



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

EFECTO DE LA MOJABILIDAD

SOBRE EL FLUJO A TRAVÉS DE UN MEDIO POROSO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A

DANTE HERNÁNDEZ DÍAZ

TUTOR: DR. JOSÉ ROBERTO ZENIT CAMACHO



México, D.F.

2013

\*\*\*\*

A mis padres:  
Laurencio Hernández Aguilar  
y  
Sabeli Diaz Waldo  
Por darme todo su  
apoyo y cariño  
para que cumpliera mis metas.

A mis Hermanos  
Araceli  
Salvador  
Sabeli.  
Por su ayuda y por estar  
a mi lado todo este tiempo.

## Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres por todos los sacrificios que han hecho para sacar adelante a mis hermanos y a mi, agradezco a mis hermanos por su apoyo a lo largo de mi carrera, también doy las gracias a mi hermano mayor Marcos por motivarme y por mantenerme interesado en la ingeniería.

También agradezco a mi tutor el Dr. Roberto Zenit Camacho y al laboratorio de Reología del Instituto de Investigación en Materiales, donde se llevo a cabo este trabajo; al Dr. Oscar Arturo Chavez Lopez con quien tuve el placer de colaborar y quien además fungió como codirector de tesis.

Doy gracias a los compañeros y compañeras de laboratorio, los que están y los que se fueron, por dejarme ser parte de este equipo.

Este trabajo se realizó gracias al apoyo de la empresa Temple que participa en el proyecto *SENER-HIDROCARBUROS 143927* y el proyecto *PAPIIT-LOCOMOCIÓN DE MICRO-ORGANISMOS EN FLUIDOS COMPLEJOS IN101312*

## Resumen

El presente escrito es un trabajo experimental sobre el flujo a través de materiales porosos, enfocando el análisis, al efecto que producen los cambios en la mojabilidad del medio. Para esto fue necesaria la fabricación de varias muestras de materiales porosos con el propósito de variar la porosidad, mediante el uso de recubrimientos se modificó la mojabilidad del medio; también se llevo a cabo el diseño de un dispositivo que nos permita comparar los diferentes tipos de muestras. Éste estudio está dirigido al sector petrolero y tiene como finalidad hallar alternativas que faciliten la extracción del crudo.

En el primer capítulo se da una breve descripción sobre algunos antecedentes relacionados con el estudio de flujo a través de materiales porosos. Posteriormente en el capítulo dos, se explican las propiedades y los modelos matemáticos utilizados para la descripción del fenómeno. El capítulo tres esta dirigido al diseño y construcción de las muestras de material poroso y del dispositivo experimental, además se incluye un protocolo para la realización de los experimentos. Por ultimo, en el capítulo cuatro, se muestran los resultados y las conclusiones obtenidas.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos . . . . .	4
<b>2. Materiales porosos</b>	<b>5</b>
2.1. Porosidad . . . . .	6
2.2. Ley de Darcy . . . . .	9
2.2.1. Permeabilidad . . . . .	10
2.2.2. Flujo en dos fases . . . . .	11
2.2.3. Rango de aplicación de la ley de Darcy . . . . .	12
2.3. Mojabilidad . . . . .	13
<b>3. Diseño experimental</b>	<b>17</b>
3.1. Fabricación de núcleos . . . . .	17
3.1.1. Medición de la porosidad del núcleo . . . . .	18
3.1.2. Mojabilidad y recubrimiento de las partículas . . . . .	20
3.2. Dispositivo experimental . . . . .	21
3.3. Protocolo experimental . . . . .	21
3.3.1. Flujo monofásico . . . . .	23
3.3.2. Flujo bifásico . . . . .	24
3.4. Visualización del fenómeno . . . . .	24
<b>4. Resultados y discusión</b>	<b>27</b>
4.1. Flujo monofásico . . . . .	27

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	v
4.2. Flujo bifásico . . . . .	31
<b>5. Conclusiones</b>	<b>35</b>
<b>A. Planos del cilindro contenedor</b>	<b>37</b>
<b>B. Visualización</b>	<b>39</b>
<b>C. Cálculo de permeabilidad</b>	<b>41</b>
<b>D. Presentaciones en congresos.</b>	<b>44</b>
<b>E. Ley de Darcy en forma adimensional.</b>	<b>45</b>
<b>Referencias</b>	<b>47</b>



# Capítulo 1

## Introducción

El flujo a través de un medio poroso es un tema de interés para distintas disciplinas como la hidrología, ingeniería civil, ingeniería biomédica, ingeniería petrolera, entre otras. Principalmente por los procesos que se presentan en cada una de las distintas áreas. Los fenómenos más abordados van desde la convección, la conducción eléctrica y problemas de transporte de masa. El pionero en este tema fue el ingeniero francés Henry Darcy, en 1856 mientras diseñaba filtros para el sistema de agua potable de la ciudad de Dijon, llevo a cabo una serie de experimentos que lo llevaron a descubrir una relación matemática ahora conocida como la Ley de Darcy [1, 2]. Esta ley ha sido la base para la gran mayoría de investigaciones sobre materiales porosos.

Los trabajos posteriores en esta área, tenían como objetivo estudiar fenómenos que involucrasen la interacción entre un flujo y un medio poroso, enfocándose en la determinación de las propiedades del medio. Algunos autores se dedicaron a estudiar el flujo en dos fases, adaptando la ley de Darcy de acuerdo a las condiciones del problema [3]; por otra parte, se realizaron experimentos sobre la mojabilidad de superficies porosas [4], lo que en un futuro llamaría la atención del sector petrolero; los estudios de Biot aportaron un fuerte base matemática con su análisis sobre materiales porosos elásticos [5]; posteriormente, se buscaron modelos que pudieran describir el transporte de masa y momentum dentro de un medio poroso [6, 7]; más adelante se buscaron maneras de representar en forma matemática la estructura del medio [8], y así, poder simular las condiciones de flujo.

Con el paso del tiempo los materiales porosos se volvieron parte importante dentro de los procesos industriales. Los avances obtenidos de las investigaciones proporcionaron beneficios que abarcan distintas áreas como: el secado de maderas, fenómenos de absorción, procesos de destilación y vaporización, además de aplicaciones en el ramo farmacéutico y en la industria alimentaria; también podemos encontrar avances en otros sectores como el biológico en donde se han realizado investigaciones sobre el proceso de oxigenación de la sangre a través de los pulmones [9]; aunque no logran destacar mucho por sus propiedades mecánicas, se ha buscado la forma de explotar las cualidades morfológicas de éste tipo de materiales.

Las investigaciones son numerosas y la industria petrolera ha sido la más beneficiada, debido a que gran parte de la investigación se relaciona con los procesos de extracción de petróleo. Como se mencionó anteriormente, la industria petrolera ha mostrado interés en el tema, por la necesidad que se tiene de encontrar maneras más económicas para extraer el crudo; sin embargo la tarea no es sencilla debido a las condiciones presentes en los pozos de extracción. Existen características como la mojabilidad, que se deben considerar para predecir las condiciones en los pozos [10]; además, debe tenerse en cuenta que el flujo involucra dos fluidos distintos (agua-aceite), y también se incluye el flujo de una segunda fase [11]. Debido a estas condiciones, la investigación experimental ha sido una de las mejores opciones para el análisis de flujo a través de materiales porosos. Sin embargo, extraer muestras del material directamente de los pozos para estudiarlo, es una tarea bastante complicada, aun así, ha sido posible realizar experimentos utilizando arena empaquetada en capsulas [3, 12]; por otra parte es posible reproducir un arreglo poroso por medio de empaquetamientos de esferas de vidrio [13]. Esto facilita la tarea del investigador, ya que puede recrear distintos medios simplemente jugando con las dimensiones de las partículas o cambiando el acomodo de estas.

En este trabajo se analizara el comportamiento de un flujo bifásico que circula a través de un material poroso, tomando en cuenta las propiedades del medio como: la permeabilidad, porosidad y mojabilidad. Se considera que las propiedades antes mencionadas son las que afectan directamente la carga de bombeo, por lo que la variación de estas propiedades nos dará información útil para nuestro análisis. El medio poroso es construido con esferas

de vidrio de distintos tamaños, el método por el cual se construyen estas muestras, mejor conocidas como núcleos en el ámbito petrolero, será tratado de manera más detallada en la sección 3.1.

Ya que es importante conocer el efecto que tiene la mojabilidad del medio sobre la carga de bombeo, las esferas fueron tratadas con un recubrimiento que modifica las condiciones superficiales del material convirtiendolo en hidrofóbico. Para estudiar el comportamiento del flujo se construyó un dispositivo que permite variar los parámetros antes mencionados, la descripción del dispositivo así como del protocolo experimental, serán tratados en la sección 3.2. Con el propósito de entender el fenómeno de la mojabilidad, se llevaron a cabo una serie de visualizaciones en las que se muestra la interacción de las dos fases dentro del medio poroso. El análisis de los núcleos mostrará la diferencia entre los dos distintos medios (hidrofóbico e hidrofílico), así como la diferencia entre flujo bifásico y monofásico.

## 1.1. Objetivos

EL objetivo general es estudiar el efecto que tiene la mojabilidad de un material poroso sobre la carga de bombeo, con la finalidad de generar un criterio que a la larga permita reducir el costo de bombeo en el área de extracción.

Entre los objetivos particulares se encuentran: la construcción y análisis de núcleos de prueba con distintas porosidades, además de la fabricación de un dispositivo que permita el estudio de dichos núcleos y por último el análisis o comparación entre un material hidrofóbico e hidrofílico.

Debido a la influencia que tiene la mojabilidad sobre las propiedades del medio [11, 14], se trabajará con una mezcla de fluidos, con el propósito de emular las condiciones del sistema aceite/salmuera/roca, que se explica en la sección 2.3, y que es común encontrarlo en yacimientos petroleros, además la introducción de un flujo bifásico es completamente necesaria para observar el efecto de la hidrofobicidad del material.

# Capítulo 2

## Materiales porosos

Los materiales porosos, como su nombre lo indica, son materiales que en su constitución poseen espacios vacíos o huecos llamados poros, estos están contenidos dentro de una estructura conocida como matriz. Este tipo de materiales se encuentran fácilmente en la naturaleza (figura 2.1), así, tenemos ejemplos como: la madera, las rocas e incluso algunos órganos del cuerpo humano; gracias a sus características geométricas, cumplen con la tarea de filtrar y separar sustancias, algunos ejemplo son, el proceso de sudoración que ocurren en la piel y el proceso de oxigenación de la sangre realizado por los pulmones; también por su misma estructura tienen cierta resistencia al impacto que puede apreciarse al golpear una tabla de madera o en los huesos cuando se realiza algún deporte.



Figura 2.1: Ejemplo de materiales porosos

Con la tecnología, ahora es posible recrear la estructura porosa adaptando las propiedades del material para utilizarlos en procesos químicos [15], como selectores moleculares o incluso en aplicaciones biomédicas [9]. Las propiedades de un medio poroso dependen de la geometría y del tipo de material de la matriz; así al comparar una matriz de madera con una de roca se aprecia una diferencia en su estructura, esto repercute en las propiedades del medio como la permeabilidad y la mojabilidad, de las cuales se hablará más adelante.

## 2.1. Porosidad

La porosidad es una medida de la cantidad de poros presentes en el material y representa una fracción del volumen que ocupan los poros dentro de la matriz, esto es: si se tiene una porosidad del 50 % quiere decir que la mitad del volumen del material son espacios huecos y la parte restante es la matriz sólida, también puede verse como una medida de la capacidad que tiene el material para almacenar algún fluido. La porosidad puede calcularse de acuerdo a la ecuación 2.1:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t}, \quad (2.1)$$

donde  $V_v$  es el volumen de los espacios vacíos del material,  $V_t$  es el volumen total del sólido incluyendo los espacios huecos y  $\phi$  es la porosidad; a pesar de que  $\phi$  indica la cantidad de poros presentes en el material, ésta no brinda información acerca de la interconexión entre ellos. Los enlaces entre poros son los que permiten que un fluido pueda circular a través del material, a estas conexiones entre los poros se les conoce también con el nombre de gargantas [16]. Para saber que capacidad tiene un material para conducir un fluido, se recurre a otro tipo de porosidad conocida como efectiva, la cual nos indica la cantidad de poros que están conectados, y por tanto son capaces de conducir uno o más fluidos. En oposición a esta tenemos la porosidad no efectiva, que de igual forma proporciona una medida de la cantidad de poros, pero de los que se encuentran aislados y en consecuencia pueden o no contener algún fluido, pero no afectan en nada la cantidad de flujo que circula. La relación entre estas tres porosidades podemos apreciarla en la ecuación 2.2. Aquí podemos notar que al juntar ambos tipos de porosidad regresamos a la porosidad total del material,

$$\phi = \phi_{efec} + \phi_{no\ efec}. \quad (2.2)$$

La mezcla de estos dos tipos de porosidad se presenta en la gran mayoría de los materiales porosos. Para ilustrar de forma más clara lo anterior observemos la figura 2.2, aquí la zona oscura representan los espacios por donde puede transitar el flujo (porosidad efectiva), mien-

tras que la zona gris son espacios en los cuales el fluido no se mueve (porosidad no efectiva). Este trabajo tiene como propósito el análisis de flujo a través de un medio, por lo tanto, la porosidad efectiva es el parámetro geométrico más importante a considerar.

