



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MAR 12 2005

“Estudio experimental de la imbibición espontánea en tubos capilares circulares”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**F I S I C O**

P R E S E N T A :

**CARLOS ÁLVAREZ MACÍAS**



DIRECTOR DE TESIS:

DR. ROSALIO FERNANDO RODRÍGUEZ ZEPEDA



FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

2005



FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR

0349795



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MEXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo receptorial.

NOMBRE: Macías Carlos Álvarez  
 FECHA: 14 de Noviembre del 2005  
 FIRMA: [Firma]

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Estudio experimental de la imbibición espontánea en tubos capilares circulares"

realizado por Alvarez Macías Carlos

con número de cuenta 09104829-3 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director Propietario Dr. Rosalio Fernando Rodríguez Zepeda

[Firma]

Propietario Dra. Catalina Elizabeth Stern Forgach

Catalina Stern

Propietario Dr. Gerardo Ruiz Chavarría

[Firma]

Suplente M. en C. Edgar Vázquez Luis

Suplente Dr. José Alvaro Chávez Carvayar

[Firma]

Consejo Departamental de Física

Alicia Zarzosa Pérez

M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ

FACULTAD DE CIENCIAS  
 DEPARTAMENTO DE FÍSICA

### *Agradecimientos:*

Agradezco a Dios por rodearme de personas que me apoyan y han logrado cambios positivos en mi vida, por darme la oportunidad de terminar una meta más y permitirme ser lo que soy.

Agradezco eternamente a mis padres, Ma. Elena Macías Téllez y Carlos Álvarez Reyes, por su infinito amor, por creer en mí, y por darme la vida y las armas para luchar contra lo adverso. Así mismo agradezco a mis suegros, Graciela Ramos y Emilio Muñoz, por su apoyo incondicional y cariño hacia mi persona.

A mi esposa y compañera de toda la vida, Raquel Muñoz Ramos, por su paciencia, amor y comprensión, le agradezco infinitamente.

Ofrezco un agradecimiento especial al Dr. Gerardo Ruiz Chavarría por su valiosa amistad y por todo el apoyo que me ha brindado desde que lo conocí.

A mis compañeros y grandes amigos:

Omar Riverol, Luís M. Roa, Víctor Matías, Álvaro Fco. Vázquez, José Guadarrama y Héctor García, les agradezco sus constantes motivaciones, consejos y el apoyo moral que me brindaron durante todo este tiempo.

Agradezco al director de tesis, Dr. Rosalío F. Rodríguez Zepeda por su invaluable apoyo para este trabajo.

Agradezco al laboratorio de termodinámica del departamento de Física de la Universidad Autónoma Metropolitana campus Iztapalapa por sus instalaciones, equipo y todas las facilidades otorgadas para la realización del desarrollo experimental de la presente investigación.

Agradezco al Ing. Raúl Luviano por todos sus consejos, apoyo y amistad que me brindó durante la realización de la parte experimental del presente trabajo.

Al Dr. Alberto Soria López por su tiempo prestado para la aportación de ideas, de la presente tesis, le doy mis más sinceros agradecimientos.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y toda la gente que la compone, por darme la oportunidad de poder tener el orgullo de pertenecer a tan valiosa institución, mil gracias.

Un agradecimiento al Instituto Mexicano del Petróleo y en especial al departamento de yacimiento naturalmente fracturados, por el apoyo económico brindado a través de la beca de tesis de licenciatura otorgada durante el periodo correspondiente de la realización de esta investigación.

*Dedicatoria:*

*Dedico este trabajo a la memoria del Dr. José Agustín Hayashi Martínez, quien fue el director inicial de la presente tesis y principal interesado de los resultados de la misma, por ser un ejemplo de profesionalismo y dedicación constante.*

## Contenido

	página
Índice.....	I
Lista de tablas.....	III
Lista de figuras.....	IV
Resumen.....	1
Introducción.....	2
<b>Capítulo 1. Conceptos básicos.....</b>	<b>4</b>
1.1 Fenómenos de superficie.....	4
1.1.1 Mojabilidad y ángulo de contacto.....	4
1.1.2 Tensión interfacial.....	7
1.1.3 Tensión superficial.....	7
1.2 Fenómenos capilares y su importancia.....	8
1.2.1 Presión capilar.....	8
1.2.2 Números adimensionales de la imbibición espontánea.....	10
1.2.2.1 Número capilar.....	10
1.2.2.2 Razón de viscosidades.....	10
1.3 Imbibición espontánea y su importancia.....	10
1.4 Trabajos relacionados con el tema.....	11
<b>Capítulo 2. Montaje y Método experimental.....</b>	<b>17</b>
2.1 Descripción del material utilizado.....	17
2.2 Conjunto experimental.....	18
2.2.1 Baño térmico.....	18
2.2.2 Aire acondicionado.....	19
2.2.3 Registro de temperatura.....	19
2.2.4 Video-filmación.....	19
2.3 Mecanismo de alimentación.....	20
2.4 Proceso de limpieza.....	21
2.5 Desarrollo del experimento.....	22
2.5.1 Colocación del tubo.....	22
2.5.2 Nivelación.....	23
2.5.3 Enfoque.....	23
2.5.4 Encendido del sistema térmico.....	23
2.5.5 Preparación del sistema de video-filmación.....	23
2.5.6 Saturación del tubo capilar con el fluido 1.....	23
2.5.7 Inicio del experimento.....	24
2.6 Método de medición.....	24
<b>Capítulo 3. Análisis de resultados.....</b>	<b>25</b>
3.1 Historial de lavado de tubos.....	25
3.2 Historial de los experimentos.....	28

3.3	Resultados experimentales.....	33
3.4	Análisis comparativo entre experimentos con el mismo diámetro.....	40
3.5	Análisis de comparación entre experimentos la misma longitud .....	44
3.6	Análisis de experimentos con sentido de saturación contrario a la imbibición.....	50
<b>Capítulo 4. Discusión y Conclusiones.....</b>		<b>54</b>
4.1	Diseño Experimental.....	54
4.2	Lavado de tubos.....	54
4.3	Comparaciones con la ecuación de Washburn.....	55
4.4	Cambio en el sentido de saturación de aceite.....	56
4.5	Futuros trabajos.....	57
<b>Bibliografía.....</b>		<b>58</b>

**Índice de tablas**

Página

**Capítulo 2**

<b>Tabla 2.1</b>	Tubos utilizados para el experimento.....	17
<b>Tabla 2.2</b>	Propiedades físicas de los líquidos.....	18
<b>Tabla 2.3</b>	Condiciones iniciales de los experimentos.....	22

**Capítulo 3**

<b>Tabla 3.1.1</b>	Proceso de lavado para las dos primeras corridas .....	26
<b>Tabla 3.1.2</b>	Proceso de lavado para las corridas 3 y 4.....	26
<b>Tabla 3.1.3</b>	Proceso de lavado para las corridas 5 y 6.....	27
<b>Tabla 3.1.4</b>	Proceso de lavado para las corridas 7 y 8, cambiando el método de lavado.....	27
<b>Tabla 3.2.1</b>	Experimentos de la corrida 1.....	28
<b>Tabla 3.2.2</b>	Experimentos de la corrida 2.....	29
<b>Tabla 3.2.3</b>	Experimentos de la corrida 3.....	29
<b>Tabla 3.2.4</b>	Experimentos de la corrida 4.....	30
<b>Tabla 3.2.5</b>	Experimentos de la corrida 5.....	31
<b>Tabla 3.2.6</b>	Experimentos de la corrida 6.....	31
<b>Tabla 3.2.7</b>	Experimentos de la corrida 7.....	32
<b>Tabla 3.2.8</b>	Experimentos de la corrida 8.....	33
<b>Tabla 3.3.1</b>	Promedio de velocidades para la corrida 1.....	34
<b>Tabla 3.3.2</b>	Promedio de velocidades para la corrida 2.....	35
<b>Tabla 3.3.3</b>	Promedio de velocidades para la corrida 4.....	36
<b>Tabla 3.3.4</b>	Promedio de velocidades para la corrida 6.....	37
<b>Tabla 3.3.5</b>	Promedio de velocidades para la corrida 7.....	39
<b>Tabla 3.3.6</b>	Promedio de velocidades para la corrida 8.....	40
<b>Tabla 3.4.1</b>	Velocidades en los experimentos de los tubos de 0.12 cm de diámetro .....	42
<b>Tabla 3.4.2</b>	Velocidades en los experimentos de los tubos de 0.08 cm de diámetro .....	43
<b>Tabla 3.4.3</b>	Velocidades en los experimentos de los tubos de 0.04 cm de diámetro .....	44
<b>Tabla 3.5.1</b>	Velocidades de los experimentos de los tubos de 50 cm de longitud .....	46
<b>Tabla 3.5.2</b>	Velocidades de los experimentos de los tubos de 100 cm de longitud.....	48
<b>Tabla 3.5.3</b>	Velocidades de los experimentos de los tubos de 150 cm de longitud.....	49

**Capítulo 4**

<b>Tabla 4.1</b>	Promedio de las velocidades a longitudes fijas.....	55
<b>Tabla 4.2</b>	Promedio de las velocidades a diámetros fijos.....	56



**Índice de figuras y gráficas**

Página

**Capítulo 1**

<b>Figura 1.1</b>	Fuerzas en una interfaz constituida por tres medios no miscibles.....	5
<b>Figura 1.2</b>	Angulo de contacto para los casos: .....	6
	a) No mojado parcial.....	6
	b) Mojado parcial.....	6
<b>Figura 1.3</b>	Imbibición dentro de un tubo capilar cuadrado.....	15

**Capítulo 2**

<b>Figura 2.1</b>	Representación esquemática de la cámara de baño térmico.....	20
<b>Figura 2.2</b>	Esquema del mecanismo de alimentación de los líquidos.....	21
<b>Figura 2.3</b>	Esquema de la colocación del tubo sobre el soporte.....	23

**Capítulo 3**

<b>Gráfica 3.3.1</b>	Curvas de los resultados experimentales de la corrida 1.....	34
<b>Gráfica 3.3.2</b>	Curvas de los resultados experimentales de la corrida 2.....	35
<b>Gráfica 3.3.3</b>	Curvas de los resultados experimentales de la corrida 4.....	36
<b>Gráfica 3.3.4</b>	Curvas de los resultados experimentales de la corrida 6.....	37
<b>Gráfica 3.3.5</b>	Curvas de los resultados experimentales de la corrida 7.....	38
<b>Gráfica 3.3.6</b>	Curvas de los resultados experimentales de la corrida 8.....	39
<b>Gráfica 3.4.1</b>	Curvas de experimentos con tubos de 0.12 cm de diámetro.....	41
<b>Gráfica 3.4.2</b>	Curvas de experimentos con tubos de 0.08 cm de diámetro.....	42
<b>Gráfica 3.4.3</b>	Curvas de experimentos con tubos de 0.04 cm de diámetro.....	43
<b>Gráfica 3.5.1</b>	Curvas de experimentos con tubos de 50 cm de longitud.....	45
<b>Gráfica 3.5.2</b>	Curvas de experimentos con tubos de 100 cm de longitud.....	47
<b>Gráfica 3.5.3</b>	Curvas de experimentos con tubos de 150 cm de longitud.....	49
<b>Gráfica 3.6.1</b>	Experimentos de saturación contraria para diámetro 0.04 cm.....	50
<b>Gráfica 3.6.2</b>	Experimentos de saturación contraria para diámetro 0.08 cm.....	51
<b>Gráfica 3.6.3</b>	Experimentos de saturación contraria para diámetro 0.12 cm.....	52
<b>Gráfica 3.6.4</b>	Curva que no muestra comportamiento lineal.....	53

## RESUMEN

La recuperación secundaria de hidrocarburos en yacimientos fracturados es de suma importancia para la industria petrolera. Esto se debe a que en el proceso de extracción primaria no es posible recuperar gran cantidad de los hidrocarburos que se quedan atrapados en las rocas. Un fenómeno que juega un papel importante para la técnica de recuperación secundaria es, sin lugar a dudas, la "imbibición espontánea" que ocurre en yacimientos mojables por agua. Este es el proceso de desplazamiento inmisible de un fluido no mojante, por un fluido mojante, en medios capilares o porosos en ausencia de fuerzas externas. Es decir, sólo las fuerzas capilares y viscosas actúan en este proceso.

