con un máximo que supera los 0,02 cm³/min, cuyo valor es menor al de la tasa de la prueba 2 que rodea los 0,035 cm³/min. Las tasas caen por debajo de 0,015 cm³/min a tiempos menores a 100 minutos. Adicionalmente, las tasas se relentiza hasta alcanzar valores por debajo de 0,001 cm³/min a tiempos muy prolongados. Esto se evidencia en la Figura 33.

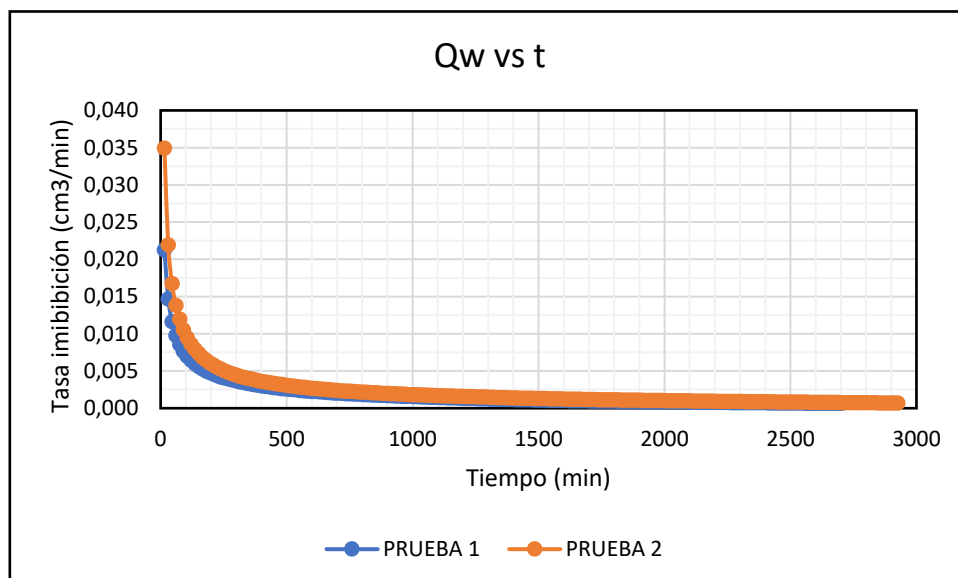


Figura 33. Tasa de imbibición vs tiempo, muestra N°4.

Elaborado por: El Autor.

El comportamiento de las gráficas de tasa y peso de imbibición de la Figura 32 y 33 se deben a que el peso seco en la prueba 1 fue menor al de la prueba 2, lo cual implica

que la muestra usada en la prueba 1 disponga de una S_{wi} menor que la muestra de la prueba 2. Luego, si se comparan los gráficos de peso y tasa de imbibición vs tiempo en las dos pruebas, se observa que al inicio la prueba 1 presenta valores menores comparados con la prueba 2. Esto se explica debido a que primero se saturan los capilares más pequeños ocasionando presiones capilares mayores lo cual permite que la tasa de desplazamiento inicial sea mayor (Dong et al., 2004). Es decir que la transferencia de fluido mojante se ve influenciada principalmente por las fuerzas capilares de la muestra más seca.

MUESTRA N° 5

La Figura 34 permite notar que, la ganancia de peso imbibido en ambas pruebas comienzan a lentificarse por debajo de los 8640 segundos y se estabilizan sobre los 216000 segundos a un valor de peso de 1,8 y 1,82 gramos respectivamente.