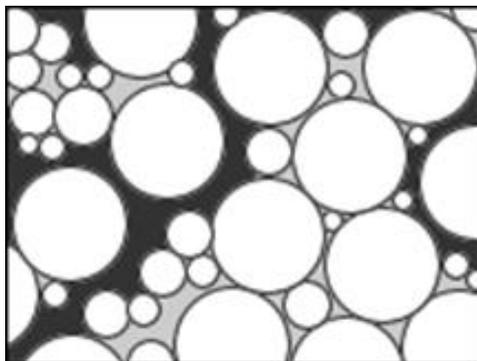


Figura 2.2: Porosidad efectiva y no efectiva

En medios fabricados en laboratorio, es conveniente simular una estructura porosa por medio de partículas esféricas [13], de esta manera, se pueden hallar valores de porosidad realizando un análisis por medio de celdas unitarias; las dos más comunes son la cubica y la romboédrica (figura 2.3); la porosidad de estas, puede calcularse con el factor de empaquetamiento de una celda cubica simple (CS) para el caso cubico; para el caso romboédrico, se utiliza el factor de empaquetamiento de una celda cubica centrada en caras (CCC). La relación entre el factor de empaquetamiento ( $FE$ ) y la porosidad se aprecia en la ecuación 2.3.

$$\phi + FE = 1. \quad (2.3)$$

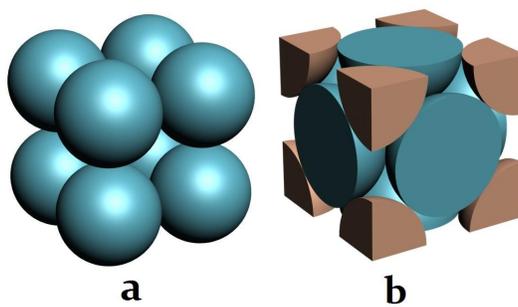


Figura 2.3: Celdas unitarias a) Cubica simple, b) Cubica centrada en caras.

Sabemos que el factor de empaquetamiento es una razón del volumen de esferas entre el volumen de la celda; por lo tanto, este factor nos da el porcentaje en volumen, de la parte sólida de la celda, así que el volumen restante es la porosidad del material, y al sumar ambos factores, tendremos como resultado la unidad.

Para el cálculo del factor de empaquetamiento tenemos:

$$FE = \frac{V_{esferas}}{V_{celda}} = \frac{N_{esf} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3}{a^3}; \quad (2.4)$$

en la ecuación anterior  $N_{esf}$  es el número de esferas presentes en la celda,  $r$  es el radio de las esferas y  $a$  es la longitud de una de las aristas de la celda unitaria. La porosidad se despeja de la ecuación 2.3 y se sustituyen los valores de  $N_{esf}$  y  $a$  para cada caso. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo de ambos tipos de empaquetamiento.

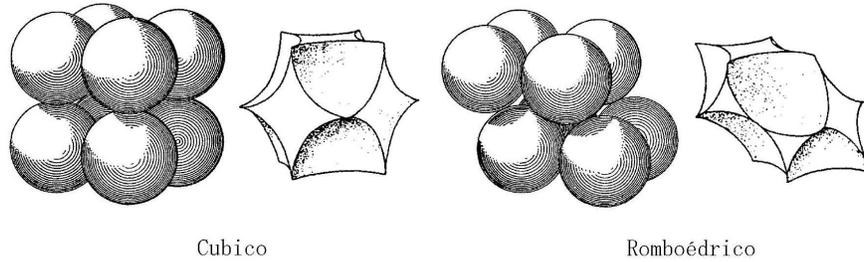


Figura 2.4: Tipos de empaquetamiento para materiales porosos construidos con esferas y forma del poro [17].

En un arreglo CS tenemos que:  $N_{esf} = 1$  y  $a = 2r$ , así obtenemos,

$$\phi_{CS} = 1 - FE_{CS} = 1 - \frac{1 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3}{(2r)^3} = 1 - \frac{\pi}{6}; \quad (2.5)$$

en el caso CCC:  $N_{esf} = 4$  y  $a = 2\sqrt{2}r$ , se obtiene,

$$\phi_{CCC} = 1 - FE_{CCC} = 1 - \frac{4 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3}{(2\sqrt{2}r)^3} = 1 - \frac{\pi}{3\sqrt{2}}. \quad (2.6)$$

De los resultados de las ecuaciones 2.5 y 2.6 obtenemos un valor exacto de la porosidad del 47.64% para el arreglo cubico y 25.95% de porosidad para el romboédrico. Estos valores teóricos de porosidad los tomaremos en cuenta para la fabricación de los núcleos de prueba.

## 2.2. Ley de Darcy

Como se mencionó anteriormente la ley de Darcy ha sido la base de las investigaciones sobre flujo a través de materiales porosos, esta fue deducida de manera experimental en 1856 por el ingeniero Henry Darcy mientras realizaba experimentos sobre filtros de agua [1, 2]. El experimento consistía en hacer pasar el líquido a través de un recipiente de sección transversal constante, el cual contenía arena. El líquido era inyectado por un extremo del recipiente a presión constante, mientras que en el lado opuesto se tenía una válvula que controlaba el caudal de salida, se tomaba lectura en dos puntos para determinar la caída en la presión, a este dispositivo se le conoce como permeámetro (figura 2.5).

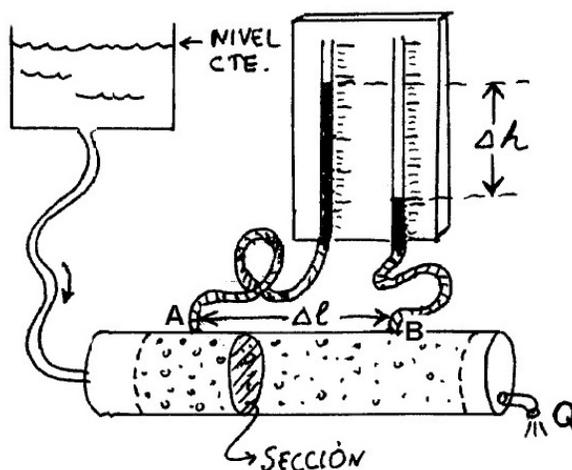


Figura 2.5: Permeámetro de carga constante, similar al utilizado por Darcy [2]

Darcy encontró que el caudal que atravesaba el recipiente era directamente proporcional a la sección transversal y la diferencia de presión, e inversamente proporcional a la longitud. A la ecuación que relaciona el área de sección transversal, la diferencia de presión y la longitud se le conoce como la ley de Darcy (ecuación 2.7),

$$Q = K A_s \frac{\Delta h}{\Delta l}, \quad (2.7)$$

donde  $Q$  es el flujo de líquido,  $A_s$  es el área de sección transversal,  $\Delta h$  es la diferencia de altura de la columna de agua entre los puntos A y B,  $\Delta l$  es la longitud de medición y  $K$  es una constante de proporcionalidad conocida como permeabilidad.

### 2.2.1. Permeabilidad

De manera más formal, podemos decir que la permeabilidad es: “*el volumen de un fluido de unidad viscosa, que pasa a través de una sección transversal unitaria del medio, por unidad de tiempo, bajo la acción de un gradiente de presión unitario*” [17]. En otras palabras, es una medida de la resistencia de un medio poroso a ser atravesado por un fluido. Guiándonos por la ecuación 2.7, podemos encontrar las unidades de la permeabilidad; sabemos que  $Q$  tiene unidades volumen sobre tiempo [ $L^3T^{-1}$ ], las unidades de  $A_s$  son [ $L^2$ ] y las unidades de  $\Delta h$  y  $\Delta l$  son [ $L$ ]; por lo tanto  $K$  tiene unidades de [ $LT^{-1}$ ] (ecuación 2.8). La cantidad  $K$  es la permeabilidad convencional del material, cuando se encuentra totalmente saturado,

$$K = \frac{Q \Delta l}{A_s \Delta h} \Rightarrow K [\equiv] \frac{\frac{L^3}{T} L}{L^2 L} [\equiv] \frac{L}{T}. \quad (2.8)$$

La permeabilidad esta directamente ligada a la geometría del medio (porosidad efectiva); sin embargo la  $K$  presente en la ecuación 2.7, depende tanto de la porosidad, como de las propiedades del fluido que se transporta, esto quiere decir, que al cambiar el fluido de trabajo hallaremos distintos valores de permeabilidad para el mismo material. Es común encontrar en investigaciones [18]–[21], una forma de la Ley de Darcy que contempla tanto la geometría del medio como las propiedades del fluido. Haciendo la consideración de que para fluidos newtonianos y un flujo laminar, la permeabilidad  $K$  tiene una relación inversamente proporcional a la viscosidad del fluido [19]. Se puede definir una permeabilidad intrínseca que es independiente del fluido que se utilice, así obtenemos:

$$k = K\mu. \quad (2.9)$$

Ahora, despejando  $K$  de la ecuación anterior se obtiene la forma más utilizada de la ley de Darcy (ecuación 2.10), esta involucra la viscosidad del fluido  $\mu$  y la permeabilidad intrínseca del medio  $k$ . Mediante esta ecuación es posible extender el estudio de flujo monofásico a uno de dos fases, como más adelante se explicará,

$$\bar{u} = \frac{Q}{A_s} = \frac{k \Delta P}{\mu L}. \quad (2.10)$$

### 2.2.2. Flujo en dos fases

Es posible utilizar la ley de Darcy, como herramienta de estudio, para el flujo en dos fases, bajo la suposición de que la ecuación es válida para cada fluido presente en el flujo [17]. De esta forma podemos expresar  $Q$  de la siguiente manera:

$$Q_l = \frac{kk_{rl}A\Delta P_l}{\mu_l L}, \quad (2.11)$$

$$Q_g = \frac{kk_{rg}A\Delta P_g}{\mu_g L}; \quad (2.12)$$

donde los subíndices  $l$  y  $g$  se refieren a las fases de líquido y gas respectivamente; el término  $kk_{rl}$  se conoce como permeabilidad efectiva del medio para la fase líquida; y  $kk_{rg}$  es la permeabilidad efectiva del medio para la fase gaseosa. Guiándonos por estas ecuaciones podemos notar que la ley de Darcy se cumple para cada fase presente en el sistema. Los términos  $k_{rl}$  y  $k_{rg}$  son las permeabilidades relativas del medio, de esta manera podemos encontrar los valores de permeabilidad para cada fase relacionándolas con la permeabilidad absoluta  $k$ , de acuerdo a las ecuaciones 2.13 y 2.14:

$$k_{rg} = \frac{k_g}{k}, \quad (2.13)$$

$$k_{rl} = \frac{k_l}{k}. \quad (2.14)$$

Los valores de permeabilidad de cada fase, dependen en gran medida, de la saturación del sistema, es decir de la fracción de flujo de cada fase. Esto ocurre por la interacción entre los fluidos, por ejemplo: cuando tenemos flujo en una sola fase, la única resistencia que tiene que vencer es la resistencia propia del medio; sin embargo, al tener dos fluidos, se presenta una obstrucción entre ellos, lo que provoca una resistencia a fluir y por lo tanto, se modifica la permeabilidad relativa de cada fase. Fenómenos similares se presentan en yacimientos petroleros donde se tiene interacción de hasta tres fluidos (agua-gas-aceite).

### 2.2.3. Rango de aplicación de la ley de Darcy

Aunque la ley de Darcy ha sido aceptada en un gran número de investigaciones, debemos señalar que existen ciertos valores límite donde es aplicable. La ley de Darcy es una relación empírica, que se basa en los experimentos de flujo de agua a través de arena empaquetada y a baja velocidad. De manera teórica se han encontrado modelos de la ley de Darcy que son validos para bajas velocidades [6]; lo que es una buena indicación de que la variación lineal del flujo con respecto a la diferencia de presión, sólo es válida, para cierto rango del número de Reynolds [22].

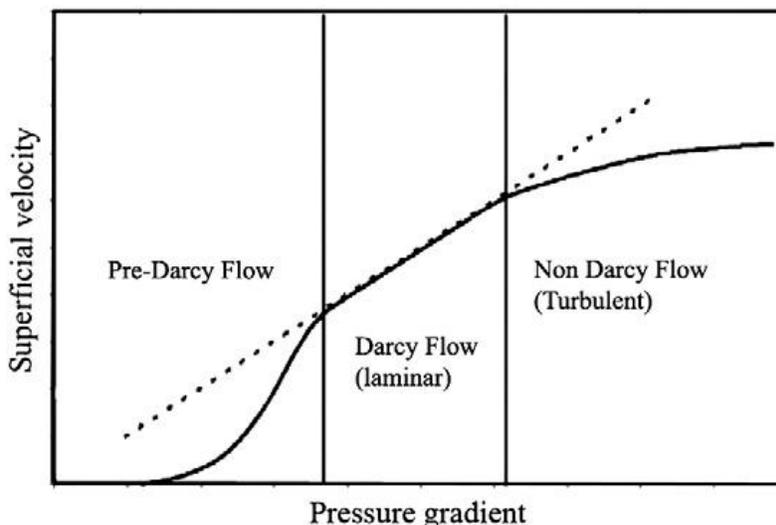


Figura 2.6: Clasificación del régimen de flujo para medios porosos [23]

Algunos investigadores, diseñaron experimentos que abarcan un amplio rango de velocidades, con esto han logrado distinguir tres distintas zonas donde, la relación entre el gradiente de presión y la velocidad tienen distintos comportamientos [23, 24]. La primera, conocida como zona de flujo pre-darciano, se caracteriza por tener un incremento mayor en la velocidad que en la presión, es decir, no existe un comportamiento lineal; la zona de flujo de Darcy, es aquellas en la que se tiene flujo laminar y es el rango donde la ecuación se toma como válida; por último, tenemos una zona turbulenta, que al igual que en la primera, la linealidad desaparece, debido a que el incremento en el gradiente de presión es mayor, comparado con el incremento en la velocidad. En la figura 2.6, se ilustran estas tres zonas.