Una de las motivaciones para hacer esta investigación es que las fracturas de las rocas actúan como canales capilares de alta conductividad al flujo. En el caso de que la roca sea mojable por agua, ésta desplaza al aceite en la roca matriz, provocando la expulsión de aceite que quedaba atrapado. Existen varios tipos de sistemas capilares, donde se ha estudiado experimentalmente la imbibición espontánea,<sup>[1-3]</sup> y que buscan predecir el comportamiento en un medio poroso real. Éste medio puede ser visto como un arreglo tortuoso de varios tubos capilares.

En este trabajo se realiza el estudio del desplazamiento inmisible en un sistema capilar unidimensional, ya que, debido a su simplicidad, es muy útil para comprender a la imbibición espontánea. En este sistema unidimensional se coloca agua (tridestilada) en la entrada de un tubo capilar horizontal de vidrio y de sección transversal circular, que es inicialmente saturado con aceite (soltrol). El aceite es expulsado gradualmente del tubo por el agua debido a la imbibición espontánea.

Los objetivos de este trabajo son, por un lado, encontrar los factores que contribuyan con la reproducibilidad de los experimentos como son; el proceso de limpieza de la superficie interna de los tubos y la dirección que se toma al saturar de aceite a los mismos. Por otro lado, describir de manera simple, como varía la velocidad de la interfaz (agua-aceite) con diferentes longitudes y diámetros internos de los tubos capilares.

Se reportan resultados de experimentos con tubos de tres distintas longitudes (0.5, 1.0 y 1.5 m) y de tres distintos diámetros (0.4, 0.8 y 1.2 mm) que son sometidos previamente a un proceso sistemático de limpieza. Dichos resultados mostraron una tendencia lineal del avance de la interfaz con el tiempo, en tubos de diámetro 0.8 y 1.2 mm. cuando fueron sometidos a un proceso de saturación con Soltrol en el mismo sentido que el avance posterior del agua, y una desaceleración en los tubos de 0.4 mm, cuando fueron sometidos a un proceso de saturación con Soltrol en sentido contrario al del avance posterior del agua. En estos tubos de 0.4 mm no se produjo imbibición espontánea cuando fueron sometidos a saturación del Soltrol en el mismo sentido que el avance posterior del agua. También se encontró una mejora en la velocidad del menisco, para todos los experimentos, al aumentar al doble el tiempo de lavado.

Se ha encontrado que; tanto las modificaciones hechas al método de limpieza<sup>[3]</sup>, utilizado como base para este trabajo, como la dirección en la saturación de aceite en los tubos, son claves para la repetibilidad de los experimentos. Estos resultados también son contribuciones importantes para la investigación de la imbibición espontánea en tubos capilares circulares.

## INTRODUCCIÓN

En la naturaleza podemos encontrar varios fenómenos en los que observamos desplazamientos espontáneos de fluidos, tales como son la absorción de líquidos por telas o papel o la adsorción capilar en las plantas. En todos ellos es notorio observar los desplazamientos de los líquidos dentro del medio. Estos fenómenos se presentan en medios capilares o porosos y el desplazamiento se realiza en ausencia de fuerzas externas, valiéndose únicamente de las fuerzas capilares y viscosas, despreciando la influencia de la gravedad para los casos de desplazamiento horizontal.

Dentro de la física de yacimientos éste fenómeno es muy importante porque un yacimiento se puede ver como compuesto por bloques de roca matriz y fracturas. Las fracturas tienen como característica ser favorables al desplazamiento, permitiendo el flujo mientras que la matriz tiene gran capacidad de almacenamiento de hidrocarburo. Algunas veces la roca matriz se ve alcanzada naturalmente por acuíferos donde el aceite es expulsado por imbibición. También suele inyectarse agua, en cuyo caso estamos hablando de una técnica que se conoce en ingeniería petrolera como recuperación secundaria. Dado que es muy complicado estudiar el proceso de imbibición en una muestra de roca, se ha optado por estudiar los procesos capilares en sistemas más sencillos, sistemas unidimensionales como son tubos capilares donde se pueden encontrar diversos comportamientos que pueden ser analizados de manera individual.

Este sistema capilar unidimensional ha sido utilizado en diversos estudios <sup>[2-4]</sup>, especialmente en experimentos de desplazamiento forzado <sup>[5]</sup>, dejando mucho que decir en relación con la imbibición espontánea. Uno de los resultados fundamentales en el entendimiento de los desplazamientos espontáneos, es sin duda la expresión obtenida por W. Washburn <sup>[4]</sup> (1921) que muestra la relación que tiene el desplazamiento de un fluido por otro en tubos capilares puestos a cualquier inclinación, incluyendo vertical, en función de las características de los fluidos en cuestión.

La razón de estudiar la imbibición en este tipo de sistemas unidimensionales es debida a que un medio poroso se puede modelar por un arreglo de tubos capilares. Esto nos permite realizar un análisis de imbibición espontánea en un solo tubo y poder controlar variables como: la temperatura, la preparación (limpieza) de la superficie interna, la dirección de pre-mojado de aceite al tubo, etc. y como influyen en la imbibición.

En el presente trabajo se estudia experimentalmente el fenómeno de imbibición espontánea, en donde se observa el comportamiento del desplazamiento espontáneo de aceite (soltrol) por agua (tridestilada) dentro de un tubo capilar colocado horizontalmente y en ausencia de fuerzas externas. Las mediciones se realizan a través de la velocidad de desplazamiento de la interfaz agua-aceite, dándole un seguimiento visual durante el recorrido dentro del tubo capilar. Los objetivos generales de este trabajo son:

- a) Describir el comportamiento del desplazamiento espontáneo en relación con el diámetro y el largo del tubo capilar, tomando como modelo la relación de Washburn.
- b) Determinar la influencia de la preparación (limpieza) de las superficies y su efecto en el proceso de imbibición.
- c) Determinar la influencia del sentido de saturación de aceite al tubo capilar, con la velocidad de desplazamiento espontáneo.

Los objetivos específicos son:

- Probar la hipótesis de que el procedimiento de limpieza tiende a estandarizar la estructura química interna de los tubos capilares, al grado de hacer repetible un desplazamiento una vez que se ha utilizado el tubo capilar un cierto número de veces.
- Determinar la diferencia, de los resultados experimentales, en el desplazamiento espontáneo a cocorriente y a contracorriente del aceite por el agua.

Cabe señalar que este trabajo forma parte de un estudio experimental muy amplio que realizó Hayashi <sup>[1-3]</sup>, y junto con Ramírez <sup>[2]</sup> (2000), estudió la imbibición espontánea en diferentes sistemas capilares. Los resultados más importantes de esa investigación que se utilizan en este trabajo son los relacionados con tubos capilares de diferentes longitudes con un mismo diámetro interno. Se encontró que en estos casos la velocidad de la interfaz tiene un comportamiento independiente de la longitud. Después Hernández <sup>[3]</sup> (2002) estudió el fenómeno en tubos capilares con diferente diámetro interno a una misma longitud, confirmando la tendencia de Washburn <sup>[4]</sup> para tubos menores a un milímetro, mientras que para los tubos de 1.2 mm, se encontró un comportamiento lineal. El presente trabajo complementa los estudios anteriores ya que se realizan experimentos con tubos de diferentes longitudes y distintos diámetros internos. Es importante señalar que los tubos son sometidos (previamente a los experimentos) a un proceso exhaustivo de limpieza, el cual influye considerablemente con el desplazamiento del menisco dentro del tubo capilar. Una de las grandes aportaciones a este estudio experimental es el cambio en la dirección en la que se satura el tubo con el aceite y que es un factor importante para la reproducibilidad de los experimentos.

Como conclusión de este trabajo se menciona que en los experimentos que se realizaron, en general, hay un comportamiento lineal en la velocidad de desplazamiento en los tubos de diámetro 0.8 y 1.2 mm y que se incrementa conforme mayor es el diámetro. Este hecho confirma la hipótesis observada de la relación de Washburn <sup>[4]</sup> referente al diámetro. Aunque los resultados son consistentes con los obtenidos por Hernández <sup>[8]</sup> (2002) para el diámetro 1.2 mm, la forma lineal de las curvas contradice dicha relación, ya que sólo los experimentos en los tubos de 0.4 mm se comportan de esa manera, es decir, muestran que conforme crece la longitud de penetración, la velocidad de la interfaz disminuye.

Finalmente, el trabajo está estructurado en cuatro capítulos que se describen a continuación: En el primer capítulo, se da una breve explicación de algunos conceptos básicos relacionados con la imbibición espontánea, como son: los fenómenos que aparecen en la superficie de contacto entre dos o más sustancias inmiscibles y los fenómenos debidos a la diferencia de mojabilidades cuando los fluidos inmiscibles tocan una superficie lisa sólida. También se incluye una breve revisión de los trabajos más sobresalientes relacionados con el tema. En el segundo capítulo, se da una descripción detallada del dispositivo y una explicación del material que se utiliza, así como de los preparativos previos al experimento. En este mismo capítulo se describen las condiciones del experimento y los métodos de medición. En el tercer capítulo, se presentan el procesamiento y el análisis de los datos. En el cuarto y último capítulo, se presentan, tanto la discusión de los resultados, como las conclusiones a las que se llegaron con la investigación.

## CAPÍTULO 1

### Conceptos Básicos

Si se pone en contacto dos fluidos inmiscibles como son el agua y el aceite dentro de un medio capilar homogéneo, manteniendo la temperatura constante, de tal modo que las fuerzas externas como la gravedad o el empuje de uno de los fluidos se desprecien, se observa un desplazamiento en la interfaz. Este desplazamiento es debido a una fuerza resultante producto de la discontinuidad en las presiones de ambos fluidos. En estas condiciones se dice que es un desplazamiento espontáneo de la interfaz, ya que no existen fuerzas producidas por algún agente externo.

A continuación se revisan algunos conceptos fundamentales presentes en el mecanismo de desplazamiento espontáneo de fluidos denominado imbibición espontánea.

#### 1.1 Fenómenos de superficie.

Los fenómenos de superficie son aquellos que se presentan cuando dos o más fases inmiscibles (sólido-líquido-gas, líquido-líquido-gas y sólido-líquido-líquido) se ponen en contacto. En particular se tratarán aquellos donde participan sólido-agua-aceite.

La superficie de un líquido que está en contacto con otro medio, se encuentra en condiciones especiales en relación con su parte restante. Estas condiciones surgen porque las moléculas de la capa superficial, a diferencia de las internas, no están rodeadas por moléculas del mismo tipo y tienen por lo tanto interacciones distintas.

Las fuerzas que actúan en cada molécula de esta capa no están equilibradas y existe una fuerza resultante. A consecuencia de esta fuerza resultante que desplaza la capa superficial hacia el líquido o hacia el medio colindante, se realiza un trabajo en las moléculas superficiales cuyo signo depende de la interacción.