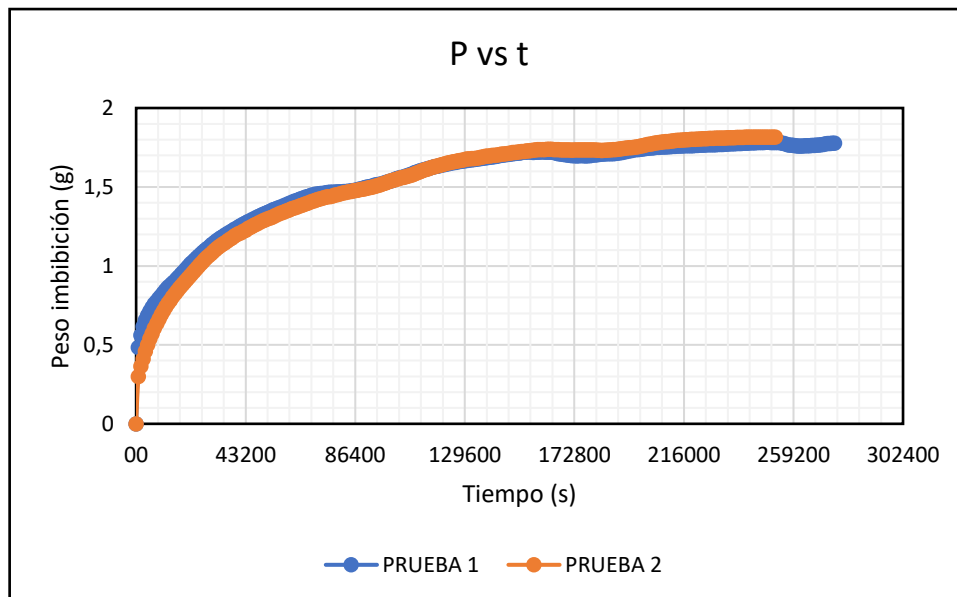


Figura 34. Gráfico de peso imbibido vs tiempo, muestra N°5.

Elaborado por: El Autor.

Por otro lado, las tasas de imbibición de la prueba 1 y 2 parten de valores que superan los 0,032 y 0,20 cm³/min luego decrecen rápidamente hasta alcanzar valores por debajo de 0,012 cm³/min en tiempos menores a 100 minutos (Figura 35). Finalmente, cuando se alcanza un peso constante las tasas rodean valores muy por debajo de los 0,001cm³/min.

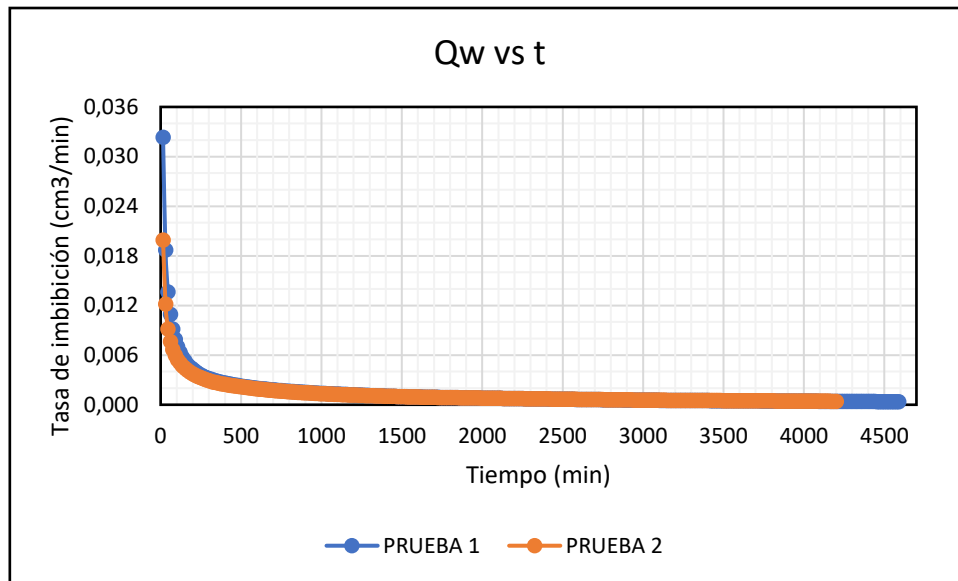


Figura 35. Tasa de imbibición vs tiempo, muestra N°5.

Elaborado por: El Autor.

Al comparar los gráficos de tasa de imbibición de la Prueba 1 y 2 presentados en la Figura 35, se evidencia que la prueba 1 experimenta tasas más altas de imbibición en comparación con la prueba 2. En esta muestra el incremento de la mojabilidad al agua ocasionado por una mayor S_{wi} dominan el proceso de imbibición al inicio por lo cual las tasas en la prueba 1 son más altas.

3.1.5 DETERMINACIÓN DE VOLUMEN POROSO

En la tabla 5 se muestran los valores de volumen poroso alcanzados en las diferentes muestras sometidas a imbibición espontánea AFO bajo condiciones normales de presión y temperatura.