La forma por la que podemos hallar el régimen en el cual se trabaja, es mediante el número de Reynolds. Para el flujo a través de materiales porosos, el número de Reynolds se define de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho \bar{u} d_p}{\mu}, \quad (2.15)$$

donde la longitud característica  $d_p$ , es el diámetro de las partículas que constituyen el medio poroso. Debido a esto, los valores del número de Reynolds oscilan en un amplio rango, dependiendo del tipo de medio con el que se trabaje. Hallar un valor crítico del Reynolds resulta complicado, sobre todo, cuando se tienen tamaños de partícula muy pequeños, de ordenes inferiores a  $10^{-3}$  metros; para análisis de muestras de arenas naturales, que se encuentran al rededor de este orden, se ha descubierto que la zona turbulenta se presenta a un número de Reynolds cercano a la unidad [24]; sin embargo, puede notarse, que al incrementar el diámetro de partículas, el número de Reynolds crítico debe aumentar de igual manera, esto ocurre debido a que al aumentar el diámetro de las partículas, el tamaño de poro también se expande llegando a formar canales más amplios donde el fluido circula de manera más libre como en un tubería.

Para el flujo en tuberías, el régimen laminar se mantiene para valores inferiores a 2000; esta cantidad puede hallarse, de forma relativamente sencilla, repitiendo el experimento de Reynolds. De manera similar, en flujo a través de medios porosos, la zona turbulenta podemos hallarla experimentalmente, observando los cambios en la presión con respecto al cantidad de flujo. Una gran fluctuación en la presión, es un buen indicador de que el carácter del flujo se ha modificado; por lo tanto, la ley de Darcy deja de ser válida.

## 2.3. Mojabilidad

La mojabilidad “*describe la preferencia que tiene un sólido de estar en contacto con un fluido en mayor medida que con otro*” [25], está ligada estrechamente a las condiciones en la superficie del sólido. El grado de mojabilidad es determinado por un balance entre las fuerzas adhesivas y cohesivas. Este fenómeno se puede estudiar mediante la interacción entre un líquido, un sólido y un fluido inmiscible, comúnmente gas (figura 2.7).

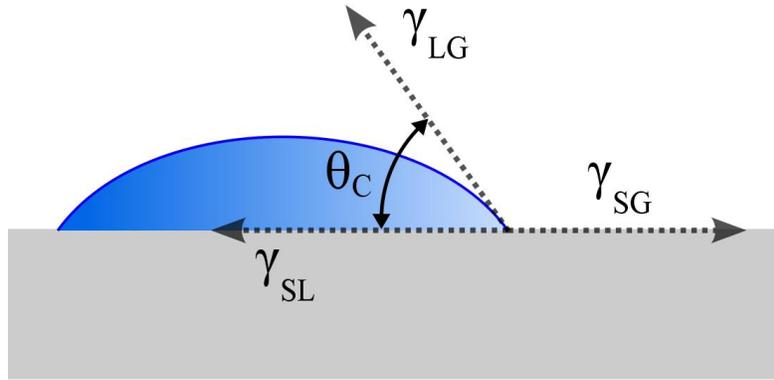


Figura 2.7: Ángulo resultante ( $\theta_C$ ) de la interacción entre las tensiones superficiales, sólido-líquido, sólido-gas y líquido-gas

La figura 2.7 muestra  $\gamma_{SL}$ ,  $\gamma_{LG}$  y  $\gamma_{SG}$ , que son las tensiones superficiales resultantes de la interacción entre las tres fases (sólido-líquido-gas). Las fuerzas adhesivas están contenidas en  $\gamma_{SG}$ , mientras que las fuerzas cohesivas involucradas son:  $\gamma_{SL}$  y la componente horizontal de  $\gamma_{LG}$ . Del análisis de equilibrio de estas fuerzas, obtenemos la ecuación de Young (Ecuación 2.16):

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos(\theta_C) = \gamma_{SG}, \quad (2.16)$$

donde  $\theta_C$ , es el ángulo de contacto entre el líquido y el sólido, este valor indica el grado de mojabilidad existente. De la ecuación 2.16, podemos despejar este término,

$$\theta_C = \arccos \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}}. \quad (2.17)$$

El rango de variación del ángulo de contacto se encuentra entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . La variación de este modifica la forma que adopta el líquido; mientras el ángulo  $\theta_C$  disminuye, el líquido se extiende más sobre la superficie; sin embargo, cuando el ángulo aumenta, el líquido reduce su área de contacto. Se considera que un fluido moja la superficie, cuando el ángulo de contacto es menor a  $90^\circ$ , esto implica que las fuerzas asociadas a la interacción entre la superficie y el líquido son mayores que las fuerzas cohesivas asociadas sólo al líquido; en el caso de que el ángulo sea mayor a  $90^\circ$ , las fuerzas cohesivas del líquido son mayores que las adhesivas, entre el sólido y el líquido, por lo que se considera que el fluido no moja la superficie (Figura 2.8).

Cada material presenta diferentes características en su superficie que afectan su grado de mojabilidad. Por ejemplo: la interacción del agua con una superficie de vidrio no es la misma que con la piel humana, la mojabilidad varía de acuerdo a la rugosidad del material o puede modificarse con un recubrimiento; retomando el ejemplo anterior, la piel y el vidrio poseen diferente rugosidad; el vidrio, si está limpio, permite que una gota de agua se extienda casi por completo; por otro lado, la piel tiene una delgada capa de grasa como recubrimiento, que impide que la gota se extienda, esto le da ciertas características hidrofóbicas. Mediante el ejemplo anterior, podemos darnos cuenta de que la mojabilidad puede cambiarse mediante el uso de recubrimientos o modificando las condiciones de la superficie. Los recubrimientos poliméricos, han demostrado ser útiles en alterar las condiciones superficiales y provocar cambios en el ángulo de contacto de algunos materiales.

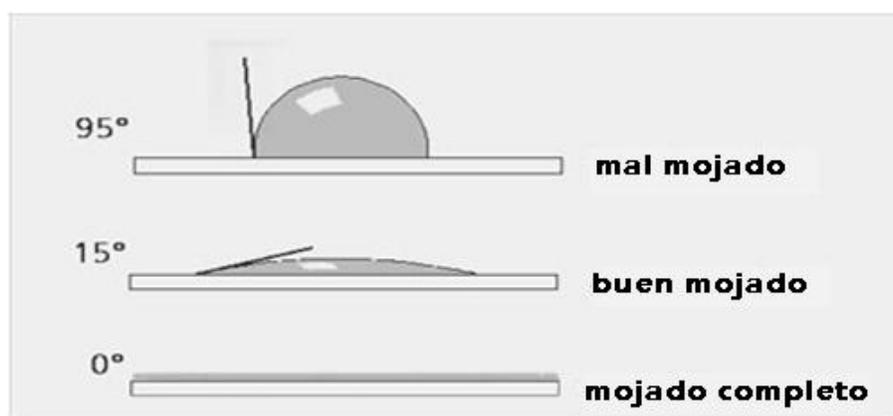


Figura 2.8: Grado de mojabilidad de acuerdo al ángulo de contacto

El fenómeno de mojabilidad ha sido ampliamente estudiado en el sector petrolero, enfocándose en el área de extracción [14, 26], por ser considerado como uno de los factores importantes en la localización y distribución de fluidos en los yacimientos [10, 11]. Los cambios en la mojabilidad influyen en el comportamiento del flujo, así como en sus propiedades eléctricas y la permeabilidad relativa. Estos cambios se observan mediante el análisis de núcleos de prueba.

El sistema que se analiza en los yacimientos se le conoce como: roca-aceite-salmuera (*Rock-oil-brine*). En este sistema, la superficie (roca) presenta diferentes tipos de mojabilidad dependiendo de la preferencia de la roca a estar en contacto con alguno de los dos fluidos. De la misma forma en la que se analiza el grado de mojabilidad en superficies planas, el ángulo de contacto dará el tipo de mojabilidad; al tener un ángulo de contacto cercano a  $180^\circ$ , se considera que la roca es mojada por el aceite (*oil-wet*); mientras para valores cercanos a  $0^\circ$ , la roca es mojada por agua (*water-wet*); en el caso intermedio (ángulos cercanos a  $90^\circ$ ), se le llama mojado neutral [11]. Un ejemplo más claro se muestra en la figura 2.9.

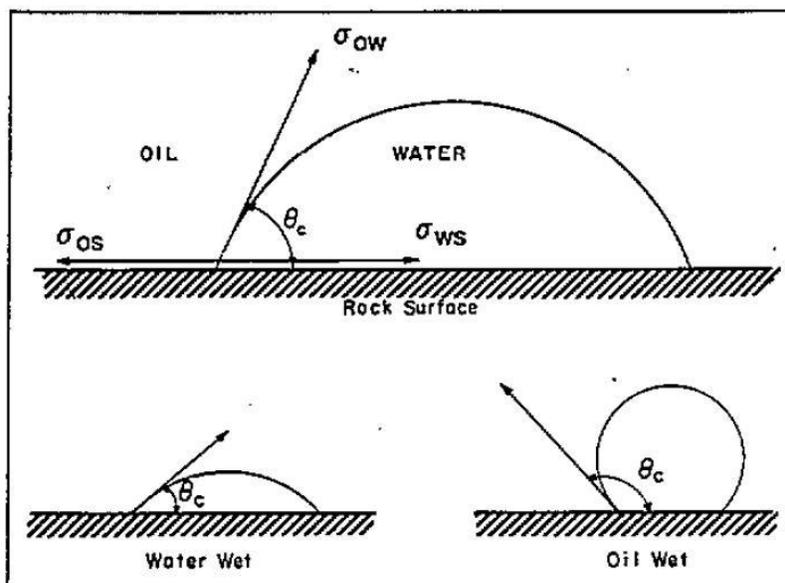


Figura 2.9: Mojabilidad de un sistema roca-aceite-salmuera [11]

Tomando en cuenta, que la mojabilidad tiene gran influencia en la permeabilidad del medio, para flujo bifásico y que a su vez la permeabilidad está ligada a la carga de bombeo, es importante conocer el efecto que tiene en un medio poroso. De esta manera se pueden buscar alternativas que faciliten el proceso de extracción.

# Capítulo 3

## Diseño experimental

Para analizar un flujo bifásico de manera experimental, es necesario construir un dispositivo que nos permita modificar la cantidad de flujo de ambos fluidos. En este experimento los fluidos de trabajo, por su facilidad y limpieza al momento de trabajar serán, agua y aire. Debe mencionarse, que al utilizar estos dos fluidos, se pretende estudiar la interacción entre las fases de gas-líquido, así como las ventajas o desventajas que se tienen en el trabajo de bombeo. Tampoco debe olvidarse, la variación en la mojabilidad del medio, por ser uno de los factores más importantes de nuestro análisis.

### 3.1. Fabricación de núcleos

En el ámbito petrolero, los núcleos son muestras cilíndricas de roca tomadas de los yacimientos antes o después de la perforación. Por medio del análisis de estos núcleos, es posible conocer las propiedades presentes en el yacimiento como: porosidad, permeabilidad, mojabilidad y otras más relacionadas con los aspectos químicos de la roca. Los métodos de análisis están bien controlados y en algunas ocasiones se requiere equipo especializado para las mediciones [27]. En este trabajo, los núcleos deben ser construidos bajo ciertas especificaciones, de lo contrario, no será posible adaptarlo al dispositivo de medición. El diseño del cilindro contenedor, debe ser el correcto para cumplir con su objetivo. Las principales dimensiones a considerar son: la longitud de prueba  $\Delta L$  y el área de sección transversal  $A_s$ . Datos más detallados del diseño del cilindro contenedor pueden obtenerse de los planos del apéndice A.

La figura 3.1, muestra un esquema de las piezas para la construcción del núcleo. Estos se construyen llenando completamente el cilindro contenedor con esferas, procurando una buena compactación; lo siguiente es colocar las mallas retenedoras, estas impiden que las partículas se muevan cuando circula el flujo; por último, se colocan los coples y tuercas que permiten adaptar el núcleo al dispositivo. Previo a la realización de experimentos, es necesario conocer las propiedades de porosidad y mojabilidad de cada núcleo.