##### 1.1.1 Mojabilidad y ángulo de contacto.

La interacción entre moléculas de dos medios en contacto de distinta naturaleza coloca a las moléculas superficiales de ambos medios en una situación distinta a la que se encuentran las internas. Así la superficie que divide ambos medios quedará conformada de acuerdo a las fuerzas de interacción entre las moléculas. Esta situación corresponde a los casos en que los medios en contacto pueden modificar su superficie de interacción, como son el caso de sólido-líquido (inmiscibles) y el de gas-líquido, entre otros. En el primer caso el sólido no modifica su superficie de contacto, sino el líquido es el que se deforma siguiendo la morfología del sólido.

Típicamente la mojabilidad de un líquido se define, en una superficie lisa, por el *ángulo de contacto*  $\theta$  (definido posteriormente) entre una gota del líquido en equilibrio termodinámico con la superficie horizontal. La gota debe estar en equilibrio

termodinámico debido a su tensión superficial, que es la energía que hay entre el líquido y su vapor. Estos deben estar a la misma temperatura, para que la energía cinética no desprenda sus moléculas, evaporándose.

Los fluidos inmiscibles que pueden estar presentes simultáneamente en medios porosos o capilares, ejercen fuerzas de adhesión o atracción de diferentes intensidades sobre la superficie del poro, resultando en la competencia de los fluidos por ocupar la superficie y el volumen del mismo. Para cualquier par de fluidos inmiscibles, las magnitudes de las fuerzas de atracción sobre la superficie de sólido (idealmente lisa) pueden ser caracterizadas por medio de la mojabilidad de los fluidos.

Si dos fluidos no miscibles, por ejemplo agua y aire, están en contacto con un sólido, la forma que adopta el líquido se determina por la relación de las tres fuerzas que actúan sobre él: la fuerza de gravedad, la fuerza de interacción entre las moléculas del líquido y el gas, y la fuerza de interacción entre el líquido y el sólido con el cual se encuentra en contacto. Macroscópicamente, la relación que existe entre las dos últimas fuerzas puede evaluarse a través del *ángulo de contacto*  $\theta$  que es el ángulo que forma la tangente a la superficie del líquido con la del sólido, en el punto donde comienza el contacto entre ambos medios. Por convención  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) se mide a partir del medio de menor densidad. En la figura 1.1  $F_{sg}$  es la fuerza sólido-gas,  $F_{lg}$  es la fuerza líquido-gas y  $F_{ls}$  es la fuerza sólido-líquido.

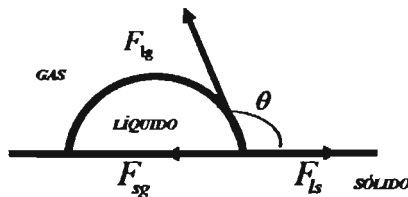


Figura 1.1 Fuerzas en una interfaz constituida por tres medios no miscibles.

La magnitud del ángulo de contacto se determina con la condición de equilibrio mecánico en donde la suma de las fuerzas aplicadas a cualquier elemento de longitud de la línea límite de contacto de los tres medios deberá ser igual a cero. En equilibrio termodinámico esta magnitud está gobernada por la *ecuación de Young*<sup>[1]</sup>.

$$F_{sg} = F_{lg} \cos \theta + F_{ls} \quad (1.1)$$

De aquí que:

$$\cos \theta = \frac{F_{sg} - F_{ls}}{F_{lg}} \quad (1.2)$$

De esta relación podemos observar 4 diferentes casos de mojado:

1. Cuando  $\theta = \pi$ ,  $\cos\theta = -1$  y  $F_{sl} - F_{lg} = F_{sg}$ , el líquido se extiende en una delgada capa sobre la superficie del sólido. Este fenómeno se denomina *mojado completo*, que es característico, por ejemplo, del agua sobre el vidrio limpio.
2. Cuando  $\theta = 0$ ,  $\cos\theta = 1$  y  $F_{sl} + F_{lg} = F_{sg}$  el fenómeno se denomina *no mojado completo* del cuerpo sólido por el líquido y se observa por ejemplo en el agua con la parafina.
3. El caso intermedio de *mojado parcial* ( $\theta > \pi/2$ ) como se muestra en la figura 1.2 b. En este caso se dice que el fluido moja al sólido llamándolo *fluido mojante*. Este caso es más común observarlo.
4. El caso *no mojado parcial* ( $\theta < \pi/2$ ) que se muestra en la figura 1.2a, donde el fluido no moja al sólido y se le llama *fluido no mojante*.

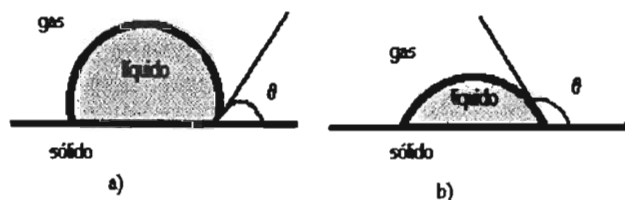


Figura 1.2 Ángulo de contacto para los casos; a) *no mojado parcial* y b) *mojado parcial*.

El valor real de  $\theta$  depende no solo de la magnitud de las fuerzas de adhesión de los dos fluidos inmiscibles sobre la superficie, sino también de la rugosidad de la superficie y de la contaminación de la misma, la cual puede consistir en una película continua o discontinua para cualquiera de los dos fluidos. Por ejemplo, el ángulo de contacto se ve afectado considerablemente por la presencia de las moléculas absorbidas en las interfaces (fluido-fluido y sólido-fluido) y frecuentemente depende de si en la frontera hay avance o retroceso.

Se sabe que si una gota pequeña de líquido se pone sobre una superficie, por su interfaz forma un ángulo de contacto  $\theta$  con el sólido, el cual es diferente de su valor en el equilibrio que si se desplaza sobre la superficie. Este nuevo parámetro es denominado *ángulo de contacto dinámico*  $\theta_d$  y puede ser de distinta magnitud que el estático  $\theta_s$  y depende de la dirección de movimiento del líquido sobre el sólido. Este ángulo de contacto dinámico depende tanto del llamado número capilar  $C_d$  como de la velocidad del menisco  $v$  [6]. Este parámetro es relevante en los procesos en donde los fenómenos capilares juegan un papel importante, no obstante, es un concepto que aún se encuentra en estudio.

Típicamente la mojabilidad se define frecuentemente en términos del ángulo de contacto. Sin embargo, dentro de un medio poroso una medición directa del ángulo de contacto es prácticamente imposible. Además, la mojabilidad en el medio poroso y sus efectos sobre el comportamiento del flujo se manifiesta en primer lugar a través de la relación entre presión capilar y saturación. Así, los métodos usuales para la medición de las mojabilidades de materiales porosos se basan en la observación de los fenómenos relacionados con presiones capilares e imbibición espontánea.

### 1.1.2 Tensión Interfacial

Si un líquido está en contacto con otra sustancia (gas, sólido u otros líquidos inmiscibles) hay una energía libre interfacial entre ambos. Esto significa que se tiene que realizar cierta cantidad de trabajo con el fin de separar ambos medios. La energía interfacial proviene de la atracción molecular entre medios de distinta naturaleza que no se mezclan. Las superficies de cualquier medio poseen energía libre, la cual se manifiesta como tensión interfacial.

La tensión interfacial es definida como el trabajo específico de ensanchamiento de la superficie de un cuerpo. Este trabajo puede hacerse de dos modos diferentes: por el estiramiento de una superficie ya existente o por la creación de una nueva superficie. (Por ejemplo el corte de un cuerpo). Gibbs<sup>[6]</sup> fue el primero en distinguir entre estas dos definiciones de tensión interfacial para sólidos. La primera tensión interfacial se define como una fuerza mecánica a lo largo de la superficie por unidad de longitud (un esfuerzo mecánico) y la segunda tensión interfacial se define termodinámicamente como el trabajo (un cambio en el que corresponde potencial termodinámico) de formación de una nueva superficie por unidad de área.

### 1.1.3 Tensión superficial.

El trabajo que realiza la energía libre específica interfacial entre una sustancia y su vapor se denomina *tensión superficial*. Se denota por la letra griega  $\gamma$ . Típicamente, la tensión superficial de los líquidos se mide entre el líquido y el aire combinado con su vapor. Estrictamente la tensión superficial de un líquido sería la tensión entre él y su vapor saturado en condiciones de equilibrio termodinámico.

De acuerdo a Dupré, el trabajo necesario para separar, por ejemplo, un líquido de un sólido ( $W_{st}$ ) está relacionado con las tensiones superficial e interfacial a través de la siguiente ecuación.

$$W_{st} = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_{sl} \quad (1.3)$$

Donde  $\gamma_s$  y  $\gamma_l$  son las tensiones superficiales del sólido y del líquido y  $\gamma_{sl}$  es la tensión interfacial entre el sólido y el líquido.



## 1.2 Fenómenos capilares y su importancia

La diferencia de mojabilidades entre los distintos fluidos hacia un sólido es la causa que origina los denominados fenómenos capilares. La manifestación macroscópica de este hecho ocurre cuando los fluidos penetran espontáneamente a través de espacios muy reducidos, como en los llamados medios capilares o como en la roca porosa. De hecho el fenómeno de imbibición, que es el tema principal en esta tesis, es una manifestación de los fenómenos capilares.

Este tipo de fenómenos es de gran importancia en la industria petrolera para la recuperación secundaria del petróleo, en especial en yacimientos naturalmente fracturados (YNF) o en rocas que son preferentemente mojables por agua. La manera en que se inyecta el agua determina la cantidad de petróleo que se puede recuperar debido a las distintas velocidades de avance del agua y el crudo en las grietas y en las matrices porosas.

Un proceso de recuperación de aceite crudo por inyección de agua puede ser diferenciado en dos etapas en los mecanismos de producción. La primera etapa corresponde al tiempo que transcurre desde el comienzo de la inyección hasta la irrupción de agua en el pozo productor. El agua se canalizará más rápidamente por las capas de mayor permeabilidad que son las que presentan menor resistencia al flujo. En esta etapa el mecanismo preponderante de producción es el empuje del petróleo con agua por aplicación de una fuerza externa. Luego de la irrupción, comienza lo que se denomina segunda etapa, donde la extracción del petróleo continúa junto con la extracción de agua. Este petróleo se produce tanto por arrastre de la capa de alta permeabilidad como por la *imbibición* desde las capas de menor permeabilidad, mediante el agua disponible en los estratos ya barridos.

El petróleo de las capas no conectadas se desplaza inicialmente por imbibición hacia el canal de alta permeabilidad al agua (ya inundado) y por dicho canal hasta el pozo productor. La magnitud e importancia de este mecanismo dependerá tanto de la superficie de contacto entre las capas como de las características de la roca y su interacción con los fluidos en las condiciones del yacimiento. En esta última etapa las fuerzas preponderantes en la producción de hidrocarburos son las fuerzas capilares.

### 1.2.1 Presión capilar

El valor del ángulo de contacto es un parámetro importante para determinar la curvatura de la interfaz entre dos fluidos en un medio capilar. En la mayoría de los medios capilares que modelan los medios reales, las fuerzas gravitacionales presentan efectos despreciables sobre dicha interfaz.