Tabla 5. Valores de volumen poroso determinados por el método de saturación.

MUESTRA N°	$T_{\text{equilibrio}}$	$\Delta P @ \text{max. saturación}$	ρ_w	V.poroso Imbibición	V.poroso Proroperm	% V. poroso ocupado por imbibición	Φ
	(s)	(g)	(g/cm ³)	(cm ³)	(cm ³)	%	%
1	129600	1,700	1,000	1,700	3,070	55,375	19,39%
2	1728	1,092	1,000	1,092	4,910	22,240	22,15%
3	778	0,543	1,000	0,543	4,5	12,067	21,65%
4	155520	2,080	1,000	2,080	3,050	68,197	19,26%
5	241920	1,820	1,000	1,820	3,600	50,556	17,04%

Elaborado por: el Autor.

El volumen poroso por imbibición no llega a alcanzar el volumen poroso total debido a que se requiere de una presión mayor para saturar espacios porosos más pequeños y

como se mencionó en este proceso de desplazamiento actúa solo la presión capilar. Se puede apreciar que las muestras con más alta porosidad alcanzan un porcentaje menor de volumen poroso en comparación con las muestras con bajas porosidades. Cabe mencionar que este porcentaje fue alcanzado en tiempos sumamente cortos comparados con el tiempo requerido por las muestras poco porosas.

3.1.6 PRUEBAS EN MUESTRAS TRATADAS CON SURFACTANTE HIDROFÓBICO

A continuación se presenta una comparación entre las curvas de peso de imbibición espontánea de las muestras 1,4 y 5 sin tratar y tratadas con una solución de surfactante hidrofóbico del 4%. La densidad al agua y la viscosidad consideradas fueron: $\rho_{sol} = 1,0057 \text{ g/cm}^3$ y $\mu_{sol} = 1,96 \text{ cP}$.

MUESTRA N° 1

En la Figura 36 se observa que antes del tratamiento con surfactante el peso de agua imbibido fue significativamente mayor que de la muestra tratada con el tensioactivo. La muestra sin tratamiento alcanzó un valor de peso de 2.1 gramos después de 155520 segundos (43 horas). Por otro lado, al usar la muestra tratada con surfactante se logra un peso imbibido de 1.66 gramos después del mismo tiempo que experimentó la muestra sin tratar (43 horas). Finalmente se puede decir que la muestra tratada con surfactante exhibe un decremento de peso imbibido del 20.95% comparado con la muestra antes del tratamiento.

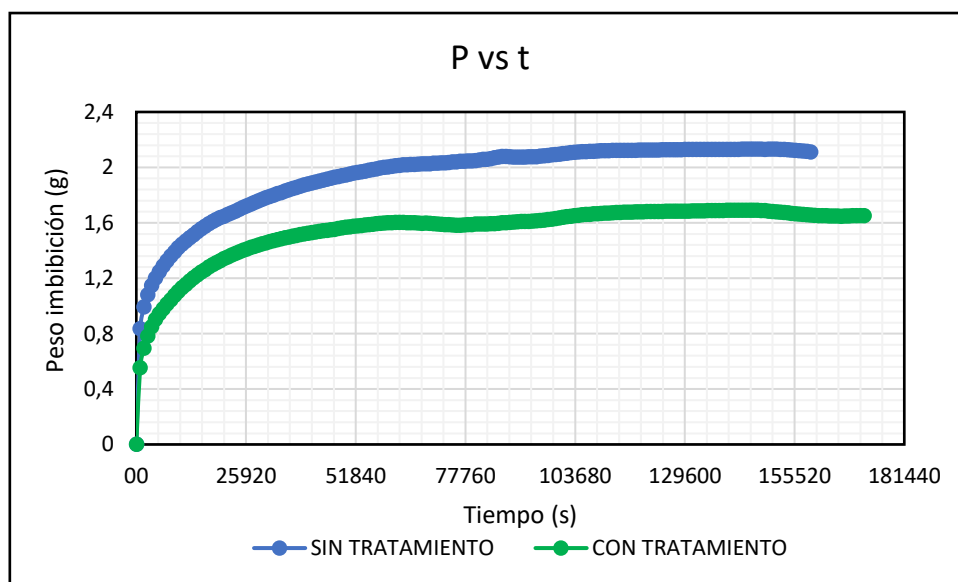


Figura 36. Diferencia de peso imbibido en muestra 1 tratada con surfactante hidrofóbico.