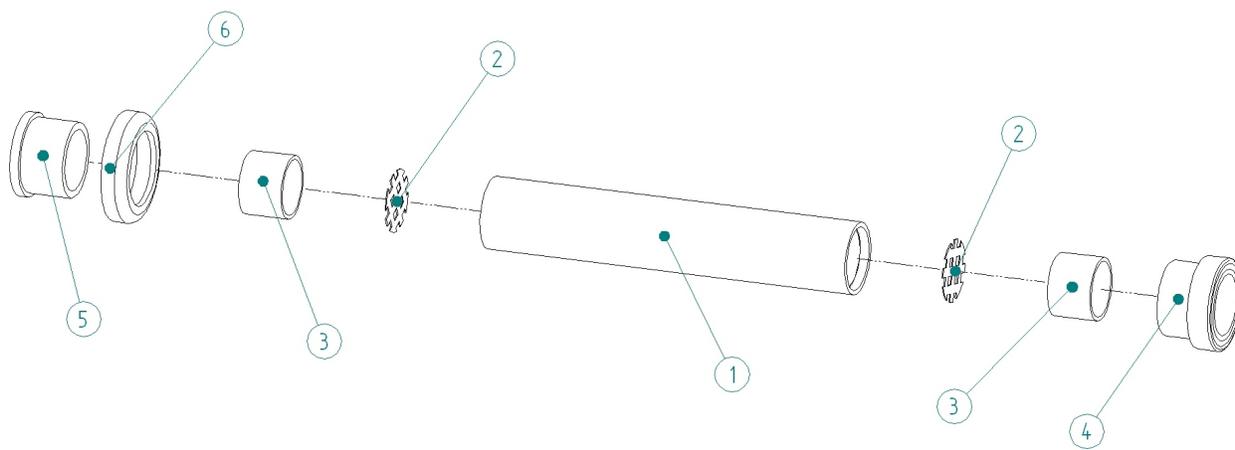


Figura 3.1: Esquema del diseño del núcleo: (1) Cilindro contenedor, (2)Malla retenedora, (3) Cople de tuerca, (4)Tuerca unión A, (5)Tuerca unión B, (6)Tuerca unión C

### 3.1.1. Medición de la porosidad del núcleo

Al ser un empaquetamiento aleatorio, no es posible calcular la porosidad de manera teórica como en la sección 2.1; sin embargo los valores de porosidad obtenidos de las ecuaciones 2.5 y 2.6, sirven de referencia, como indicadores del tipo de empaquetamiento que podemos alcanzar. Lo que se quiere explicar con esto es lo siguiente: si dentro de nuestros núcleos tenemos una porosidad cercana a 47.64 %, el acomodo de las partículas es muy parecido al arreglo cubico; más aun, si obtenemos un valor cercano al 25.95 % el tipo de acomodo se acerca más al tipo romboédrico. Estas cifras representan el límite superior e inferior de la porosidad, para empaquetamientos contruidos con esferas del mismo diámetro.

### Cálculo de la porosidad

La porosidad de los núcleos de prueba, se calcula por medio de un método cuantitativo, utilizando un fluido de densidad conocida (agua). Saturando el núcleo por completo con el líquido, éste ocupara los espacios huecos del material. Al extraer el líquido, se obtiene un valor muy confiable del volumen de poro, y al compararlo con el volumen en bruto del material, obtenido del volumen interno del cilindro contenedor, se obtiene un valor de porosidad para cada núcleo, dependiendo del tamaño de las partículas con las que fue construido. De esta manera, podemos comparar los datos obtenidos con los valores teóricos, para saber el grado de empaque que tiene cada núcleo. Los resultados se presentan en la tabla 3.1. Cabe mencionar que la porosidad obtenida, involucra tanto a la efectiva como la no efectiva; sin embargo, la primera supera por mucho a la segunda, tanto que podemos despreciarla de los cálculos.

Tabla 3.1: Porosidad de los distintos núcleos

<b>Diámetro de partícula[mm]</b>	<b>Vol. Núcleo[m<sup>3</sup>]</b>	<b>Vol. Partículas[m<sup>3</sup>]</b>	<b>Vol. Fluido[m<sup>3</sup>]</b>	<b>Porosidad del núcleo[<math>\phi</math>]</b>
10	$157.6 \times 10^{-6}$	$90 \times 10^{-6}$	$67.6 \times 10^{-6}$	42.89 %
6	$157.6 \times 10^{-6}$	$95 \times 10^{-6}$	$62.6 \times 10^{-6}$	39.72 %
3	$157.6 \times 10^{-6}$	$100 \times 10^{-6}$	$57.6 \times 10^{-6}$	36.55 %
1	$157.6 \times 10^{-6}$	$105 \times 10^{-6}$	$52.6 \times 10^{-6}$	33.38 %
0.25	$12.868 \times 10^{-6}$	$9 \times 10^{-6}$	$3.868 \times 10^{-6}$	30.06 %

De la tabla podemos observar que el tamaño de la partícula influye directamente en la estructura del empaquetamiento, al disminuir el tamaño de las esferas, éstas se acomodan de manera más eficiente, ocupando mayor espacio dentro del cilindro; con las esferas de mayor diámetro, la distribución deja espacios huecos de mayor tamaño, lo que causa un aumento en la porosidad. Esto se debe a una relación entre el diámetro de partícula  $d_p$  y el diámetro del tubo  $D$  (ecuación 3.1)

$$\delta = \frac{d_p}{D} \quad (3.1)$$

### 3.1.2. Mojabilidad y recubrimiento de las partículas

Como se explicó anteriormente en la sección 2.3, la mojabilidad modifica el comportamiento del flujo cuando en éste, se tienen presentes dos o más fluidos inmiscibles. En el experimento, se hace fluir agua y aire al mismo tiempo; aun así, observar una diferencia, sólo es posible, si el material tiene mayor afinidad hacia alguno de los fluidos. En este caso, al construir los núcleos con esferas de vidrio, el medio poroso posee una mayor afinidad hacia el agua, ya que de manera natural, el vidrio es un material hidrofílico.

El uso de recubrimiento, de tipo comercial, para vidrios, es una buena opción de la cual se obtienen buenos resultados. Estos podemos observarlo en la figura 3.2; en la imagen de la izquierda, tenemos la superficie sin ningún recubrimiento, el ángulo de contacto es aproximadamente  $40^\circ$ , gran parte de la gota se extiende sobre el vidrio; por otro lado, en la superficie del lado derecho se tiene un recubrimiento que, claramente, aumenta el ángulo de contacto hasta casi  $90^\circ$ .

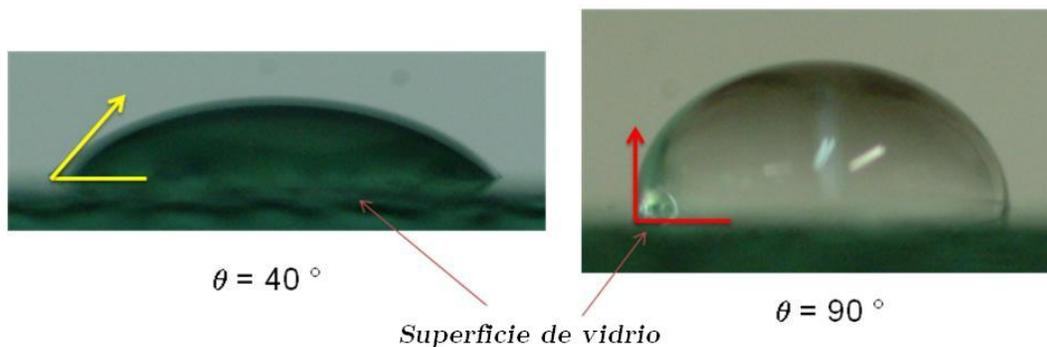


Figura 3.2: Ángulo de contacto ( $\theta$ ) de una superficie de vidrio sin recubrimiento(izquierda) y otra con recubrimiento (derecha). El recubrimiento utilizado es de uso comercial de la marca **rain-x** <sup>®</sup> y esta hecho de compuestos a base de silicona.

Estrictamente, un material se considera hidrofóbico si el ángulo de contacto es mayor de  $90^\circ$ , e hidrofílico si el ángulo es menor de  $30^\circ$ . Para fines prácticos, se consideraran los valores de  $90^\circ$  y  $40^\circ$  como hidrofóbico e hidrofílico respectivamente, tomando en cuenta que, en el experimento, lo importante es que exista un cambio significativo en la mojabilidad.

## 3.2. Dispositivo experimental

El estudio, de flujo a través de materiales porosos, requiere de un dispositivo que nos permita variar la cantidad de líquido que circula dentro del núcleo y medir los cambios en el gradiente de presión; además, debe de incluir la inyección de aire como un segundo fluido. Para esto, se construyó un permeámetro que considera la variación de los parámetros anteriores, así como los instrumentos necesarios para el análisis del caso bifásico.

El permeámetro consta de un dispositivo de bombeo, con una potencia de  $1/4[\text{Hp}]$ ; válvulas de control de flujo; así como de un sistema de tuberías, encargado de la re-circulación del fluido; además, se tienen instrumentos de medición para el caudal (rotámetros para aire y agua) y la caída de presión (manómetro digital); también incluye un sistema auxiliar de tuberías, encargado de la inyección de aire. Un esquema general se presenta en la figura 3.3.

El dispositivo debe estar ensamblado correctamente, evitando por completo las fugas tanto de agua como de gas; problemas de este tipo podrían ocasionar perturbaciones en los instrumentos de medición alterando los resultados finales; también se debe tomar en cuenta la calibración de los medidores de flujo, ya que de lo contrario se obtendrán valores erróneos en cada prueba.

Gracias al uso de válvulas de control, el permeámetro permite abarcar un amplio rango de velocidades de flujo. Pueden presentarse limitaciones cuando se tienen núcleos con tamaños de partícula muy pequeños, debido a la gran resistencia que estos oponen al paso del flujo. Cada núcleo se probó siguiendo el protocolo que se explica en la sección 3.3.

## 3.3. Protocolo experimental

Las pruebas se aplicarán a seis distintos núcleos. El objetivo es obtener la variación del tamaño de poro y la mojabilidad del medio; para esto se construyeron dos núcleos por cada tamaño de partícula (6 mm, 3 mm y 1 mm); el primer núcleo es construido con esferas

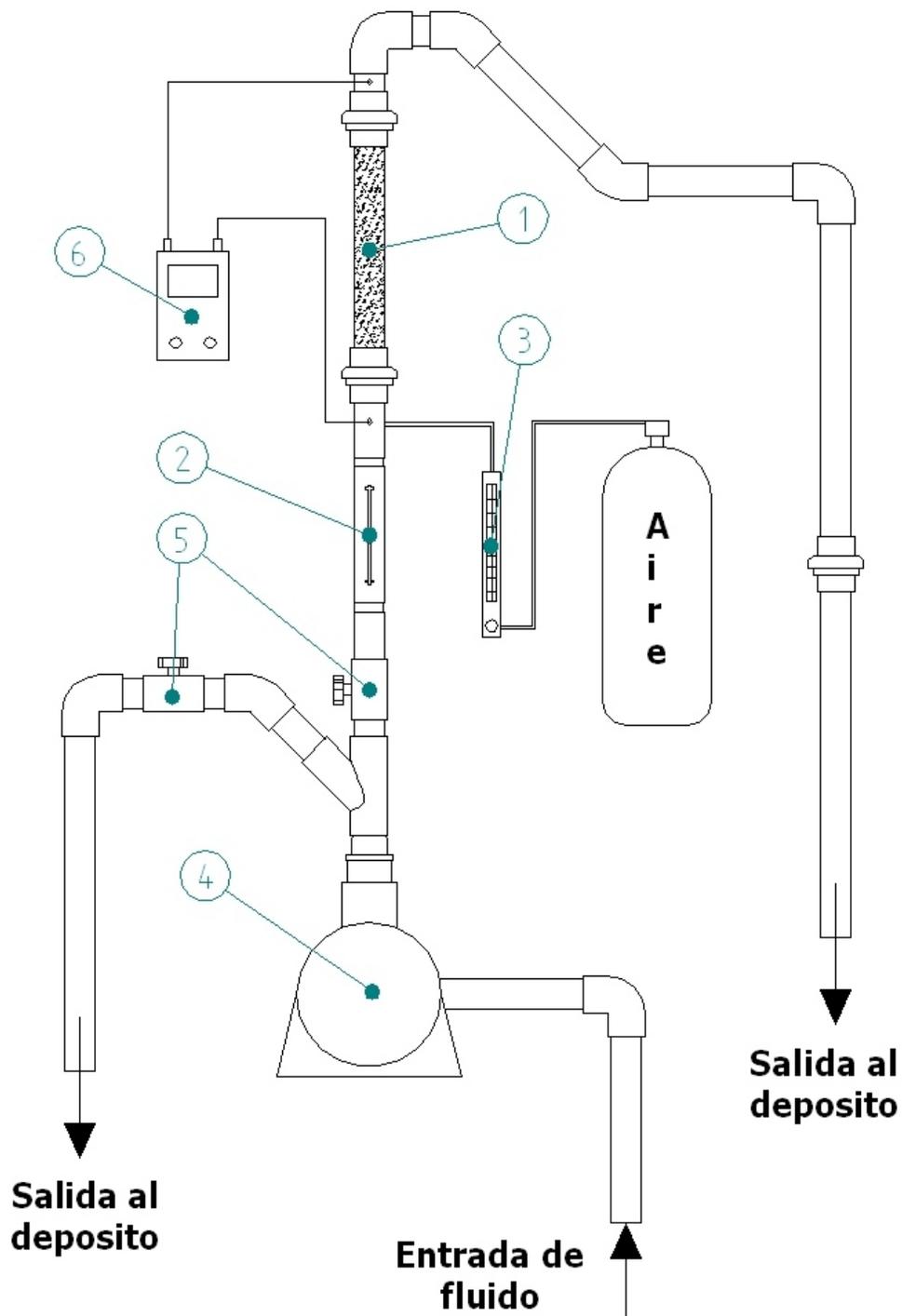


Figura 3.3: Esquema de permeámetro: (1) Núcleo de prueba, (2) Medidor de flujo de agua, (3) Medidor de flujo de aire, (4) Bomba centrífuga, (5), Válvulas de control, (6) Manómetro digital.

sin ningún recubrimiento, por lo que conservan sus características hidrofílicas; el segundo núcleo contiene esferas con tratamiento hidrofóbico, de esta manera se obtiene el cambio en la mojabilidad para un mismo tamaño de partícula. Adicionales a los 6 núcleos anteriores, se construyeron dos más con la mezcla de tres tamaños de partícula (6 mm, 1 mm y 0.25 mm), con esto se espera aproximar el medio a estructuras más realistas. Los núcleos serán probados bajo dos condiciones de flujo, la primera un flujo monofásico (agua) y en la segunda se inyectara el segundo fluido (aire). Cada experimento tiene un propósito específico; las pruebas en el caso monofásico tienen como objetivo comparar la permeabilidad de los núcleos contruidos con el mismo tamaño de partículas. Los experimentos con flujo bifásico mostraran la diferencia, si es que existe, en la mojabilidad de cada núcleo.