Cuando dos fluidos inmiscibles están en contacto, existe una discontinuidad en la presión de los fluidos que depende de la curvatura de la interfaz que separa ambos medios. Esta diferencia de presión, que recibe el nombre de *presión capilar*, se denota por  $P_c$  y está dada por la ecuación de Laplace <sup>[9]</sup>.

$$P_c = P_2 - P_1 = \frac{2\gamma_{12}}{r_m} \quad (1.4)$$

Donde  $\gamma_{12}$  es el coeficiente de tensión interfacial entre los medios 1 y 2 (energía libre específica de la interfaz),  $P_2$  es la presión hidrostática sobre el lado cóncavo y  $P_1$  es la presión hidrostática sobre el lado convexo de la interfaz fluido-fluido y  $r_m$  es el radio medio de curvatura que está definido por:

$$\frac{1}{r_m} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.5)$$

Con  $r_1$  y  $r_2$  los radios principales de curvatura de la interfaz. De este modo podemos escribir la ecuación de Laplace de diferente forma:

$$P_c = P_2 - P_1 = \gamma_{12} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1.6)$$

Podemos observar de la *ecuación 1.4* que la presión capilar es una cantidad positiva si el coeficiente de tensión interfacial es positivo.

Para una interfaz en un tubo capilar circular de radio  $r_0$  tenemos que la ecuación de Laplace se convierte en:

$$P_c = P_2 - P_1 = \frac{2\gamma_{12}}{r_0} \cos \theta \quad (1.7)$$

La cual esta expresada en términos del ángulo de contacto debido a la presencia de una superficie.

Una de las manifestaciones macroscópicas de la presión capilar en la que se puede aplicar esta ecuación, se presenta cuando un tubo capilar colocado verticalmente permite la entrada de un líquido por el extremo inferior, elevando la altura del líquido hasta un nivel  $h$  que es donde las presiones se igualan.

La condición de equilibrio mecánico para una superficie cualquiera, se determina con la magnitud del ángulo de contacto y la ecuación de Young (ecuación 1.2).

$$\cos \theta = \frac{F_{sg} - F_{sd}}{F_{lg}} = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sd}}{\gamma_{lg}} \quad (1.8)$$

donde las  $\gamma$ 's representan los coeficientes de tensión interfacial entre pares de medios. Esta propiedad también la poseen los sólidos. El producto  $\gamma_{gs} \cos \theta$  es la tensión de adhesión, la cual determina la preferencia del líquido para mojar el sólido, esto es, si se adhiere o se extiende sobre éste.

## 1.2.2 Números adimensionales de la imbibición espontánea

En desplazamientos de dos fases inmiscibles dentro de medios capilares horizontales, se manejan dos números adimensionales que caracterizan el flujo en el medio poroso: el número capilar  $Ca$  y la relación de viscosidades  $m$ .

### 1.2.2.1 Número Capilar

La importancia de las condiciones de mojabilidad de la superficie del medio capilar o poroso, la tensión interfacial  $\gamma$ , la viscosidad  $\mu$  del fluido y la velocidad  $V$  de la interfaz dentro del capilar, han sido generalmente considerados en los casos más típicos correspondientes a las condiciones en que uno de los dos fluidos moja más rápidamente a la superficie del medio capilar o poroso, la tensión interfacial es grande y las viscosidades y velocidades son pequeñas. Estos parámetros han sido combinados en forma de una relación adimensional llamada *número capilar*.

$$Ca = \frac{\mu V}{\gamma} \quad (1.9)$$

Como se puede apreciar, este concepto es una expresión totalmente dependiente de las características del líquido dentro del capilar en función de la velocidad de la interfaz entre los líquidos dentro del mismo.

### 1.2.2.2 Razón de viscosidades.

Las viscosidades de ambos fluidos dan lugar a dos números capilares:  $Ca$  y  $mCa$ . Cada uno corresponde a cada fluido y  $m$  es la razón de viscosidades descrita como:

$$m = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (1.10)$$

donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  son las viscosidades del fluido que desplaza y el que es desplazado respectivamente

## 1.3 Imbibición espontánea y su importancia

La imbibición espontánea es el proceso de desplazamiento inmiscible mediante el cual un fluido que ocupa espacios muy estrechos es expulsado de manera natural por otro valiéndose únicamente de la diferencia entre las fuerzas de atracción que tiene el sólido por ambos fluidos. Este proceso se lleva a cabo en medios capilares o porosos en ausencia de fuerzas externas que produzcan un cambio de presión. Por ejemplo, para el caso en donde los fluidos inmiscibles son el agua y el aceite que se desplazan dentro de un medio capilar

como lo es una muestra de roca de yacimiento, cuando la roca preferentemente mojable por agua e inicialmente saturada de aceite, es sumergida en agua, expulsa gradualmente al aceite, al mismo tiempo que el agua penetra en los espacios capilares que el aceite va dejando debido únicamente a la diferencia en las mojabilidades de los líquidos.

Esto ocurre, porque en este caso las fuerzas moleculares de atracción de la roca por el agua son mayores que por el aceite.

#### 1.4 Trabajos relacionados con el tema.

Con el fin de conocer algunos trabajos relacionados con el tema, en esta sección se han seleccionado los artículos más representativos desde el punto de vista teórico, así como algunos de los estudios experimentales realizados con los procesos de imbibición en tubos capilares con distinta geometría.

Primeramente con el interés de dar a conocer la construcción de la relación primordial que gobierna al desplazamiento espontáneo, la cual es una relación para la velocidad de penetración de un fluido dentro de un capilar, se revisa el artículo de Washburn<sup>[4]</sup> quien es uno de los pioneros en el tema.

Washburn<sup>[4]</sup> (1921) desarrolló una expresión para el desplazamiento inmisible de un líquido dentro de un tubo capilar circular de sección transversal uniforme de radio  $r$  ( $< 1$  mm), longitud  $l$ , forma e inclinación arbitrarias. Partió de la ley de Poiseuille, la cual describe el comportamiento de flujo de fluidos en tubos capilares redondos (radio interno menor a un milímetro) donde el flujo volumétrico  $Q$  está dado por.

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \sum \Delta P}{8\mu l} (r^4 + 4\epsilon r^3) \quad (1.11)$$

Con  $l$  la longitud de la columna de líquido en el tubo,  $\mu$  la viscosidad del líquido y  $\sum \Delta P$  es la diferencia de presión total efectiva que está actuando para forzar el movimiento del líquido a lo largo del tubo capilar. La presión total efectiva está compuesta por tres presiones por separado: la presión atmosférica  $P_A$  con un valor numérico constante, la presión capilar  $P_c$  dada anteriormente como  $P_c = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta$ , donde  $\gamma$  es la tensión superficial y la presión hidrostática dada como  $P_H = \rho g(h - l_s \sin \psi)$  que es la expresión para un tubo con una inclinación  $\psi$  en general. Sabemos que para un cilindro de sección circular  $dV = \pi r^2 dl$  convirtiendo a la ecuación 1.11 en.

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\left[ P_A + \rho g(h - l_s \sin \psi) + \frac{2\gamma}{r} \cos \theta \right]}{8\mu l} (r^2 + 4\epsilon r) \quad (1.12)$$

Esta ecuación es conocida como la ecuación de Washburn<sup>[4]</sup> expresada para un solo fluido y el término  $4\epsilon r$  es el término de arrastre o deslizamiento con las paredes del tubo y que por consideraciones del tipo de líquido que moja perfectamente las paredes del capilar,

se desprecia. Si se considera el caso particular en el que un tubo está colocado horizontalmente ( $\psi = 0$ ), entonces se puede despreciar tanto la presión hidrostática como la atmosférica, ya que es la misma en ambos lados del tubo. De aquí que la única que permanece debido a las dimensiones del tubo es la presión capilar, quedando de la ecuación (1.12) solamente:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r}{\mu} \frac{\gamma}{4l} \cos\theta \quad (1.13)$$

De modo que al integrar esta expresión en función del tiempo llegamos a:

$$l^2 = \left( \frac{\gamma \cos\theta}{2\mu} \right) r t \quad (1.14)$$

en donde Washburn llamó a la expresión dentro del paréntesis *coeficiente de penetrabilidad del líquido*<sup>[1]</sup>, con dimensiones de velocidad. Se concluye que la penetrabilidad de un líquido es igual a la distancia a la cual el líquido penetrará un tubo capilar de radio uniforme por unidad de tiempo, fluyendo bajo presión capilar. La presencia del factor  $\cos\theta$  hace de la penetrabilidad una función que sólo depende del material del capilar (para tubos horizontales).

Las diferentes expresiones de la ecuación de Washburn están comprobadas experimentalmente por el propio Washburn. Por un lado obtuvo experimentalmente el valor de la tensión superficial  $\gamma$  (para el mercurio) presente en un experimento de ascenso capilar de 70.2 dina/cm que es un valor aceptable con respecto al valor teórico de 71.03 dina/cm (Landolt-Börnstein-Roth)<sup>[4]</sup>. Por otro lado comprobó experimentalmente las expresiones al graficar los resultados obtenidos en experimentos de imbibición espontánea entre aire-mercurio a temperatura ambiente y compararlos con la curva que describe dicha expresión, encontrando que los valores experimentales se asemejan a la curva teórica. Los valores de los radios calculados en los tubos capilares que utiliza Washburn son de 0.1454 y 0.369 mm, que son menores a un milímetro de radio.

Por su parte Calvo et al.<sup>[7]</sup> (1925) realizan estudios experimentales del flujo bifásico en tubos capilares circulares, con los cuales se determinaron dinámicamente las variaciones de la presión capilar durante el movimiento de la interfaz para estudiar los efectos de la velocidad del fluido y la naturaleza de los fluidos usados. Esto lo realizó en varios tipos de experimentos de imbibición y drenado utilizando diferentes tipos de fluidos como agua, keroseno, aire y ciclohexano. Dichos experimentos fueron:

1. Keroseno desplazando aire (imbibición por fluido fuertemente mojante)
2. Agua desplazando keroseno (imbibición por fluido débilmente mojante)
3. Keroseno desplazando agua (drenado por un fluido menos mojante)
4. Agua desplazando ciclohexano (imbibición por un fluido débilmente mojante y de viscosidades iguales)

El sistema experimental consistió en conectar 2 recipientes con un tubo capilar horizontal de vidrio. Los capilares de vidrio se utilizaron sin un proceso de limpieza previo al experimento, se utilizó el siguiente desarrollo para el análisis de resultados:

El movimiento del menisco resulta de un balance entre la presión aplicada  $\Delta P_\infty$  en los extremos del capilar. La presión capilar dinámica  $P_C^D$  en la interfaz está dada por la aplicación de la ecuación de Poiseuille (1.11). El balance global puede ser expresado por la ecuación de Washburn llegando a la expresión.

$$[\mu_1 x + \mu_2(L - x)] \frac{dx}{dt} = \frac{D^2}{32} (\Delta P + P_C^D) \quad (1.15)$$

Donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  son las viscosidades respectivas de los fluidos 1 y 2 y  $\frac{dx}{dt}$  es la velocidad de la interfaz. La presión capilar dinámica esta relacionada con las presiones de los fluidos mojanete y no mojanete mediante la expresión

$$P_C^D = P_{mm} - P_m, \quad (1.16)$$

De este modo Calvo [7] encuentra que en todos los casos estudiados existe una excelente reproducibilidad entre las diversas corridas realizadas bajo las mismas condiciones experimentales. Encuentra también que para el caso de *Imbibición por un fluido fuertemente mojanete (Keroseno desplazando aire)*, la velocidad  $v$  de la interfaz decrece proporcionalmente con la longitud del segmento de tubo ocupado por el keroseno dentro del capilar porque las fuerzas viscosas aumentan. Los resultados son comparados con los de Hoffman<sup>[8]</sup> (1975) teniendo un error menor al 10%, lo cual es aceptable. Concluyendo que para este caso hay un incremento abrupto de la presión capilar a bajas velocidades.