Elaborado por: el Autor.

MUESTRA N° 4

En esta muestra el peso imbibido también fue mayor que de la muestra tratada con el surfactante (Figura 37). Se llegó un valor de peso de 2.08 gramos después de 155520 segundos (43 horas). Por otro lado, al usar la muestra tratada con surfactante se logra un peso imbibido de 1.85 gramos a 43 horas de la prueba. Finalmente se puede decir que la muestra tratada con surfactante exhibe un decremento de peso imbibido del 11.06% comparado con la muestra antes del tratamiento.

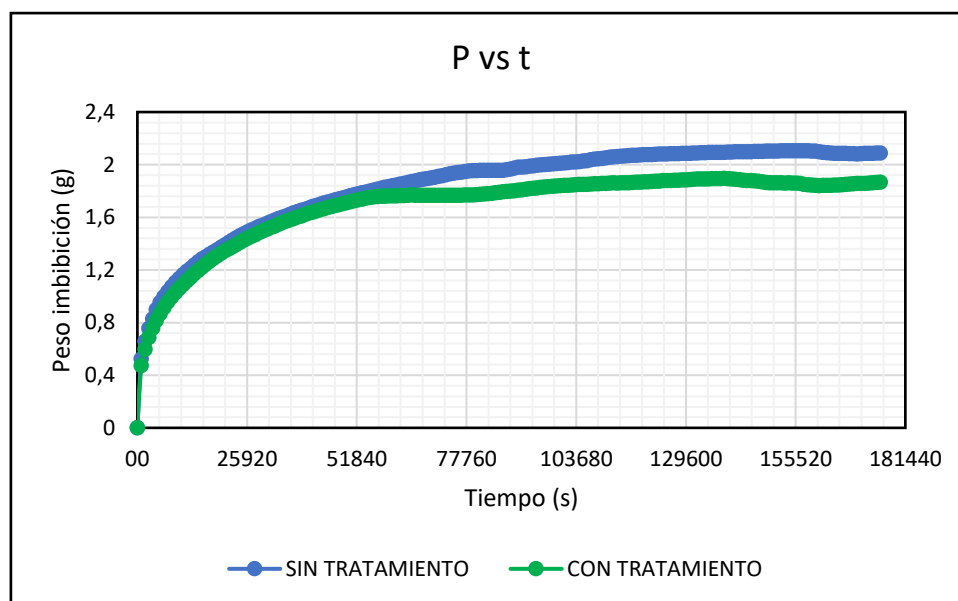


Figura 37. Diferencia de peso imbibido en muestra 4 tratada con surfactante hidrofóbico.

Elaborado por: el Autor

MUESTRA N° 5

La muestra 5 sin ser tratada con el surfactante (Figura 38), alcanza un valor de peso de 1.81 gramos después de 207360 segundos (57 horas). Mientras que, al usar la muestra tratada con surfactante se logra un peso imbibido de 1.5 gramos al cabo del mismo tiempo. Con esto, se puede decir que la muestra tratada con surfactante presenta un decremento de peso imbibido del 17.13% comparado con la muestra sin tratamiento.