### 3.3.1. Flujo monofásico

Al construir los núcleos con una distribución aleatoria existen pequeñas diferencias, no importando que todas las partículas sean del mismo tamaño. Estas diferencias pueden llegar a ser significativas en los resultados, causando errores de comparación, sobre todo cuando se tiene partículas con diámetros pequeños. Para saber que tan grande es esta diferencia, todos los núcleos se ensayan primero con flujo en una sola fase.

A través del núcleo se hace fluir agua a una razón constante. Utilizando las válvulas de control, se incrementa la cantidad de flujo en intervalos regulares, de acuerdo a la precisión de los instrumentos de medición, y procurando abarcar un amplio rango de velocidades. En cada punto se toman lecturas de presión y flujo volumétrico. Con los datos obtenidos, se elaboran gráficas ( $Q$  vs  $\Delta P$ ), y mediante la ecuación de Darcy, vista en la sección 2.2.1, se obtienen los valores de permeabilidad de cada núcleo. Las gráficas mostraran el comportamiento de cada núcleo, de esta forma podemos saber si los núcleos hidrofílico e hidrofóbico, tienen un empaquetamiento similar. De ser así, la única característica distintiva es la mojabilidad, por lo que es necesario realizar experimentos con un flujo bifásico.

### 3.3.2. Flujo bifásico

Como se vio en la sección 2.3, los cambios en la mojabilidad solo pueden observarse en presencia de una segunda fase. En estos experimentos, la saturación del núcleo es el parámetro a variar.

$$S_g = \frac{Q_g}{Q_l + Q_g}. \quad (3.2)$$

Para la segunda fase de los experimentos, es necesario saturar el núcleo con la fase líquida, de esta forma obtendremos un valor de permeabilidad para un flujo compuesto por el 100 % de agua; una vez establecido el punto de control anterior, el aire es inyectado a una razón constante; los datos a registrar son: el flujo de aire ( $Q_g$ ), flujo de agua ( $Q_l$ ) y la caída en la presión ( $\Delta P$ ); posteriormente, se incrementa el flujo de aire en intervalos regulares, la saturación de aire se obtiene por medio de la ecuación 3.2, los datos se registran en cada punto.

Con los datos obtenidos, y empleando las ecuaciones para flujo multifásico vistas en la sección 2.2.2, se obtienen valores de permeabilidad relativa para cualquiera de las dos fases. Mediante la construcción de gráficas, podemos observar el comportamiento del núcleo conforme aumenta la saturación de aire. En este caso, se grafican la permeabilidad relativa del líquido contra la saturación de gas. Estos datos se presentan en el siguiente capítulo.

## 3.4. Visualización del fenómeno

Como parte complementaria a los experimentos de mojabilidad y para tener una mejor apreciación del fenómeno, se han llevado a cabo una serie de visualizaciones que tienen como objetivo observar la interacción entre el medio poroso y los dos fluidos (agua y aire).

El cambio en la mojabilidad del material puede medirse por los métodos vistos en la sección 2.3; aunque medir el ángulo de contacto nos da una buena aproximación del grado de mojabilidad del medio, no es posible observar éste fenómeno durante el flujo. Con la ayuda de secuencias de imágenes se observarán las diferencias entre ambos medios.

En el experimento de visualización, se tiene un medio poroso saturado con agua; a continuación, se inyectan burbujas de aire a través del medio y con la ayuda de una cámara de alta velocidad, se observa el desplazamiento de las burbujas así como su interacción con las partículas. Los experimentos son realizados para ambos medios, hidrofóbico e hidrofílico, para así poder compararlos. Las imágenes se muestran a continuación.

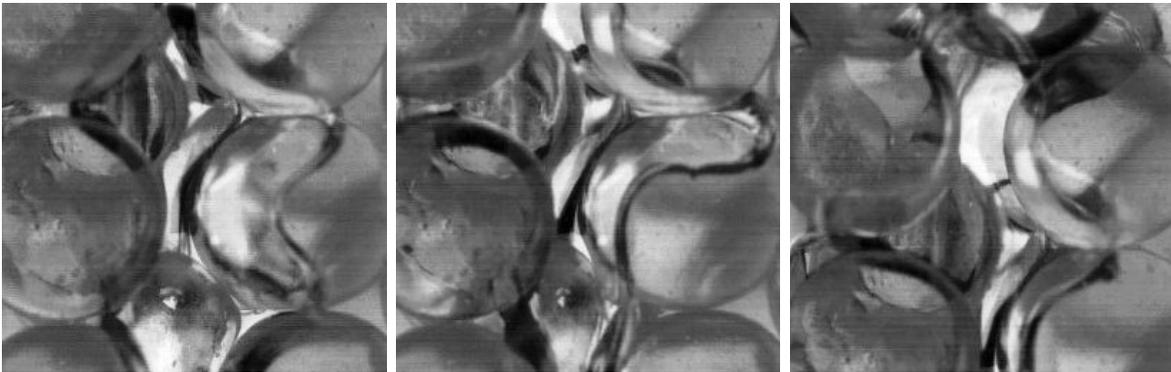


Figura 3.4: Medio hidrofílico construido con esferas de  $6mm$ .

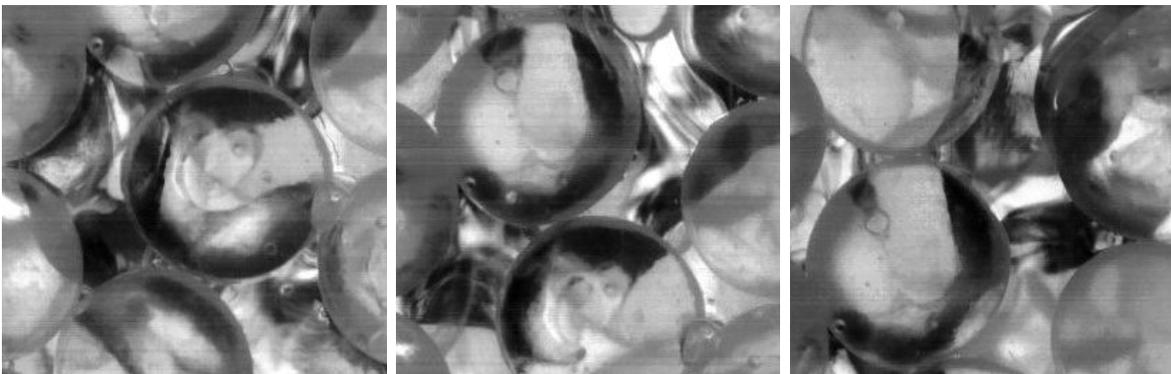


Figura 3.5: Medio hidrofóbico construido con esferas de  $6mm$ .

Las imágenes muestran que en un medio hidrofílico (figuras 3.4 y 3.6) las burbujas se deslizan por la superficie de las esferas, por lo que adquieren un contorno redondeado. Esto sucede, debido a que el medio tiene mayor afinidad con el líquido, por consiguiente, las partículas poseen una película delgada de agua a su alrededor, lo que impide el contacto directo entre la burbuja y la superficie sólida. Por otro lado, en un entorno hidrofóbico (figuras 3.5 y 3.7), las burbujas se adhieren a las partículas, en consecuencia, su desplazamiento se ve frenado con cada contacto que la burbuja hace con las esferas.

Las visualizaciones fueron realizadas para dos distintos tamaños de partícula y se observó el mismo tipo de comportamiento entre las burbujas y el medio; el único cambio apreciable fue una reducción en la velocidad de ascenso de la burbuja, esto se atribuye a la disminución en la porosidad del medio.

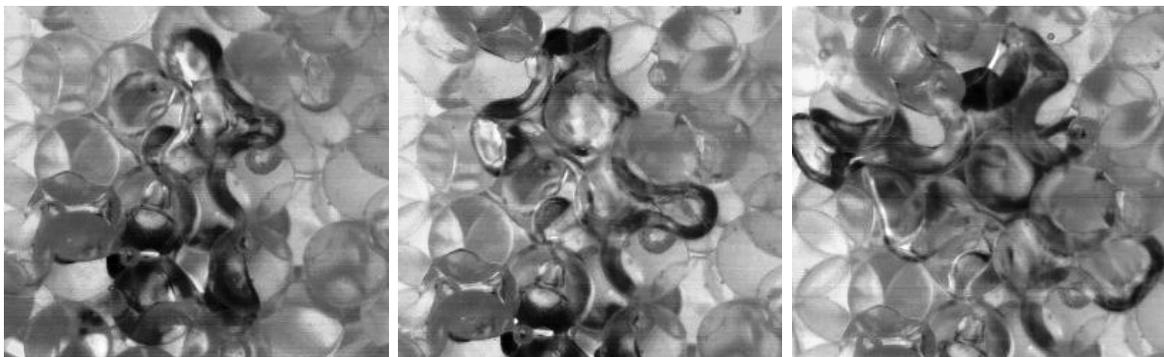


Figura 3.6: Medio hidrofílico construido con esferas de 3mm.

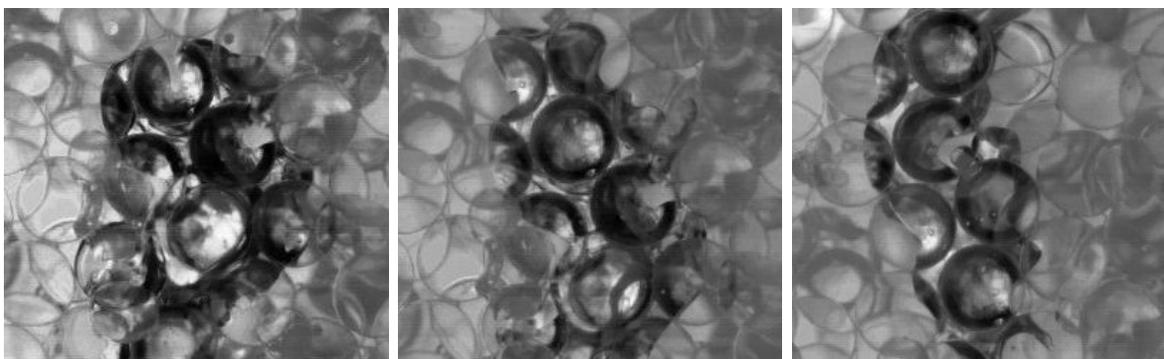


Figura 3.7: Medio hidrofóbico construido con esferas de 3mm.

De lo observado podemos concluir que la mojabilidad del medio favorece el flujo de alguna de las fases; en el caso hidrofílico el aire parece transportarse con mayor facilidad; sin embargo, sólo mediante experimentos se podrá comprobar.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

Como se explicó en la sección 3.3, los resultados se expresan a manera de gráficas, construidas con los datos obtenidos de los experimentos. Los resultados de flujo monofásico son los primeros en mostrarse, ya que son necesarios para comparar la permeabilidad de los núcleos; posteriormente los experimentos en flujo bifásico arrojarán los resultados relacionados al cambio en la mojabilidad.

### 4.1. Flujo monofásico

La permeabilidad del núcleo se obtiene despejando el término  $k$  de la ley de Darcy (ecuación 4.1), vista en la sección 2.2.1 (Para información sobre el calculo revisar apéndice C). En las gráficas de gasto como función de la caída de presión ( $Q_l$  vs  $\Delta P$ ) la permeabilidad se infiere de la pendiente de la curva. Cabe señalar que la permeabilidad sólo puede ser obtenida por la ley de Darcy, en la zona donde  $Q$  varía linealmente con respecto a  $\Delta P$ ,

$$k = \frac{\mu L}{A_s} \frac{Q}{\Delta P}. \quad (4.1)$$

La zona donde es aplicable la ley de Darcy comienza en distintos valores de  $Q$ , dependiendo del tamaño de poro de cada núcleo. En los núcleos construidos con partículas de 1 mm de diámetro, la zona de flujo de Darcy se presenta a valores bajos de  $Q$ ; por otro lado, en donde tenemos partículas de 6 mm, la aparición de esta zona ocurre más tarde debido a que el

tamaño de poro es más grande. A continuación se presentan los gráficos para los núcleos construidos con partículas de 6, 3, 1 mm y la mezcla de partículas.