Por otro lado, para la *Imbibición por un fluido débilmente mojanete (agua desplazando Keroseno)* se encontró que la reproducibilidad es también muy buena. Estos resultados al igual que los anteriores, se graficaron, encontrando que en esta gráfica hay una curvatura menor que en la anterior. Esto es consistente, ya que la diferencia de viscosidades entre los fluidos es mas baja en este experimento que en el anterior, concluyendo que la velocidad de la interfaz aumenta conforme el agua reemplaza al keroseno en el tubo.

Otros resultados son las diferentes características de imbibición en tubos secos y premojados en el caso débilmente mojanete.

- Los valores de la presión capilar dinámica  $P_C^D$  en el caso de capilares secos son notablemente más bajos, varían muy rápido con la velocidad y son negativos por inversión de curvatura del menisco a altas velocidades, comparados con los valores de  $P_C^D$  que son constantes a altas velocidades en el caso de premojados.

- El incremento de  $P_c^D$  a bajas velocidades es observable en los casos de premojado bajo altos valores de número capilar, lo mismo se observó en el caso de capilares secos aunque, por supuesto, los valores de las velocidades fueron distintas.

Al realizar una discusión de los resultados de Calvo et al<sup>[7]</sup>, Dullien<sup>[9]</sup> observa que existe una equivocada interpretación del número capilar y con base de Buyevich<sup>[10]</sup> (1995) da un punto de vista macroscópico del papel jugado por ambas fuerzas; capilares y viscosas, llamando a su relación *el valor verdadero del número capilar*<sup>[5]</sup>.

$$CA = \frac{F_v}{F_c} = \frac{8\mu v}{\sigma \cos\theta} \frac{L}{D} = \frac{8Ca}{\cos\theta} \frac{L}{D} \quad (1.17)$$

En esta relación descrita por Dullien<sup>[9]</sup>, se puede observar que el número capilar verdadero CA esta en términos del número capilar conocido anteriormente Ca y del ángulo de contacto  $\theta$ , incluyendo además las características de tubo capilar.

Por otra parte Dong junto con Dullien<sup>[11]</sup> (1998) realizan una revisión exhaustiva de los estudios sobre imbibición, considerando la geometría de los poros, por lo que hacen una remembranza de las distintas formas capilares que puede haber, para un análisis topológico del poro, es decir, toma diversas geometrías de capilares para entender el comportamiento en un poro real, mencionando entre otras formas, los *capilares circulares*, donde Calvo<sup>[2]</sup> hace sus experimentos de imbibición y drenado, dando lugar a lo que llama Imbibición libre espontánea.

En otro artículo Chatzis y Dullien<sup>[13]</sup> (1985) hacen un análisis de capilares de sección transversal irregular y diámetro no uniforme, haciendo de este modo un incremento a la complejidad de la topología del poro conteniendo ramas. Esto es generado por tubos con ahorcamientos, es decir, partes de los tubos en donde el diámetro interno cambia bruscamente. Después se realiza el análisis del comportamiento de los fluidos al desplazarse por ese medio. Se encontró que en los cambios de diámetro interno la velocidad de la interfaz cambia bruscamente.

También trabajos como el de Lenormand<sup>[12]</sup> (1983) quien utiliza tubos capilares de sección transversal cuadrada, analizando las condiciones de equilibrio capilar en este tipo de geometría, y el de Dong<sup>[11]</sup> (1995) que estudia el comportamiento de la imbibición en el mismo sistema. Esto con la finalidad de ir elevando la complejidad del fenómeno ya que los poros reales no son de superficie lisa ni de sección circular ni mucho menos uniformes. Ambos autores coinciden en que para los capilares de sección cuadrada, la preferencia del fluido mojante embeberá más rápidamente a lo largo de los bordes de las esquinas que en el centro del capilar, pero al final de este proceso todo el fluido no mojante también será desplazado del capilar cuadrado por el fluido mojante, utilizando los bordes del cuadrado como canales capilares. La figura 1.3 ayudará a entender este fenómeno.

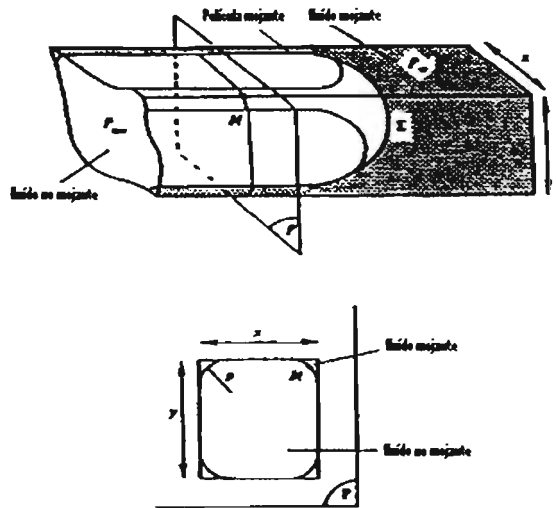


Figura 1.3 Imbibición dentro de un tubo capilar cuadrado<sup>[12]</sup>.

Por su parte Ramírez, M. A.<sup>[2]</sup> (1998) realizó un estudio experimental de la imbibición para aceite (soltrol) y agua (tridestilada) utilizando diversos medios de desplazamiento en 1, 2 y 3 dimensiones. Para una dimensión utiliza tubos capilares de sección transversal circular con tres distintas longitudes (20, 50 y 78 cm), y diámetro de 0.1 cm. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente y presión atmosférica. Cada tubo recibió un tratamiento de limpieza previo al experimento, utilizando una solución de ácido sulfúrico (36%) y permanganato de potasio (100 gr/lit) y posteriormente enjuagado con agua bidestilada para ser secado con gas nitrógeno. En los experimentos que realiza, primero satura de aceite al tubo haciendo desplazar al aire dentro, y luego deposita agua en una de las entradas del tubo haciendo el desplazamiento espontáneo del aceite por el agua hasta sacarlo del tubo, los datos son obtenidos al medir las velocidades de desplazamiento de las interfaces. De este modo encuentra que para los tubos mas cortos existe una velocidad de desplazamiento mayor y que los comportamientos entre los experimentos son distintos. Al hacer el ajuste de los resultados encuentra que hay un comportamiento de tipo Washburn (ecuación 1.14) para algunos experimentos y para los demás el comportamiento es lineal. Ante el planteamiento de su hipótesis de la existencia de una velocidad terminal para los tubos de mayor longitud, concluye que los tubos cortos son una muestra del comportamiento en los largos ya que según él, la interfaz no se entera de la salida del tubo y sigue empujando como si fuera un pistón. También observa una aceleración de la interfaz en la entrada del tubo capilar al iniciar el experimento adjudicándole al hecho de que a la entrada la fuerza capilar es mayor que la viscosa, cosa que no vuelve a ocurrir durante el recorrido del menisco.



En el trabajo de Hernández, J. <sup>[3]</sup> (2002) se realizaron experimentos de imbibición espontánea en tubos capilares de una misma longitud (150 cm) pero de tres tipos de diámetros internos: 0.12, 0.08 y 0.04 cm. Hernández, al igual que Ramírez, utiliza también un proceso exhausto de limpieza previo a cada experimento, aunque de soluciones diferentes (que se toma como base para el lavado de tubos de este trabajo), encontrando que la velocidad de la interfaz es proporcional al diámetro del tubo, esto es, conforme el diámetro es mayor, la rapidez de imbibición incrementa. Menciona también en dicho trabajo que con el método de limpieza no se puede alcanzar la homogeneidad en la superficie interna de los tubos ya que tampoco encontró reproducibilidad en ellos. Para tubos de menor diámetro (0.4 mm y 0.8 mm) encontró un comportamiento tipo Washburn (tendencia asintótica), sin embargo para los tubos de mayor diámetro (1.2 mm) se encontró un comportamiento cercano a lineal.

Debido a que en los dos últimos trabajos se estudió la imbibición espontánea: por un lado se manejan tubos capilares de distinta longitud pero igual diámetro interno y por otro de diferente diámetro pero igual longitud, respectivamente, en este trabajo se busca estudiar el comportamiento con las dos variables, es decir, se analiza la imbibición espontánea en tubos capilares de sección circular a diferentes diámetros internos y a distintas longitudes. En este estudio se espera encontrar parámetros que de alguna manera afecten a la velocidad de desplazamiento inmiscible en tubos capilares, para su control posterior, ya que los resultados de los trabajos anteriormente mencionados, no muestran reproducibilidad, ni un comportamiento en general descrito por la relación 1.14.

Las expectativas de este trabajo, se consideran tomando en cuenta las siguientes hipótesis:

- La velocidad de penetrabilidad del agua desplazando al aceite, en función la longitud y diámetro de cada tubo, pueden o no corresponder al modelado por Washburn en la relación 1.14 para tubos con radio menor a medio milímetro (hipótesis de Washburn).
- Los comportamientos de las velocidades son o no consistentes con los trabajos de Hernández y/o Ramírez.
- El sentido de la saturación de aceite a los tubos, puede ser un elemento determinante en la rapidez del fenómeno de imbibición.
- El doble lavado o el tiempo de permanencia en las sustancias de limpieza de tubos, afecta positivamente al desplazamiento del menisco.

Los factores de interés que afectan la velocidad de la interfaz son: en primer lugar, la homogeneidad de la superficie interna del tubo capilar, la cual se obtiene mediante la forma y cantidad de lavado a los tubos capilares y el sentido de premojado de las paredes internas de los tubos con aceite. Estos factores permiten realizar un análisis macroscópico del comportamiento del desplazamiento de la interfaz.

Una de las razones de este tipo de estudios ha sido buscar una reproducibilidad en los experimentos, sin lograr obtener resultados satisfactorios aún. Por tanto, en este trabajo además de realizar una metodología en cuanto a la preparación de las superficies internas y mostrar si diversas limpiezas afectan o no el proceso de imbibición, se considera la importancia del sentido inicial de flujo del aceite para saturar el tubo, aportando de este modo a la búsqueda de la reproducibilidad a un determinado número de experimentos.

## CAPITULO 2

### Montaje y método experimental.

En términos generales, en este trabajo se realiza un estudio experimental con tubos capilares de sección transversal circular de diferente diámetro y de distintas longitudes, con el propósito de unificar los estudios que realizaron, por su parte, Ramírez<sup>[7]</sup> y Hernández<sup>[8]</sup> a la imbibición espontánea en tubos capilares. El proceso de lavado interno de los tubos aportado por Hayashi en el trabajo de Hernández<sup>[8]</sup>, se utilizó como base para este trabajo.

En el presente capítulo se describe detalladamente el arreglo y los elementos que componen el experimento, a partir de los procedimientos y técnicas desarrolladas anteriormente por Hayashi Martínez<sup>[6]</sup> (2001) y Javier Hernández<sup>[8]</sup> (2002).