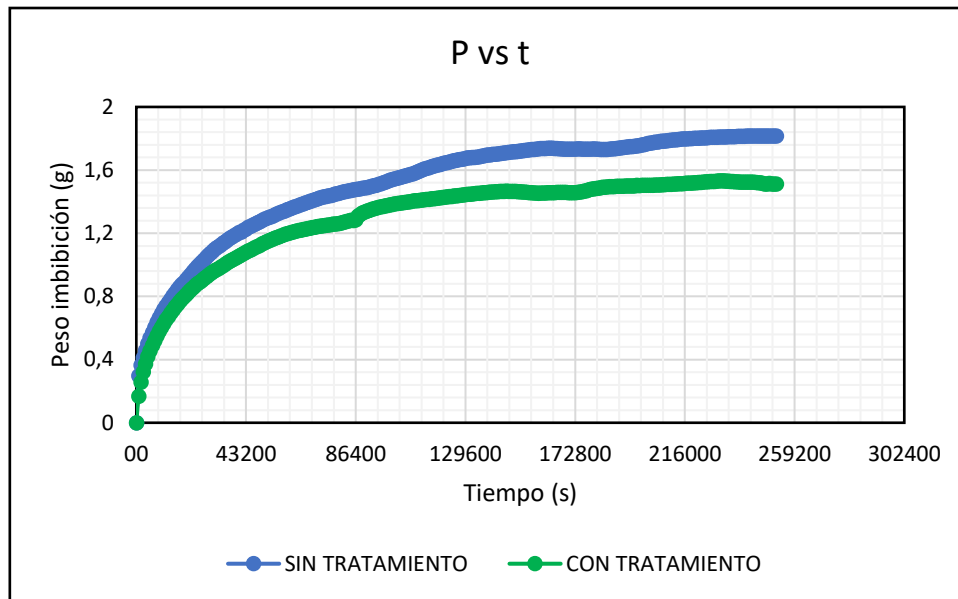


Figura 38. Diferencia de peso imbibido en muestra 5 tratada con surfactante hidrofóbico.

Elaborado por: el Autor

Finalmente, se puede decir que los resultados obtenidos corroboran la efectividad del procedimiento debido a que se adquirieron datos consistentes que plasmaron de manera gráfica el comportamiento real del peso y tasa de imbibición como una función del tiempo en distintas muestras que presentaban diferentes características petrofísicas y condiciones iniciales.

CAPÍTULO 4

4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1.1 CONCLUSIONES

En base a este estudio se llegó a las siguientes conclusiones:

- 1) El arreglo montado para el análisis de imbibición espontánea comúnmente usado por investigadores tales como: Zhang, Li, Horne, Gao y Hu, resultó ser muy práctico y efectivo debido a que nada más requirió del uso de una balanza de alta precisión, un ordenador, la muestra y el fluido mojante (agua). Este equipo fue capaz de obtener datos de peso imbibido de manera continua en un intervalo de registro de 1 segundo. La ventaja de disponer datos en tan corto lapso de tiempo permitió registrar los más minúsculos cambios de peso. No obstante, la cantidad de datos obtenidos fue basta, necesitándose obtener una muestra representativa.
- 2) El uso de un procedimiento que utiliza imbibición espontánea del tipo AFO es fácil de replicar debido a que todas las caras de la muestra están en contacto con el agua. Con esta forma de llevar a cabo la prueba se consiguieron tasas de imbibición relativamente altas alcanzando valores de hasta $0.050\text{cm}^3/\text{min}$. Además al considerar correcciones por peso de empuje, se pueden obtener errores no muy considerables al comparar $P'e$ y Pe , como los presentados en las muestras tratadas en este estudio cuyos valores se encontraron en un rango de 0 a 5%.
- 3) La metodología presentada permitió someter a imbibición espontánea a muestras de bajas porosidades y permeabilidades como las de Socorro, lográndose llegar a la máxima saturación de fluido mojante a tiempos muy prolongados en un rango de 43-67 horas.
- 4) Los datos obtenidos con este procedimiento fueron útiles para medir el porcentaje de volumen poroso imbibido en las muestras, el cual fue considerable al llegar a valores entre 50 y 68%.
- 5) Este procedimiento nos permite utilizar muestras secas y con diferentes saturaciones de agua iniciales las cuales podrían tener un efecto sobre los datos obtenidos. Esto se pudo evidenciar en el análisis gráfico presentando tasas de imbibición iniciales cuyos valores estaban en el orden de 0.02 a $0.055\text{ cm}^3/\text{min}$ con posteriores decrementos cercanos a tasas casi nulas.
- 6) La metodología presentada, también ofrece la posibilidad de experimentar imbibición espontánea en muestras con porosidades y permeabilidades

relativamente mayores como las de las areniscas U y T, alcanzándose pesos constantes de imbibición en tiempos cortos en un orden de 10 y 100 minutos.

- 7) Finalmente, con este procedimiento consistente y replicable se puede experimentar imbibición espontánea en muestras tratadas con surfactantes esto con la intención de observar los cambios de movilidad del agua. Como ejemplo de esta situación se pueden mencionar los decrementos de peso de imbibición en las muestras de Socorro que tomaron valores en un rango de 11 al 20%.