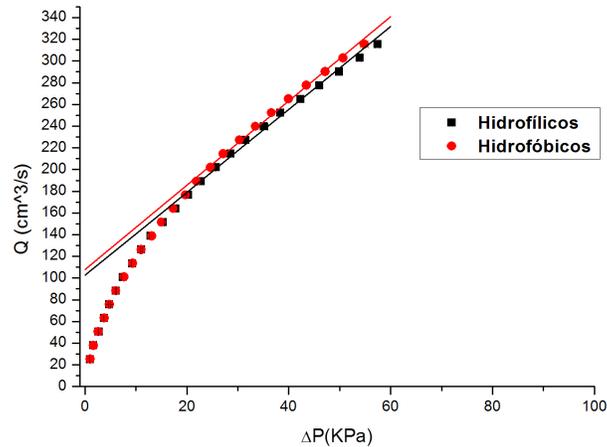


Figura 4.1: Núcleos con partículas de 6 mm, ensayados en flujo monofásico;  $Re$  varía entre 180–2300.

En la figura 4.1 podemos darnos cuenta de que en la zona lineal se tiene una pendiente muy alta. Esto es de esperarse, ya que al tener un tamaño de poro relativamente grande, el medio no opone una gran resistencia al paso del flujo. Además de esto, los dos núcleos presentan comportamientos similares, independientemente del tratamiento superficial, así que estos núcleos son aptos para compararlos en un flujo bifásico.

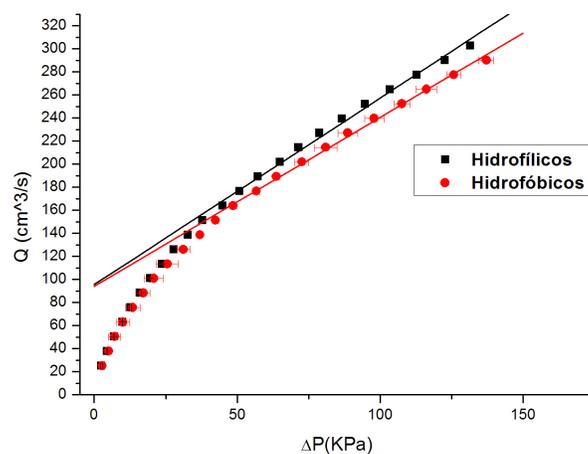


Figura 4.2: Núcleos con partículas de 3 mm, ensayados en flujo monofásico;  $Re$  varía entre 90–1100.

De la figura 4.2 se observa una permeabilidad más baja, si comparamos con la inclinación de las rectas en la zona lineal del primer núcleo (figura 4.1). También vemos que la zona lineal se presenta a valores más bajos de  $Q$ .

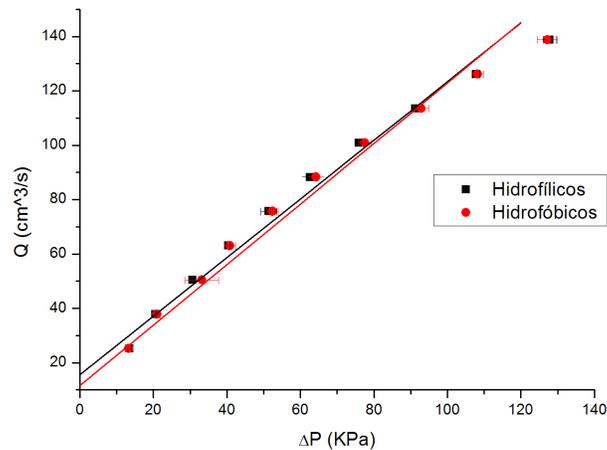


Figura 4.3: Núcleos con partículas de 1 mm, ensayados en flujo monofásico;  $Re$  varía entre 30–180.

La figura 4.3 muestra una permeabilidad menor a las dos anteriores, además de un comportamiento similar entre ambos núcleos por lo que es posible compararlos en flujo bifásico. Debe señalarse que la disminución de la permeabilidad esta ligada a la disminución en el tamaño de partícula, esto provoca una reducción del tamaño de poro por lo que el fluido tiene menos libertad para moverse y da como resultado una disminución en el flujo  $Q$ .

En los núcleos construidos con la mezcla de partículas (figura 4.4), la zona lineal se presenta casi inmediatamente, y al igual que en los casos anteriores, el medio hidrofílico e hidrofóbico tienen un comportamiento similar. También nos damos cuenta de que los valores de flujo  $Q$  caen muy por debajo, en comparación con los núcleos anteriores, esto debe traducirse en una reducción drástica en la permeabilidad. De acuerdo a la teoría de Darcy, la permeabilidad del medio esta relacionada con la pendiente de la zona lineal, esto quiere decir que, mientras mayor sea la permeabilidad del medio, la pendiente será más inclinada. Esto puede apreciarse en la figura 4.5 donde se comparan los 8 núcleos. Los datos se presentan de forma adimensional siguiendo el procedimiento del apéndice E.

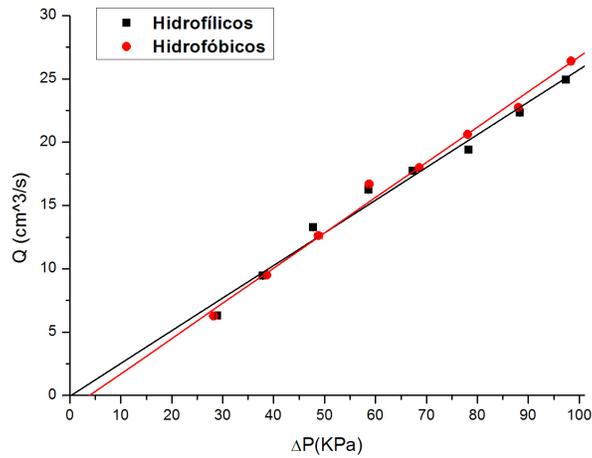


Figura 4.4: Núcleos construidos con la mezcla de partículas;  $Re$  varía entre 2–10.

Podemos observar que en los núcleos donde se tiene el menor tamaño de partícula se tienen las menores permeabilidades, esto, como se ha explicado antes, se debe a que las partículas más pequeñas pueden acomodarse de una manera eficiente y esto impide el libre paso del flujo.

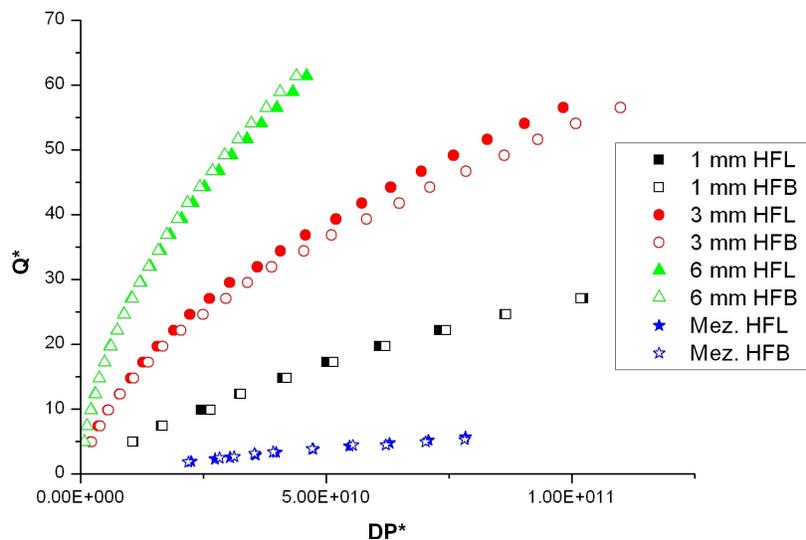


Figura 4.5: Comparación del comportamiento del flujo entre los tres tamaños de partículas.

## 4.2. Flujo bifásico

La permeabilidad en un flujo bifásico se calcula a partir de las ecuaciones vistas en la sección 2.2.2. Debe mencionarse que la permeabilidad que se maneja es la relativa, lo que implica que está relacionada a un sólo fluido. De acuerdo al protocolo experimental, el primer punto se obtiene con los datos de flujo volumétrico y presión a un 100 % de saturación de agua, es decir se calcula la permeabilidad para un caso monofásico,

$$k_{rl} = \frac{k_l}{k}. \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.2,  $k_{rl}$  es la permeabilidad relativa,  $k$  es la permeabilidad del medio para el fluido en el caso monofásico (sólo agua) y  $k_l$  es la permeabilidad calculada para el líquido conforme aumenta la saturación de aire.

Los resultados se expresan en gráficas que relacionan la permeabilidad relativa del agua con la saturación de aire. El rango de valores de  $k_r$  se encuentra entre 0 y 1, siendo 1 el punto donde se tiene sólo flujo de agua ,y 0 donde sólo hay flujo de aire.

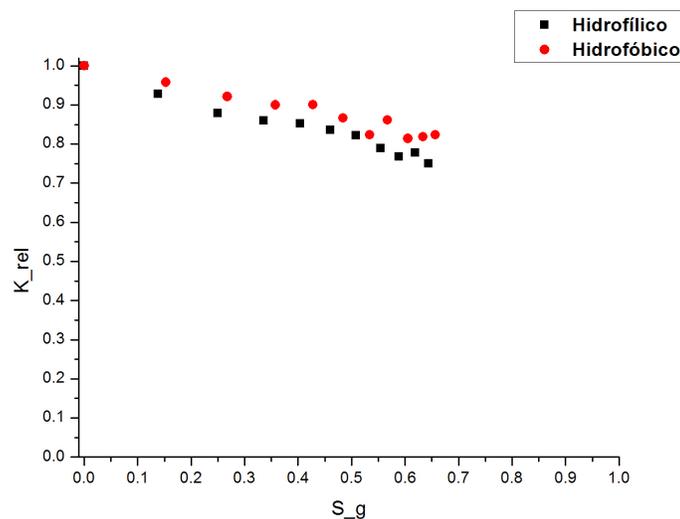


Figura 4.6: Núcleos construidos con partículas de 6 mm, ensayados en flujo bifásico.

La gráfica de la figura 4.6 muestra curvas similares en ambos núcleos; sin embargo, los valores de permeabilidad relativa son mayores en el caso hidrofóbico. Esto significa que a menor mojabilidad el líquido fluye con menos resistencia, aun así se deben analizar los demás casos.

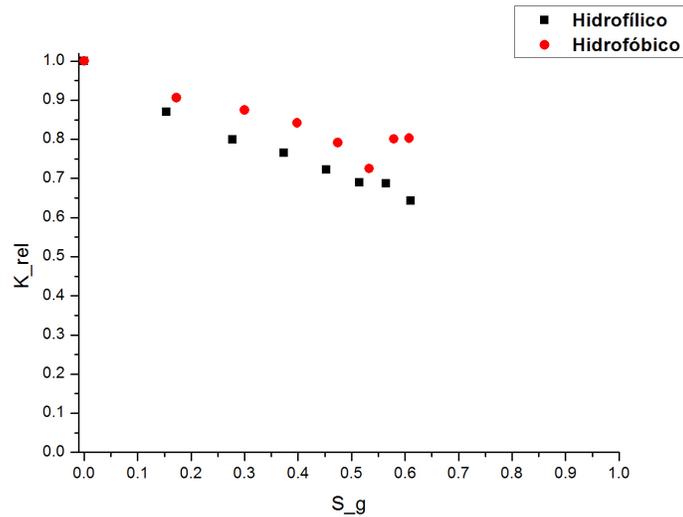


Figura 4.7: Núcleos construidos con partículas de 3 mm, ensayados en flujo bifásico.

De manera similar al caso anterior, en la figura 4.7 se muestra que el medio hidrofóbico facilita el flujo de líquido. Además el cambio en el tamaño de poro parece no modificar este comportamiento.

En los resultados de las partículas de 1 mm figura 4.8 la diferencia entre los núcleos resalta más que en las anteriores, además se observa cierta tendencia relacionada con la mojabilidad del medio. Los núcleos construidos con esferas hidrofóbicas aumentan la permeabilidad relativa de la fase líquida. Esto puede explicarse de dos formas distintas. La primera; cuando se tiene un medio hidrofílico el material tienen más afinidad con el agua, por esto, el sólido “prefiere” estar en contacto con el líquido y opone cierta resistencia a su flujo, consecuentemente, el aire fluye libremente a través del medio; por otro lado, en un entorno hidrofóbico las partículas retienen al aire, disminuyendo su flujo y por consiguiente, se incrementa la cantidad de agua que circula por el medio.

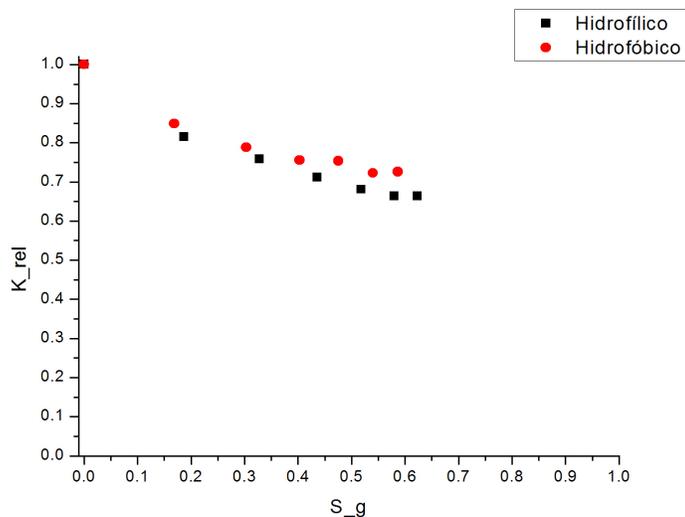


Figura 4.8: Núcleos construidos con partículas de 1 mm, ensayados en flujo bifásico.