#### 2.1 Descripción del material utilizado.

Se utilizó un total de 9 tubos capilares de vidrio de sección transversal circular, de diámetros internos 0.4, 0.8 y 1.2 mm y cada uno de longitudes 0.5, 1.0 y 1.5 m, es decir, se tienen juegos de tres tubos capilares del mismo diámetro interno pero de distintas longitudes como se indica en la tabla 2.1. La razón de utilizar estas características de los tubos capilares es debida al seguimiento que se le da a los trabajos de Ramírez<sup>[7]</sup> y Hernández<sup>[8]</sup>.

juego No.	tubo No.	diámetro	longitud
1	1	0.4 mm	0.5 m
	2	0.4 mm	1.0 m
	3	0.4 mm	1.5 m
2	1	0.8 mm	0.5 m
	2	0.8 mm	1.0 m
	3	0.8 mm	1.5 m
3	1	1.2 mm	0.5 m
	2	1.2 mm	1.0 m
	3	1.2 mm	1.5 m

**Tabla 2.1** Juegos de tubos utilizados para el experimento.

Para dar continuidad a las investigaciones de Ramírez (1998) y de Hernández (2002), se utiliza agua-aceite como interfaz líquido-líquido, donde la *fase mojanante* es agua tridestilada, mientras que la *fase no mojanante* es aceite *soltrol-170*, este último es una mezcla de isoalcanos C12-C14. Debido a que ambos fluidos son incoloros es necesario colorear el aceite *soltrol* para mejorar la visualización del fenómeno, el colorante utilizado es *oil res 0* a una concentración de 0.2 gr de colorante por cada litro de *soltrol*.

La tabla 2.2 muestra las propiedades físicas de los dos fluidos por separado.

<i>Propiedades físicas a 25°C</i>	<i>Agua tridestilada</i>	<i>soltról coloreado</i>
<b>Densidad (gr/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>0.997</b>	<b>0.779</b>
<b>Viscosidad (poise)</b>	<b>0.01</b>	<b>0.0345</b>
<b>Tensión interfacial (dina/cm)</b>	<b>26.0</b>	

**Tabla 2.2** Propiedades físicas de los líquidos a 25°C.

La tabla 2.2 es obtenida del trabajo de J. Hernández <sup>[8]</sup> donde midió las densidades utilizando un densímetro a  $25 \pm 0.1$  °C. Las viscosidades las obtuvo con un viscosímetro a  $25 \pm 0.2$  °C y la tensión interfacial del sistema la midió con el método de anillo de *du Noüy*, con un tensiómetro, a  $25 \pm 0.1$  °C.

## 2.2 Conjunto experimental.

Para la realización de los experimentos, es necesario que las condiciones ambientales sean las adecuadas para poder controlar variables como la temperatura, por ejemplo, y de esta manera evitar algún tipo de fuerza externa (producida por un gradiente de la misma). Para dar inicio, es necesario tener listo todo el equipo con el cual se mide y controla cada experimento, es por eso que en esta sección se presentan las partes importantes para el alistamiento de tal, dando una pequeña explicación del funcionamiento de cada uno de los elementos y su función.

### 2.2.1 Baño térmico.

Con el fin de mantener una temperatura constante, se tiene un sistema isotérmico para los elementos, denotado por baño térmico. Dentro de una cámara de vidrio con dimensiones de 200 cm de largo, por 50 cm de ancho y 50 cm de altura, con puertas corredizas, que se deben mantener cerradas para aislar el sistema del exterior, hay un soporte en donde se colocan los tubos capilares. Éste consiste en un riel de aluminio de 180 cm de largo por 25 cm de alto con una base formada por cuatro tornillos giratorios que ayudan a colocar al tubo a un nivel horizontal óptimo. Además se tiene pegada a lo largo del soporte una cinta métrica, que permite medir y visualizar las distancias que recorre el menisco para posteriormente determinar la tasa de desplazamiento durante los experimentos. También dentro de la cámara hay cuatro ventiladores colocados de tal modo que se genere una buena circulación de aire, esto con el propósito de homogeneizar la temperatura del baño. Se tiene un control de temperatura (on-off) formado por dos fuentes de calor (focos tapados con latas como disipadores) conectados a un termo-control de columna de mercurio como indicador de la temperatura, el cual se programa para que

encienda las fuentes de calor en el momento en que el termo-control indique que la temperatura es más baja que  $25.0^{\circ}\text{C}$  y se apague cuando la temperatura es más alta que dicho valor, este valor de temperatura tiene un rango de incertidumbre de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.2 Aire acondicionado.

Para evitar que el calor provocado por los focos haga subir demasiado la temperatura al interior del baño, se coloca un equipo de aire acondicionado por fuera, de tal modo que suministre una cama de aire frío por debajo de la cámara de baño térmico, haciendo que la temperatura disminuya y sea más fácil mantener el valor deseado.

Junto con la cámara de baño térmico este sistema proporciona un mayor control de temperatura y se justifica considerando las variaciones de temperatura ambiente que se producen durante el día.

### 2.2.3 Registro de temperatura.

Para medir la temperatura en el interior de la cámara de baño térmico, se utiliza un sistema compuesto por tres termo-sensores, que están colocados en el centro y ambos extremos del interior de la cámara. Estos sensores son conectados a una tarjeta de adquisición de datos, la cual manda las señales a una computadora que registra los datos de temperatura cada minuto. Debido a que el aire acondicionado no está automatizado, se enciende manualmente en cuanto se nota un aumento de temperatura y se apague cuando el valor regresa a  $25^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.4 Video-filmación:

La medición de datos de la velocidad de la interfaz, se realiza mediante una cámara de video montada en un arreglo de rieles que son instalados a un costado de la cámara de baño térmico. Los rieles son paralelos a la longitud de la cámara de baño térmico y a los tubos capilares. De este modo la cámara de video se desplaza por los rieles grabando cada centímetro del recorrido de todo el tubo. Se le da tiempo suficiente en cada centímetro (aproximadamente un minuto) con el fin de darle oportunidad a la interfaz de atravesar dicho centímetro. Un televisor se conecta a la videocámara para monitorear el experimento y observar el momento en que el menisco sale del cuadro de filmación, ya que el área de visión es de hasta medio centímetro alrededor de él, y así poder desplazar manualmente la cámara y continuar sucesivamente con el siguiente centímetro hasta recorrer todo el tubo o hasta que el menisco se detenga por completo.

La figura 2.1 muestra esquemáticamente el arreglo experimental.

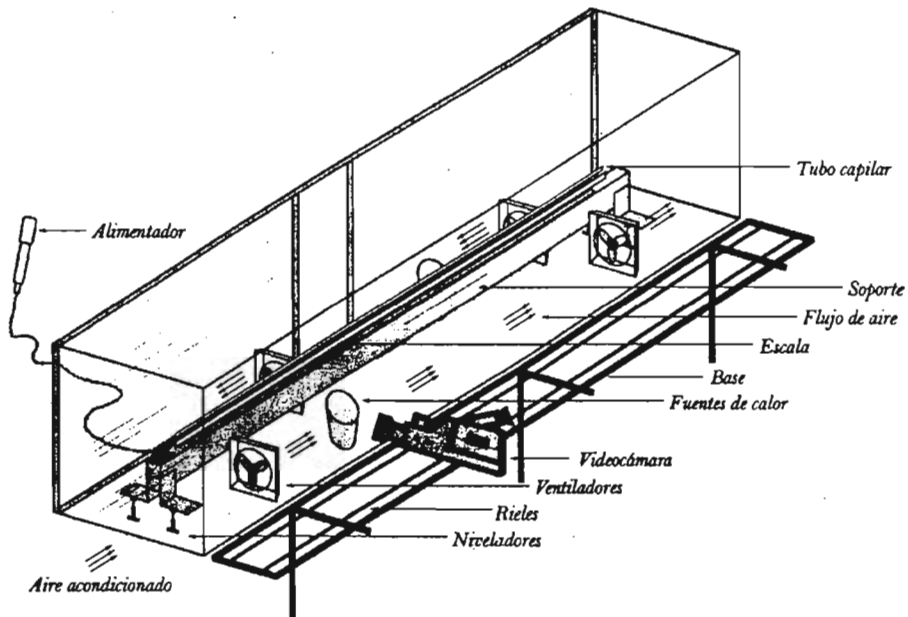


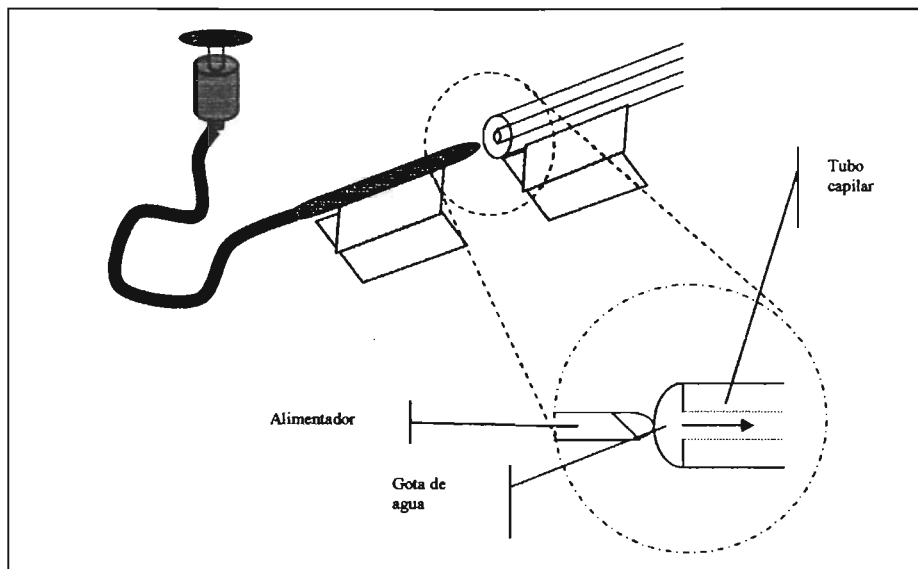
Figura 2.1. Representación esquemática del la cámara de baño térmico.

### 2.3 Mecanismo de alimentación.

El sistema que se requiere para saturar los tubos de cada uno de los fluidos está compuesto por una micro-manguera de plástico de aproximadamente 0.064 in de diámetro interno, con una longitud de un metro. Uno de sus extremos se conecta a una base que va sobre el soporte de los tubos en el interior de la cámara, de modo que la manguera queda alineada con el centro del tubo capilar, separados a una distancia mínima para que no se toquen. El otro extremo se conecta a una jeringa que está fuera de la cámara. Mediante esta jeringa, se puede alimentar controladamente el fluido a la sección circular de la entrada del tubo sin afectar la temperatura del sistema (figura 2.2). Cabe señalar que hay una manguera para cada fluido, con el fin de evitar contaminaciones.

Para evitar sobre presión que afecte el desplazamiento espontáneo del menisco, como empuje o inyección del líquido en cuestión, la saturación de líquidos se realiza depositando una pequeña gota del fluido a la entrada del tubo, de modo que la gota esté constantemente adherida al área de la sección transversal, proporcionando un avance continuo del menisco. Con este método se aprovecha la preferencia en mojabilidad del vidrio y la capilaridad para que el fluido entre al interior del tubo, según se muestra en la figura 2.2. Este mecanismo se realiza primero para el aceite y después para el agua, cada uno con su propio sistema de alimentación para cada experimento.

El mecanismo de alimentación diseñado para este trabajo garantiza la saturación adecuada, ya que ayuda a controlar el depósito de los líquidos a los tubos capilares desde el exterior de la cámara.



**Figura 2.2** Representación esquemática del mecanismo de alimentación de los líquidos.

## 2.4 Proceso de limpieza

El tratamiento de limpieza de los tubos capilares es una de las partes más importantes para los experimentos, ya que de este proceso depende en gran parte cómo se mueve la interfaz agua-aceite dentro del tubo. En esta sección se explica detalladamente el método de limpieza.