4.1.2 RECOMENDACIONES

- 1) En el desarrollo del procedimiento para medir datos de peso y tasa de imbibición espontánea un punto de alta prioridad es escoger de manera correcta el peso a la sumergencia P_{AO} para evitar altos errores al comparar P_e y $P'e$, lo cual ocasionaría curvas de peso y tasas de imbibición incorrectas. Para esto es recomendable visualizar el peso sobre el cual las medidas incrementan de manera gradual de tal forma que este peso al ser adicionado $P'e$ de como resultado un valor mayor o igual al peso seco.
- 2) Es aconsejable asegurarse que las muestras se encuentren lo más secas posibles si no se desea que el proceso de imbibición espontánea sea influenciado por la saturación de agua inicial de la muestra lo cual causa un incremento en la movilidad del agua. Para lograr esto es aconsejable secar las muestras a una temperatura de 105° por un lapso de tiempo superior a 8 horas, esto de acuerdo a la experiencia de investigadores en este campo tales como: Zhang, Li, Horne, etc.
- 3) Al medir el volumen poroso imbibido es necesario considerar el peso seco de la muestra por lo cual es importante recalcar la necesidad de un buen secado de las mismas.
- 4) Para corroborar que el proceso de imbibición por AFO otorga las más altas tasas de imbibición sería aconsejable realizar pruebas de imbibición cambiando las condiciones de borde tales como: TEC, TEO Y OEO de tal manera que se pueda comparar dichas tasas. Además, es posible llevar a cabo esta variante de prueba de imbibición espontánea utilizando el procedimiento detallado en este estudio debido a que este fue desarrollado para muestras totalmente sumergidas en fluido mojante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAPG. (26 de marzo de 2019). AAPG WIKI. Obtenido de AAPG WIKI: [https://wiki.aapg.org/Reservoir#:~:text=Reservoir%20rocks%20are%20rocks%20that,hydrocarbons%20\(oil%20or%20gas\).](https://wiki.aapg.org/Reservoir#:~:text=Reservoir%20rocks%20are%20rocks%20that,hydrocarbons%20(oil%20or%20gas).)
- AAPG. (20 de enero de 2020). AAPG WIKI. Obtenido de AAPG WIKI: <https://wiki.aapg.org/Porosity>
- AAPG. (24 de enero de 2022). AAPG WIKI. Obtenido de AAPG WIKI: <https://wiki.aapg.org/Wettability>
- Ahmed, T. (2019). Reservoir Engineering Handbook (2019 ed.). Oxford: Elsevier.
- AntonPaar. (2023). Anton Paar. Obtenido de Anton Paar: <https://wiki.anton-paar.com/be-en/water/>
- Cai, J., Hu, X., Standnes, D., & You, L. (2012). An analytical model for spontaneous imbibition in fractal porous media including gravity. ELSEVIER, 6.
- Celi, J., Gómez, F., & Enríquez, B. (2021). Análisis de la Tensión Interfacial Entre Dos Fluidos Inmiscibles con el Uso de Cuatro Surfactantes (Catiónico, No-lónico), de la Arena Productora. Revista Politécnica, 14.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). MECÁNICA DE FLUIDOS FUNDAMENTOS Y APLICACIONES. México: McGraw Hill.
- Craft, B., & Hawkins, M. (1968). INGENIERÍA APLICADA DE YACIMIENTOS PETROLÍFEROS. Madrid: TECNOS.
- Cuadros, V. (2018). CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DE LA FORMACIÓN SOCORRO EN EL CAMPO PACOA. Quito: UCE.
- Gao, Z., & Hu, Q. (2016). Initial water saturation and imbibition fluid affect spontaneous imbibition into Barnett shale samples. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 11.
- Hernández, C., & Carpio, N. (2019). Introducción a los tipos de muestreo. ALERTA, 4.
- J.A, F. (1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties. . International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics, 14.