Otro punto importante es la porosidad. Se observó que la permeabilidad relativa del agua alcanza valores más bajos conforme disminuye la porosidad. En los resultados de los núcleos fabricados con partículas de 6 mm, se observa que la permeabilidad relativa disminuye lentamente conforme aumenta la saturación de aire; en comparación, los núcleos con las partículas más pequeñas, reducen mucho su permeabilidad relativa a bajos niveles de saturación, como se observa en la figura 4.9.

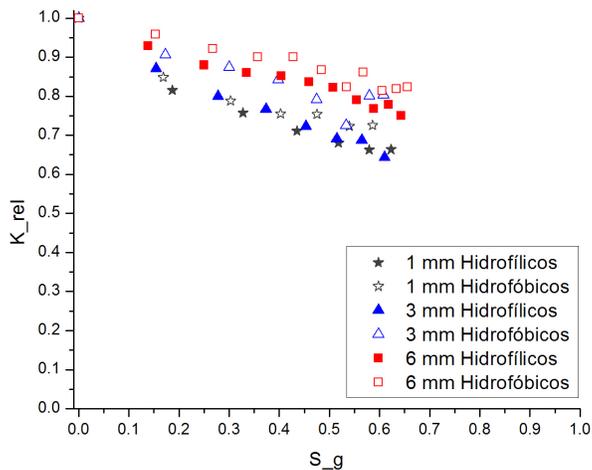


Figura 4.9: Comparación entre los nucleos construidos con un sólo tamaño de partículas en un flujo bifásico

El último caso resulta ser el más interesante, los núcleos construidos con la mezcla de partículas contienen las esferas de menor tamaño (0.25 mm), por lo que su porosidad es la menor de todos los casos, en la figura 4.10 podemos notar que los valores de permeabilidad relativa para el material hidrofóbico se encuentran por debajo del hidrofílico. Esto significa que en estos núcleos el líquido fluye de manera más libre en el caso hidrofílico. Este es un cambio importante considerando la tendencia que se tenía en los primeros tres casos, donde el material hidrofóbico favorece el flujo de agua.

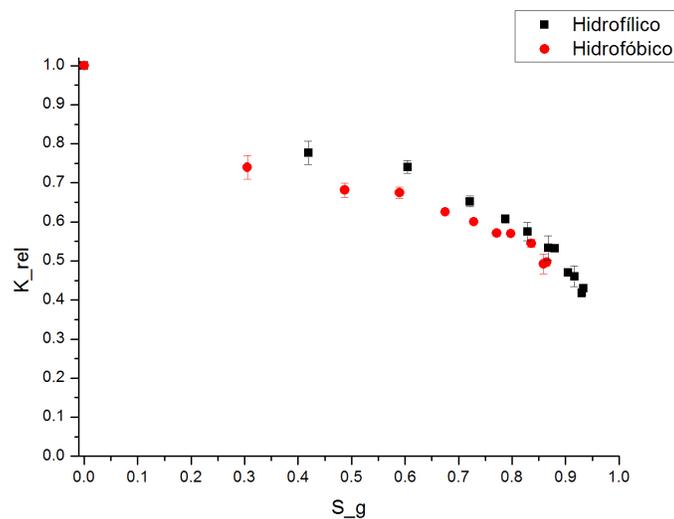


Figura 4.10: Núcleos construidos con una mezcla de partículas de 6 mm, 1 mm y 0.25 mm, ensayados en flujo bifásico.

La explicación de lo que sucede está relacionada al tamaño de poro. Como se explicó anteriormente, los núcleos hidrofóbicos tienen mayor afinidad hacia el aire, por lo que las burbujas se adhieren a la superficie de las partículas; sin embargo al tener menor espacio donde moverse, las burbujas de aire quedan atrapadas en los poros, esto reduce la cantidad de espacio por donde puede circular el flujo, por esta razón se obtienen una mayor permeabilidad relativa en el caso hidrofílico en comparación con el caso hidrofóbico.

# Capítulo 5

## Conclusiones

El flujo a través de un medio poroso ha sido estudiado a lo largo de este trabajo, considerando cambios en sus propiedades de porosidad y mojabilidad. Se buscó recrear condiciones equivalentes a las del sistema roca-aceite-salmuera, introduciendo aire como una segunda fase. La importancia de este estudio recae en conocer de que manera se ve afectada la carga de bombeo, cuando se tienen variaciones en las propiedades antes mencionadas.

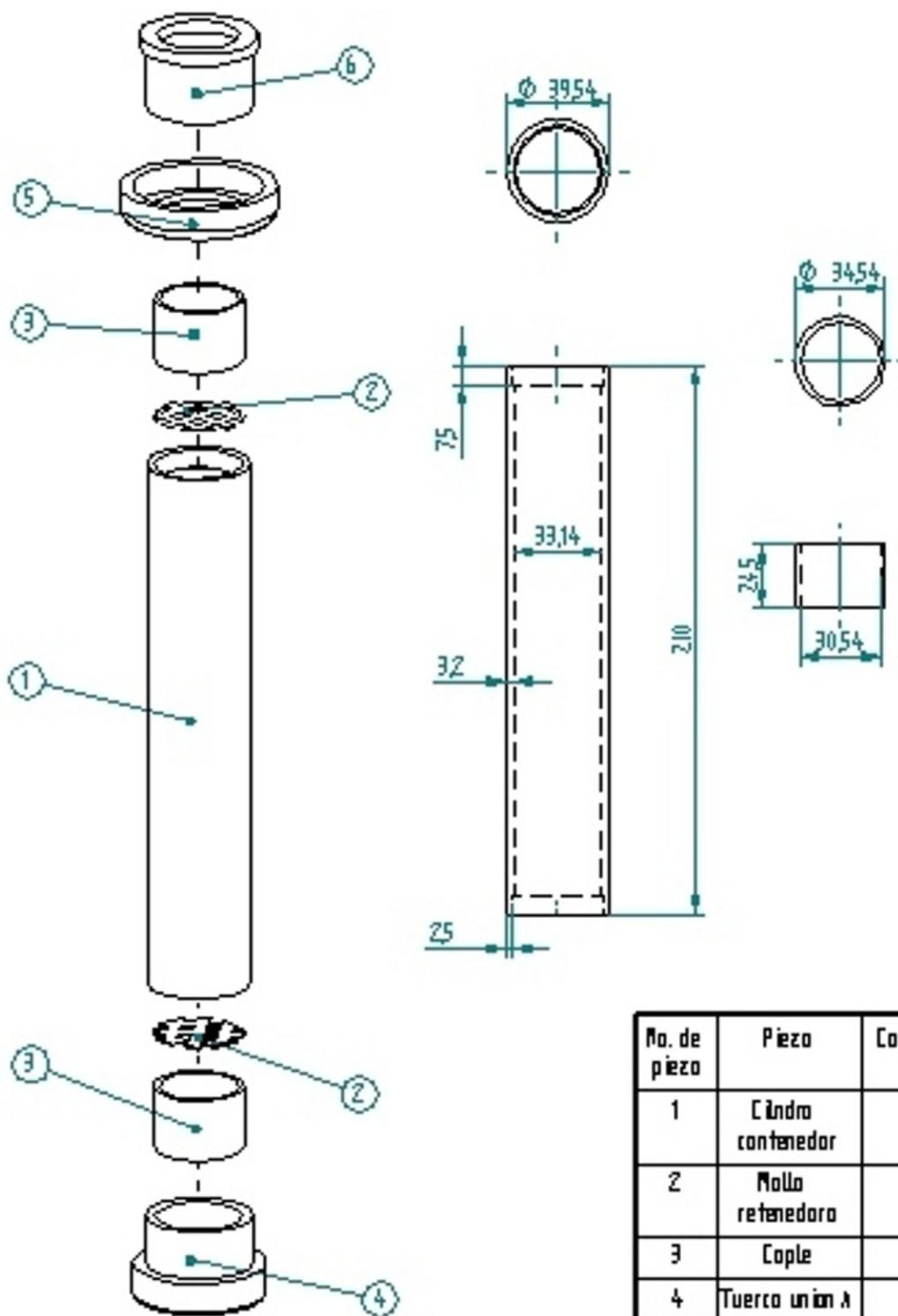
De los experimentos se ha extraído la información necesaria para comprender el fenómeno, y gracias a esto se han llegado a las siguientes conclusiones: primero, que la carga de bombeo se incrementa conforme el diámetro de poro disminuye, y por consiguiente la porosidad es el primer factor que modifica la carga de bombeo; y segundo, que la disminución de mojabilidad del medio favorece el desplazamiento del fluido no-mojante, en otras palabras, que un medio poroso opone una menor resistencia al paso de un fluido si el material con que está hecho tiene poca afinidad con el fluido que circula; sin embargo, se observa que ocurre el caso contrario cuando se tienen tamaños de poro pequeños. En este trabajo, el cambio se observó claramente cuando se realizaron experimentos con un tamaño de poro alrededor de 0.25 mm. Los resultados indican que existe un tamaño de poro crítico en donde esta disminución en la mojabilidad ya no favorece el flujo de alguna de las fases presentes, es decir que en este punto la mojabilidad no afecta en nada al flujo.

Mediante los resultados es posible pensar en alternativas que reduzcan el costo de bombeo. Por ejemplo, volviendo al sistema aceite/salmuera/roca, tratado en la sección 2.3, si se encontrara una forma de modificar la mojabilidad de la roca, para convertirla en un material con poca afinidad hacia el aceite, es decir oleofóbico, el aceite se extraerá con una mayor eficiencia a menor costo. Sin embargo, no debemos olvidar que existen restricciones relacionadas al tamaño de poro, que de no considerarse, causarían más problemas que beneficios. Otra forma de aplicar lo aprendido en este trabajo es utilizarlo para predecir que tan costoso será extraer el recurso, por ejemplo: conociendo las propiedades del yacimiento de porosidad y mojabilidad podemos saber que tan complicado será el proceso de extracción.

# Apéndice A

## Planos del cilindro contenedor

En los planos se muestra las partes que necesitan algún tipo de maquinado, las piezas que son utilizadas como conectores, en este caso la tuerca y los tubos, son de dimensiones comerciales así como todo el sistema de tubería utilizado en la construcción del equipo. El contenedor donde se colocan las esferas puede tener otras dimensiones si así se desea, siempre y cuando se tenga presente que la longitud y el área de sección transversal son datos requeridos en el modelo matemático de la ley de Darcy.



No. de pieza	Pieza	Cantidad
1	Cilindro contenedor	1
2	Malla retenedora	2
3	Cople	2
4	Tuerca union A	1
5	Tuerca union B	1
6	Tuerca union C	1

# Apéndice B

## Visualización

Para el experimento de visualización se construyó un contenedor de acrílico que, por ser transparente, permite observar lo que sucede dentro del medio poroso. Dentro del contenedor se introdujeron el mismo tipo de partículas utilizadas en los núcleos, posteriormente se saturó con agua el contenedor para posteriormente inyectar burbujas de aire; las burbujas se introdujeron por medio de un tubo capilar a una razón constante.

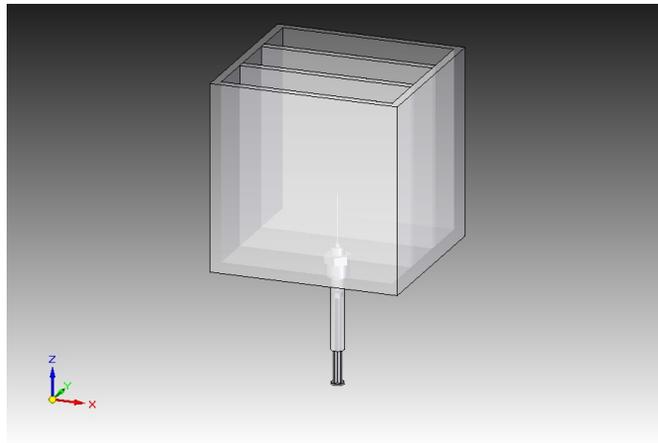


Figura B.1: Diseño del contenedor.

El equipo utilizado para la obtención de imágenes es una cámara rápida, la velocidad de grabación fue de  $5000 \frac{\text{cuadros}}{\text{seg}}$ , para todos los casos, y se necesitó de iluminación difusa en la parte posterior del contenedor, un esquema del arreglo experimental se muestra en la figura B.2.

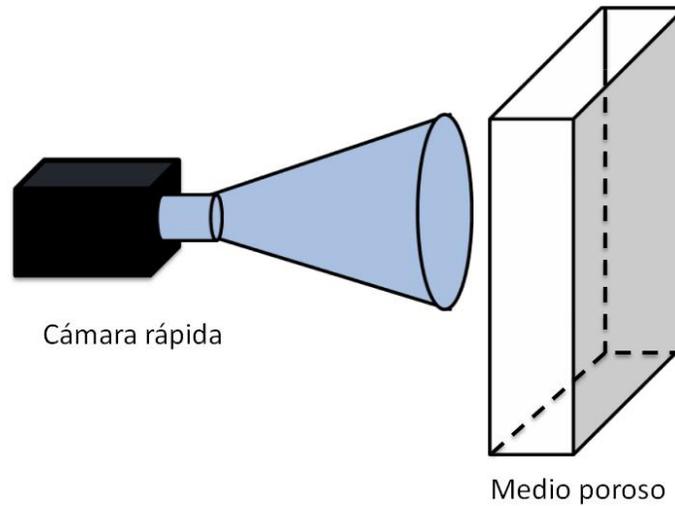


Figura B.2: Arreglo para la visualización.