Para el proceso de limpieza se emplearon varias sustancias con las cuales se saturaba y se dejaba un determinado tiempo a cada tubo por separado. Estas sustancias fueron; solvente thinner, detergente extrán (en solución al 20%), mezcla crómica (900 ml de ácido sulfúrico y 100 gr de dicromato de potasio diluido en 100ml de agua), ácido clorhídrico (diluido al 50% con agua) y agua destilada. Los tiempos de permanencia en cada una de las operaciones de limpieza se dan en el siguiente capítulo. Cabe mencionar que cuando se hace el cambio de sustancia (entre cada operación de limpieza), se hace fluir dentro del tubo gotas de la sustancia anterior para eliminar cualquier residuo sólido atrapado dentro del tubo; posteriormente el capilar se enjuaga en su interior con agua destilada, para después llenarlo con la siguiente sustancia.

Una vez que cada tubo capilar es lavado, se pasa a un tratamiento de secado, pasando a través de ellos gas nitrógeno, para después guardarlos junto con bolsitas de desecador.

Existe una hipótesis que plantea que la superficie interna del tubo capilar, al recibir un cierto número de tratamientos de limpieza, alcanzaría un estado de repetibilidad, específicamente, tendería a una mojabilidad global igual de un experimento a otro. Esto debería reflejarse en el proceso de desplazamiento de los fluidos, que debería ser idéntico después de cierto número de experimentos.

En la sección de resultados se indica el procedimiento que se siguió para llegar a un tipo de limpieza que se consideró óptimo.

## 2.5 Desarrollo del experimento.

A continuación se da una descripción cronológica del proceso experimental que se llevó a cabo para cada uno de los tubos capilares, con 8 repeticiones experimentales, y las mismas condiciones iniciales.

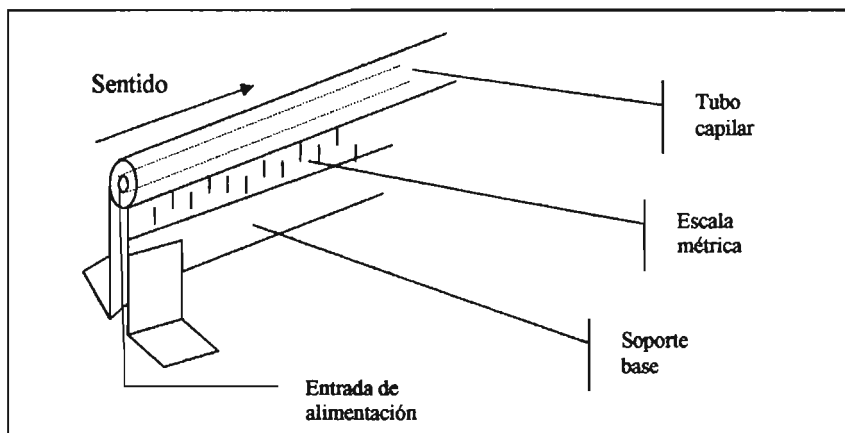
Las condiciones iniciales se resumen en la tabla 2.3.

<b>Parámetros experimentales</b>	<b>valores</b>
temperatura del baño	25±0.5 °C
temperatura ambiente	≈15–30 °C
presión del baño (atmosférica)	≈600–580 mm Hg
Diámetros de los tubos capilares	0.4, 0.8, 1.2 mm
longitudes de los tubos	0.5, 1.0, 1.5 m
Fluido mojante (fluido 1)	agua tridestilada
Fluido no mojante (fluido 2)	soltrol - 170
condiciones de los tubos capilares	Lavados y secos

Tabla 2.3 condiciones iniciales de los experimentos.

**2.5.1 Colocación del tubo.** Se coloca el tubo capilar sobre el soporte, haciendo coincidir el extremo de alimentación del tubo con el origen de la escala del soporte. Cabe señalar que este extremo de alimentación es el que se escogió como entrada del agua en cada uno de los tubos. Es decir, si inicialmente se realizó el experimento con la colocación del agua en cierto sentido del tubo, ese mismo sentido se deberá respetar en los experimentos posteriores con el propósito de no afectar a la velocidad de la interfaz, ya que se observó que dicha velocidad se ve afectada con el cambio de sentido de saturación.

Una vez colocado el tubo sobre el soporte, se sujeta con pedazos de cinta plástica adhesiva transparente (para que no tape la escala) como indica la figura 2.3, con el fin de proteger el tubo ante cualquier tipo de movimiento. Lo anterior se realiza dentro de la cámara de baño térmico, usando guantes y cubre-bocas para evitar contaminar los tubos.



**Figura 2.3** Esquema de la colocación del tubo sobre el soporte.

**2.5.2 Nivelación.** Una vez que el tubo capilar se coloca sobre su soporte, se procede a nivelarlo; esto se realiza con ayuda de un nivel de burbuja que se coloca encima del tubo sobre el soporte y moviendo los tornillos de cada una de los cuatro soportes giratorios (niveladores de la figura 2.1). La nivelación de cada tubo se hace para que los experimentos no sean afectados por la fuerza de gravedad y garantizar que las únicas fuerzas involucradas son las fuerzas capilares.

**2.5.3 Enfoque.** Para obtener un enfoque nítido del avance del menisco, antes de empezar el experimento es necesario ajustar la distancia de la lente de la video-cámara al centro transversal del tubo, siendo esta distancia de aproximadamente 21cm.

**2.5.4 Encendido del sistema térmico.** El siguiente paso es encender; tanto el control de temperatura como el programa para el registro de la misma. Al encender el control, se encienden las fuentes de calor y los ventiladores con el propósito de esparcir aire caliente por todo el interior de la cámara, hasta alcanzar la temperatura de  $25 \pm 0.5$  °C. En el instante que se enciende el programa, se comienza a medir los valores de la misma en el interior. Cabe señalar que en este proceso, se introducen ambos fluidos dentro de la cámara, cada uno con su sistema de alimentación, con el propósito de alcanzar el equilibrio térmico junto con todo el interior. Este proceso lleva un tiempo aproximado de 30 min.

**2.5.5 Preparación del sistema de video-filmación.** A continuación se debe preparar la cámara; con una cinta nueva adentro y confirmar todas las conexiones. Se enfoca el extremo de alimentación del tubo capilar para ver la introducción del aceite al inicio del experimento y posteriormente seguir el menisco hasta que recorra todo el tubo.



**2.5.6 Saturación del tubo capilar con el fluido 1.** Una vez que se alcanzó la temperatura deseada en todo el interior de la cámara, con ayuda del alimentador, se satura el tubo con aceite por el extremo ya escogido. En este paso se trata de seguir la interfaz aceite-aire con la cámara, hasta que el aceite llegue al otro extremo del tubo capilar. sin embargo, estos datos no se ocupan en los resultados de este trabajo.

**2.5.7 Inicio del experimento.** Lo siguiente es depositar el agua tridestilada (que es el fluido desplazante o mojante) en el interior del tubo capilar (inicialmente lleno de aceite soltrol) para iniciar el proceso de imbibición espontánea. Es importante diferenciar ambos extremos de cada tubo, por lo que se marca el extremo escogido para la saturación. Todo esto se hace bajo una buena iluminación generada con una lámpara grande de neón colocada por encima de la cámara.

## 2.6 Método de medición.

Durante el experimento, se da un seguimiento del menisco con la videocámara, teniendo cuidado de que la gota depositada en la entrada no se caiga o no se consuma haciendo que el menisco se detenga. También se debe mantener un buen enfoque de la interfaz y la escala, para tener una buena resolución de imágenes y poder analizarlas.

Todos los procedimientos antes mencionados se anotan en una bitácora de laboratorio para tener un control de las variables en juego.

Lo siguiente es obtener la velocidad del menisco en cada uno de los experimentos, por lo que se analiza cada una de las cintas de video, y se les sustraen las distancias y el tiempo en que las recorre. El método es muy sencillo ya que como la videgrabadora tiene un cronómetro interno que indica la duración de cada cinta, éste se aprovecha para obtener los tiempos en los que el menisco atraviesa cada centímetro y así obtener una tabulación de tiempo en minutos contra longitud en centímetros, el problema es en los cambios de cinta debido a que en esos instantes no hay continuidad en los tiempos, así que se registra el tiempo "real" en que se acaba la cinta y comienza la otra y simplemente se hace una regla de tres, y a los datos siguientes se les suma este primero, ya que estos se vuelven a obtener del cronómetro de la video. La conversión de tiempo es posible gracias a que la videocámara está registrando continuamente el tiempo en el que esta sucediendo el experimento, llamando a este tiempo, el tiempo real.

## CAPÍTULO 3

### Análisis de resultados.

Debido a que este trabajo considera a los tubos capilares como un sistema unidimensional para el estudio de la imbibición espontánea, las variables en juego son: la velocidad de la interfaz agua-aceite durante el recorrido dentro del capilar, el diámetro interno de éste y la longitud del mismo. Se consideran parámetros relevantes como: la dirección de saturación de aceite al tubo seco y la limpieza de la superficie interna de los tubos. En este capítulo se tratará de dar una explicación detallada de los resultados experimentales obtenidos a partir del análisis de las cintas de video que fueron grabadas a lo largo de esta investigación, dando una interpretación objetiva de las tablas y gráficas que se construyeron a partir de dichas mediciones.

Un experimento inicia en el momento en el que se comienza a suministrar agua al tubo capilar, el cual es inicialmente saturado con aceite. Los experimentos consisten básicamente en seguir visualmente a la interfaz durante su recorrido hasta que todo el aceite salga del tubo por el otro extremo. Sin embargo, hubo experimentos en los que la interfaz tardó demasiado tiempo en avanzar o no avanzó. Para estos casos se consideró el criterio de darle al menisco una hora para determinar si avanzó por lo menos un centímetro. Una vez transcurrido ese tiempo con el menisco detenido, se daba por terminado el experimento y se analiza la cinta hasta ese momento. Los casos en los que el menisco se detuvo antes de los primeros 10 centímetros no se consideran válidos.

Se dice que una corrida consta de un proceso de limpieza, seguido por los experimentos de imbibición en los tubos ya lavados. El proceso de limpieza consiste de una secuencia de operaciones (de limpieza), donde en cada operación se llena el tubo capilar con una sustancia de limpieza, se deja un intervalo de tiempo y se enjuaga con agua tridestilada. Una corrida de limpieza consta solamente de un proceso de limpieza, y una corrida experimental consiste en los experimentos de imbibición realizados.

Se realizaron nueve experimentos diferentes (uno por cada tubo), cada uno repetido ocho veces dando un total de 72 experimentos. De éstos, sólo 54 fueron considerados en los resultados. En los 18 experimentos restantes la interfaz no tuvo un avance significativo.

### 3.1 Historial de lavado de tubos.

En este trabajo se realiza un total de 8 corridas de limpieza de tubos, seguidas por sus correspondientes corridas experimentales, es decir, se manejó un total de 8 corridas.

En las siguientes tablas se muestra el historial de lavado de tubos. En cada tabla de lavado de tubos, se indica el orden consecutivo de las operaciones con cada sustancia utilizada, el tiempo en que deben permanecer los tubos llenos de dicha sustancia y el tipo de la sustancia que le corresponde.

Debido a que el tratamiento utilizado por Hernández <sup>[2]</sup> fue la base para realizar el sistema de limpieza de los tubos, las primeras seis corridas de limpieza se realizaron siguiendo su método. Sin embargo, en las 2 últimas (corridas de limpieza 7 y 8) se hicieron modificaciones, tanto en el tiempo de permanencia de los tubos en las sustancias, como en la cantidad de veces de uso de cada sustancia, alterando el número de operaciones. Esto se hizo con el objeto de determinar alguna diferencia entre las últimas y las primeras corridas experimentales.