- Li, K., & Horne, R. N. (2001). Characterization of Spontaneous Water Imbibition Into Gas-Saturated Rocks. SPE Journal, 10.
- Mason, G., Ferno, M., Haugen, A., Brattekas, B., & Morrow, N. (2015). Spontaneous Imbibition Revisited - A New Method to Determine Kr and Pc by Inclusion of the Capillary Backpressure. Dresden, 18.
- Mason, G., Fischer, H., R.Morrow, N., & Ruth, D. (2009). Open, Spontaneous Counter-Current Imbibition into Core Samples with All Faces. Transp Porous Med (2009), 18.
- Morales, A. (1 de febrero de 2011). Petróleo América. Obtenido de Petróleo América: <http://www.petroleoamerica.com/2011/02/inyeccion-de-surfactantes-en.html>
- Nativi, X. (2018). AMBIENTE SEDIMENTARIO Y PROCEDENCIA TECTÓNICA DE DEPOSITACIÓN DE LA ARENISCA BASAL DE LA FORMACIÓN SOCORRO DEL GRUPO ANCÓN (EOCENO MEDIO), ACANTILADOS DEL CAMPO ANCÓN, ÁREAS ANCÓN Y CACIQUE, PENÍNSULA DE SANTA ELENA. Guayaquil: UG.
- Pérez, J. J., F. L., Lelis, J. M., Manuel, J., Andrade, T., & Velazquez, E. A. (2009). TENSÍMETRO DIGITAL PARA MEDIR ÁNGULOS DE CONTACTO LÍQUIDO-SÓLIDO. MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, 6.
- Pilaquina, D. (2021). MÉTODOS NUMÉRICOS. En ANÁLISIS DE ERRORES (pág. 30). Quito: EPN.
- RADWAG. (2023). RADWAG. Obtenido de RADWAG: <https://radwag.com/pdf2/es/USB-Free-Link-ES/USB-Free-Link-ES.html#p=2>
- RADWAG. (2023). RADWAG. Obtenido de RADWAG: <https://radwag.com/es/balanza-de-precision-ps-1000-r2,w1,PP6,101-102-126-101#9>
- Riascos, I. D. (2012). Simulación molecular de tres tipos de surfactantes para alterar humectabilidad en yacimientos de gas condensado. Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- SLB. (2023). SLB ENERGY GLOSARY. Obtenido de SLB ENERGY GLOSARY: <https://glossary.slb.com/es/>

- SLB. (4 de enero de 2023). SLB ENERGY GLOSSARY. Obtenido de SLB ENERGY GLOSSARY: <https://glossary.slb.com/es/terms/i/imbibition>
- SLB. (4 de enero de 2023). SLB ENERGY GLOSSARY. Obtenido de SLB ENERGY GLOSSARY: <https://glossary.slb.com/en/Terms/c/coreflooding.aspx>
- SLB. (2023). SLB ENERGY GLOSSARY. Obtenido de SLB ENERGY GLOSSARY: <https://glossary.slb.com/en/terms/v/viscosity#:~:text=A%20property%20of%20fluids%20and,is%20used%20for%20mud%20measurements.>
- SLB. (2023). SLB ENERGY GLOSSARY. Obtenido de SLB ENERGY GLOSSARY: https://glossary.slb.com/es/terms/c/capillary_pressure_curve
- SPE. (4 de junio de 2015). PETROWIKI. Obtenido de PETROWIKI: https://petrowiki.spe.org/Interfacial_tension
- technologie, I. (2023). lazzero technologie . Obtenido de lazzero technologie : <https://www.lazzero.com/en/technology/thermodynamics-and-vacuums/flow-regimes>
- Trujillo, C., Mesa, H., Londoño, J., Tique, N., & Velez, Y. (2013). LOS SURFACTANTES Y SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA. Colombia: ECAPETROL SAS.
- Welte, B. P., & Tissot, D. H. (1984). Petroleum Formation ' and Occurrenc. California: y Sprrioger-Verlag Berlin Heidelber.
- Xu, X., Wan, Y., Li, X., Hu, Y., Tian, S., Mei, Q., . . . Guo., C. (2021). Microscopic imbibition characterization of sandstone reservoirs and theoretical model optimization. Scientific Reports, 14.
- Zhang, S., Pu, H., & Zhao, J. X. (2019). Experimental and Numerical Studies of Spontaneous Imbibition. Energy and Fuels, 12.