Para obtener imágenes de la burbuja de buena calidad es necesario que el material poroso tengan un índice de refracción similar al del agua, por esta razón una primera visualización se llevo a cabo con un material que es prácticamente invisible en agua; sin embargo esto solo nos muestra la forma que adoptan las burbujas en un medio altamente hidrofílico, aun así, estas imágenes (figura B.3), son útiles para entender el fenómeno.

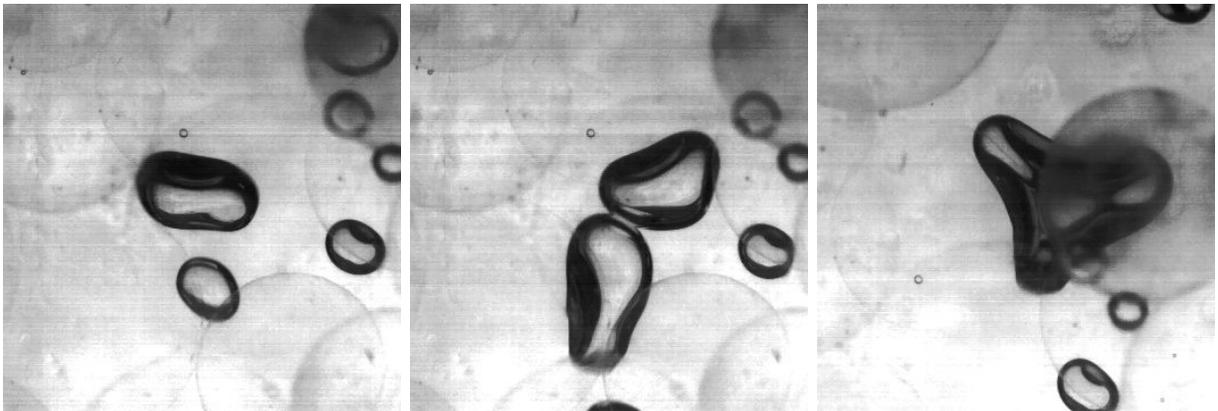


Figura B.3: Medio poroso altamente hidrofílico

# Apéndice C

## Cálculo de permeabilidad

### Flujo monofásico

La permeabilidad se obtienen despejando  $k$  de la ley de Darcy (ecuación C.1),

$$k = \frac{\mu L}{A_s} \frac{Q}{\Delta P}. \quad (\text{C.1})$$

En nuestro caso los valores de  $A_s$  y  $L$  se toman del núcleo, la viscosidad del fluido  $\mu$  es la del agua y  $Q$  y  $\Delta P$  son los datos que se obtuvieron de las mediciones.

Para el núcleo tenemos:

Diametro [ $cm$ ]	Area [ $cm^2$ ]	Longitud [ $cm$ ]
$d = 3.2$	$A_s = 8.0425$	$L = 19.5$

Las propiedades del agua son:

Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	viscosidad cinemática [ $Pa \cdot s$ ]
$\rho = 1000$	$\mu = 0.001002$

De las mediciones hechas para el núcleo de partículas hidrofílicas de 6  $mm$ :

Flujo volumétrico [ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Caida de presión [ $Pa$ ]
$Q = 75.71$	$\Delta P = 4.79 \times 10^3$

Entonces tenemos:

$$k = \frac{(0.001002[Pa \cdot s])(19.5[cm])}{(8.0425[cm^2])} \frac{75.71[\frac{cm^3}{s}]}{4.79 \times 10^3[Pa]}, \quad (C.2)$$

$$k = 38.3998 \times 10^{-6}[cm^2]. \quad (C.3)$$

Este cálculo se repite en cada punto de medición y para cada uno de los 6 núcleos.

### Flujo bifásico

Al igual que en el caso monofásico, la permeabilidad del primer punto se obtienen por medio de la ley de Darcy, este primer punto representa un flujo de 100 % agua, a partir de ahí se inyecta aire y se calcula nuevamente la permeabilidad.

Las propiedades del núcleo y el agua son las mismas que en el caso anterior. Para el primer punto tenemos los siguientes datos.

Flujo de agua [ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Flujo de aire [ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Caida de presión [Pa]
$Q_l = 51.02$	$Q_g = 0.00$	$\Delta P = 2.0049 \times 10^3$

Obtenemos la permeabilidad del medio en una sola fase. Esta permeabilidad es independiente del fluido como se explico en la sección 2.2.1,

$$K = \frac{(0.001002[Pa \cdot s])(19.5[cm])}{(8.0425[cm^2])} \frac{51.02[\frac{cm^3}{s}]}{2.0049 \times 10^3[Pa]}, \quad (C.4)$$

$$K = 61.8242 \times 10^{-6}[cm^2]. \quad (C.5)$$

Con los datos para un segundo punto, obtenemos una segunda permeabilidad,

Flujo de agua [ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Flujo de aire [ $\frac{cm^3}{s}$ ]	Caida de presión [Pa]
$Q_l = 47.17$	$Q_g = 29.60$	$\Delta P = 2.2983 \times 10^3$

$$k_l = \frac{(0.001002[Pa \cdot s])(19.5[cm])}{(8.0425[cm^2])} \frac{47.17[\frac{cm^3}{s}]}{2.2983 \times 10^3[Pa]}, \quad (C.6)$$

$$k_l = 49.8621 \times 10^{-6} [cm^2]. \quad (C.7)$$

La permeabilidad relativa se obtiene mediante la ecuación C.8, vista en la sección 2.2.1,

$$k_{rl} = \frac{k_l}{K}. \quad (C.8)$$

Así obtenemos:

$$k_{rl} = \frac{49.8621 \times 10^{-6} [cm^2]}{61.8242 \times 10^{-6} [cm^2]}, \quad (C.9)$$

$$k_{rl} = 0.8065. \quad (C.10)$$

Este representa el valor de la permeabilidad relativa del agua para una saturación de aire del 38.56 %. Siguiendo este método en cada punto donde se tomaron las mediciones se obtienen las gráficas para el flujo bifásico.

# Apéndice D

## Presentaciones en congresos.

Parte del trabajo fue utilizado para exponerlo en el 65avo congreso anual de la división de mecánica de fluidos de la APS (*American Physical Society*), que se llevo acabo el mes de noviembre del 2012. A continuación se transcribe el resumen enviado para el ingreso.

**Flow through porous media with fractal geometry: effect of wettability** D. HERNANDEZ, O. CHAVEZ, R. ZENIT, Universidad Nacional Autonoma de Mexico – We experimentally analyze the behavior of two-phase flow through porous media with a fractal geometry. We are interested in this particular case because it has been shown that many oil wells possess a fractal-type porosity structure. In the laboratory, fractal porous media were prepared considering arrays of glass spheres of different diameters and volumetric proportions. To vary the wettability, which is another factor of great importance for oil extraction, the glass spheres were treated with a hydrophobic coating. By measuring the pressure drop and the flow rate, the relative permeability was determined. Additionally, some flow visualization experiments were conducted. We found that the relative permeability increases as the wettability decreases: air bubbles tend to remain in contact with the glass surfaces, while the fluid tends to avoid them. We also discuss the changes of permeability for fractal and non-fractal porous media.

Abstract ID: BAPS.2012.DFD.F1.121

# Apéndice E

## Ley de Darcy en forma adimensional.

La Ley de Darcy puede expresarse de forma adimensional considerando todos que la función  $f$  depende de todos los términos presentes en la ecuación:

$$f(Q, \Delta P, k, A_s, \nu, \rho, L) = 0;$$

Los términos  $\nu$  y  $\rho$  se incluyen por la relación que tienen estos con la viscosidad dinámica  $\mu$ ,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{E.1}$$

la ecuación de Darcy queda:

$$Q = \frac{kA_s}{\nu\rho L} \Delta P \tag{E.2}$$

Relacionando los términos entre si, encontramos una función  $f'$  adimensional,

$$f'(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) = 0;$$

donde:

$$\Pi_1 = \frac{Q}{\nu L} = Q^*, \quad (\text{E.3})$$

$$\Pi_2 = \frac{\Delta P L^2}{\nu^2 \rho} = \Delta P^*, \quad (\text{E.4})$$

$$\Pi_3 = \frac{k}{L^2} = k^*, \quad (\text{E.5})$$

$$\Pi_4 = \frac{A_s}{L^2} = A_s^*. \quad (\text{E.6})$$

De esta forma la ecuación 4.1 se expresa como:

$$k^* = \frac{Q^*}{\Delta P^* A_s^*}; \quad (\text{E.7})$$

donde  $Q^*$ ,  $\Delta P^*$ ,  $k^*$  y  $A_s^*$  son el flujo volumétrico, el cambio en la presión, la permeabilidad y el área transversal adimensionales respectivamente.

# Bibliografía

- [1] Darcy, H., Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris,(1856).
- [2] F. Javier Sanchez San Roman, Flujo en medios porosos: Ley de Darcy, Dpto. Geología U. Salamanca, Dic-2009.
- [3] R. D. Wyckoff and H. G. Botset, The Flow of Gas-Liquid Mixtures Through Unconsolidated Sands, Journal of Applied Physics, 7, 325 (1936).
- [4] A. B. D. Cassie and S. Baxter, Wettability of Porous Surfaces, Trans. Faraday Soc., 40, 546-551,(1944).
- [5] M.A. Biot, Mechanics of Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media, Journal of Applied Physics, Vol. 33, No. 4, pp. 1482-1498, April, (1962)
- [6] Stephen Whitaker, Fluid Motion in Porous Media, Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 61, No. 12, pp. 14-28, December (1969).
- [7] William G. Gray and Kevin O'Neill, On the General Equations for Flow in Porous Media and Their Reduction to Darcy's Law, Water Resources Reserch, Vol. 12, No. 2, April (1976).
- [8] Stephen Whitaker, Flow in Porous Media I: A Theoretical Derivation of Darcy's Law, Transport in Porous Media 1, 3-25, (1986).
- [9] Heather E. Pacella, Heidi J. Eash, Brian J. Frankowski, William J. Federspiel, Darcy permeability of hollow fiber bundles used in blood oxygenation devices, Journal of Membrane Science 382 (2011) 238-242.

- [10] William G. Anderson, Wettability Literature Survey–Part 2: Wettability Measurement, *Journal of Petroleum Technology*, November, (1986).
- [11] William G. Anderson, Wettability Literature Survey–Part 1: Rock/Oil/Brine Interactions and the Effects of Core Handling on Wettability, *Journal of Petroleum Technology*, October (1986).
- [12] P. Macini, E. Mesini, R. Viola, Laboratory measurements of non-Darcy flow coefficients in natural and artificial unconsolidated porous media, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 77, (2011) 365–374.
- [13] Nate Stevens, John Ralston, Rossen Sedev, The uniform capillary model for packed beds and particle wettability, *Journal of Colloid and Interface Science* 337 (2009) 162–169.
- [14] Xiucui Zhao, Martin J. Blunt, Jun Yao, Pore-scale modeling: Effects of wettability on waterflood oil recovery, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 71 (2010) 169–178.
- [15] Vincent Dusastre, Pore characterization, *Nature* Vol. 408 Pg. 417, 23 Nov. 2000.
- [16] M. Honarpour, L.Koederitz, A.H. Harvey, Relative permeability of petroleum reservoirs, Florida.
- [17] M. Muskat, *The Flow of Homogeneous Fluids Through Porous Media*, McGraw-Hill, New York, 1937.
- [18] S. Abaci, J.S. Edwards and B.N. Whittaker, Relative Permeability Measurements for Two Phase Flow in Unconsolidated Sands, *Mine Water and The Environment*, Vol. 11, No. 2, June 1992, pp 11–26.
- [19] The University of Edinburgh Division of Engineering, *Porous materials: Permeability, Materials Science and Engineering*.
- [20] Lokendra Pal, Margaret K. Joyce and Paul D. Fleming, A simple method for calculation of the permeability coefficient of porous media, *TAPPI Journal*, Vol. 5, No. 9, September (2006)

- [21] Franck J. Vernerey, The Effective Permeability of Cracks and Interfaces in Porous Media, *Transport in Porous Media* 93, 815–829, (2012).
- [22] Zhengwen Zeng and Reid Grigg, A Criterion for Non-Darcy Flow in Porous Media, *Transport in Porous Media* (2006) 63: 57–69
- [23] Basak P., Non-Darcy flow and its implications to seepage problems, Proc. Pap. 13442, *J. Irrig. Drain. Div., A.S.C.E.*, 103 (IR4): 459–473, (1977).
- [24] J.P. Soni, Nurul I.P. Basak, An Experimental Evaluation of Non-Darcian Flow in Porous Media, *Journal of Hydrology*, 38 (1978) 231–241.
- [25] Abdallah W., Buckley J.S., Fundamentals of Wettability, *Oilfield Review*, 44-77, (2007).
- [26] Matthew D. Jackson, Per H. Valvatne, Martin J. Blunt, Prediction of wettability variation and its impact on flow using pore- to reservoir-scale simulations, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 39 231–246 (2003).
- [27] *Core Analysis, 2nd Edition, Recommended Operating Practices RP40*. Washington, DC, USA: American Petroleum Institute, 1998.
- [28] Scott A. Bradford, Linda M. Abriola, Feike J. Leij, Wettability effects on two-and three-fluid, *Journal of Contaminant Hydrology* 28 171–191 (1997).