En la tabla de lavado de tubos 3.1.1 se muestra las dos primeras corridas de limpieza 1 y 2.

Lavado de tubos				
Número de operación	Corrida de limpieza 1 Hora de inicio	Corrida de limpieza 2 Hora de inicio	Tiempo de permanencia	Sustancia
1	8:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Solvente thinner
2	20:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Solución Extrán
3	8:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Mezcla Crómica
4	20:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Acido Clorhídrico
5	8:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Solución Extrán
6	20:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Agua Destilada

Tabla 3.1.1 Proceso de lavado para las dos primeras corridas.

La tabla de lavado de tubos 3.1.2 contiene las corridas de limpieza 3 y 4.

Lavado de tubos				
Número de operación	Corrida de limpieza 3 Hora de inicio	Corrida de limpieza 4 Hora de inicio	Tiempo de permanencia	Sustancia
	1	20:00 hrs.		
2	8:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Solución Extrán
3	20:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Mezcla Crómica
4	8:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Acido Clorhídrico
5	20:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Solución Extrán
6	8:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Agua Destilada

Tabla 3.1.2 Proceso de lavado para las corridas 3 y 4.

La tabla 3.1.3 contiene las corridas de limpieza 5 y 6. Esta tabla, al igual que las tablas anteriores, no ha sufrido cambios en el método de limpieza, por lo que también utiliza las mismas condiciones de lavado.

Número de operación	Lavado de tubos		Tiempo de permanencia	Sustancia
	Corrida de limpieza 5	Corrida de limpieza 6		
	Hora de inicio	Hora de inicio		
1	8:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Solvente thinner
2	20:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Solución Extrán
3	8:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Mezcla Crómica
4	20:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Acido Clorhídrico
5	8:00 hrs.	8:00 hrs.	12 hrs.	Solución Extrán
6	20:00 hrs.	20:00 hrs.	12 hrs.	Agua Destilada

**Tabla 3.1.3** Proceso de lavado para las corridas 5 y 6.

En la tabla 3.1.4, correspondiente al proceso de lavado para las corridas 7 y 8, se observan modificaciones al método de limpieza. Estas modificaciones se realizan solamente para estas dos últimas corridas de limpieza.

Número de operación	Lavado de tubos		Tiempo de permanencia	Sustancia
	Corrida de limpieza 7	Corrida de limpieza 8		
	Hora de inicio	Hora de inicio		
1	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Solvente thinner
2	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Solución Extrán
3	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Mezcla Crómica
4	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Acido Clorhídrico
5	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Mezcla Crómica
6	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Acido Clorhídrico
7	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Solución Extrán
8	8:00 hrs.	8:30 hrs.	24 hrs.	Agua Destilada

**Tabla 3.1.4** Proceso de lavado para las corridas 7 y 8, modificando el método de lavado.

Como se comentó arriba, a diferencia de las tablas anteriores, en las corridas de limpieza de la tabla 3.1.4 se anexaron dos pasos más en los cuales a cada tubo se le hizo repetir las saturaciones: mezcla Crómica y ácido clorhídrico (operaciones 5 y 6). Además, los tiempos de permanencia de los tubos en las sustancias fueron del doble que para los casos anteriores. Estas modificaciones se realizaron con el objetivo de estudiar la influencia del proceso de limpieza en las velocidades de desplazamiento del menisco.

### 3.2 Historial de los experimentos.

Como se sabe, para la realización de los experimentos se requiere que los tubos hayan pasado por el tratamiento de limpieza y que posteriormente sean secados. A continuación se presenta el historial de experimentos realizados, separados por corridas experimentales de nueve experimentos cada una. La manera de presentarlo es mediante tablas en las cuales sus columnas indican: el número de experimento, longitud y diámetro interno de cada tubo, sentido de saturación, número de cintas VHS utilizadas durante el experimento y si éste fue exitoso o no. Esta última columna indica con la palabra "SI" si el menisco avanzó hasta recorrer todo el tubo, indicando que el experimento tuvo éxito y con la palabra "NO" si el menisco permaneció estático, indicando el fracaso del mismo. En la columna de sentido de saturación se indica la palabra "mismo" para indicar que la forma de saturar al tubo, inicialmente seco, con aceite fue en el mismo sentido que se hará para el depósito de agua y se indica la palabra "contrario" para el caso de saturar al tubo, con el aceite, en sentido contrario al depósito de agua (véase capítulo 2, colocación del tubo y figura 2.3).

Las tablas 3.2.1 y 3.2.2 muestran la primera y segunda corrida experimental. Estas dos tablas son complemento de la tabla de corrida de limpieza 3.1.1 para concluir las dos primeras corridas.

Corrida experimental 1					
Número de Experimento	Longitud del Tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
1	50	1.2	Mismo	3	SI
2	100	1.2	Mismo	4	SI
3	150	1.2	Mismo	7	SI
4	50	0.8	Mismo	2	SI
5	100	0.8	Mismo	2	SI
6	150	0.8	Mismo	6	SI
7	50	0.4	Mismo	?	NO
8	150	0.4	Mismo	?	NO
9	100	0.4	Mismo	1	NO

Tabla 3.2.1 Experimentos de la corrida 1.

Como se puede observar de la tabla 3.2.1 se lograron realizar 6 de los 9 experimentos programados en esta corrida experimental. Estos experimentos corresponden

a los tubos de diámetro interno 0.4 mm. Otra observación de la tabla es que con el número de cintas utilizadas en cada experimento, se puede dar una idea previa de la velocidad de imbibición, ya que cada cinta tiene una duración aproximada de 120 minutos (2 hrs.). Utilizando esta comparación se aprecia que los experimentos 3 y 6 con tubos de longitud 150 cm y diámetros 1.2 mm y 0.8 mm respectivamente fueron los que presentaron velocidad menor. A partir de la tabla 3.2.1 se puede hacer una primera observación de una notable influencia del diámetro de los tubos con el desplazamiento del menisco.

Corrida experimental 2					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
10	150	1.2	Mismo	3	SI
11	100	1.2	Mismo	1	NO
12	50	1.2	Mismo	1	NO
13	50	0.8	Mismo	?	NO
14	150	0.8	Mismo	8	SI
15	150	0.4	Mismo	1	NO
16	100	0.8	Mismo	1	NO
17	100	0.4	Mismo	1	NO
18	50	0.4	Mismo	1	NO

**Tabla 3.2.2** Experimentos de la corrida 2.

En la tabla 3.2.2 se observa una grave situación en lo que respecta al número de experimentos exitosos, ya que de los 9 experimentos programados, solamente en 2 de ellos el menisco avanzó. En el experimento 14 que corresponde al tubo de longitud 150 cm y diámetro 0.8 mm es notable su muy pequeña velocidad comparada con los demás, ya que ocupó un total de 8 cintas de video.

La tabla 3.2.3 muestra la tercera corrida experimental.

Corrida experimental 3					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
19	50	1,2	Mismo	?	NO
20	50	0,8	Mismo	?	NO

**Tabla 3.2.3** Experimentos de la corrida 3.

En esta corrida solamente se intentó hacer los experimentos 19 y 20 que corresponden a los tubos más cortos y de mayor diámetro, pues al no salir estos experimentos se supuso que la probabilidad de que salieran los demás era prácticamente nula. Ante los problemas que presentaban para obtener de ellos datos confiables, se optó por repetir el proceso de limpieza con extrán de una diferente alcalinidad, esto es, volver a

realizar la misma solución descrita en el capítulo 2 pero utilizando detergente nuevo, ya que el extrán pierde alcalinidad y poder de limpieza con el tiempo. Esta decisión se tomó por que la solución que se utilizaba era la misma ocupada para experimentos anteriores a este trabajo. Dicho lo anterior, se tuvo que volver a lavar los tubos incluyendo los que estaban limpios y que no se habían utilizado. De este modo se realizó la corrida de limpieza 4, seguida por la corrida experimental 4.

Debido a los problemas mencionados en estas dos últimas tablas es muy difícil hacer una predicción del comportamiento de la velocidad. Sin embargo, sólo los experimentos exitosos se toman en cuenta para los resultados de este trabajo.

La tabla 3.2.4 muestra la cuarta corrida experimental, señalando el cambio en la solución extrán, sin embargo, el procedimiento de lavado de tubos es el mismo que el inicial.

Corrida experimental 4 (cambio de extran)					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
21	50	1,2	Mismo	1/3	SI
22	50	0,8	Mismo	1/3	SI
23	50	0,4	Mismo	2	SI
24	100	1,2	Mismo	2	SI
25	100	0,8	Mismo	2	SI
26	100	0,4	Mismo	?	NO
27	150	1,2	Mismo	2	SI
28	150	0,8	Mismo	3	SI
29	150	0,4	Mismo	?	NO

**Tabla 3.2.4** Experimentos de la corrida 4.

Para la corrida 4 encontramos una notable mejoría de los nueve experimentos programados ya que solamente dos de ellos, que corresponden a los tubos de longitudes 100 y 150 cm de los tres de diámetro de 0.4 mm, fueron en los que no avanzó el menisco. Como en todos los demás avanzó perfectamente se consideró resuelto el problema. Se observa en la tabla 3.2.4 que la influencia de la longitud, aunado con el diámetro de los tubos afecta a la velocidad del menisco. Hasta ahora sólo un experimento en los tubos de diámetro 0.4 mm ha tenido avance en el menisco y corresponde a la longitud mínima 50 cm. Ante los resultados de esta última tabla se puede decir que la alcalinidad del detergente extrán es un factor que afecta a la velocidad de la interfaz.

En la tabla 3.2.5 se muestra la quinta corrida experimental que corresponde a la tabla 3.1.3 de lavado, recordando que la solución extrán es nueva.

Corrida experimental 5 (cambio de extran)					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
30	150	1,2	Mismo	?	NO
31	150	0,8	Mismo	?	NO

**Tabla 3.2.5** Experimentos de la corrida 5.

Al igual que la corrida experimental 3, en esta corrida cuando se comenzó a realizar los experimentos con los tubos más largos y de mayor diámetro, no hubo respuesta en el movimiento del menisco como lo indica la tabla. Debido a que en estos tubos no se habían encontrado problemas, se decidió que antes de seguir con los demás experimentos, se volvería a realizar el tratamiento de lavado de tubos, y aunque la mayoría de ellos no se utilizaron, se volvieron a lavar, realizando la corrida de limpieza 6.

De esta manera se llega a la tabla 3.2.6 donde aparece la sexta corrida experimental.

Corrida experimental 6 (cambio de extran)					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
32	150	1,2	Mismo	2	SI
33	50	1,2	Mismo	1	SI
34	100	1,2	Mismo	3	SI
35	50	0,8	Mismo	3	SI
36	100	0,8	Mismo	3	SI
37	150	0,8	Mismo	5	SI
38	100	0,4	Mismo	?	NO
39	50	0,4	Mismo	?	NO
40	150	0,4	Mismo	?	NO

**Tabla 3.2.6** Experimentos de la corrida 6.

En la tabla 3.2.6 se observa (al igual que la tabla 3.2.1) que se lograron 6 de los 9 experimentos programados para esta corrida y de nueva cuenta los experimentos donde no avanzó el menisco fueron los tubos de diámetro más pequeño (0.4mm). A diferencia de la tabla 3.2.1, en la tabla 3.2.6 observamos que en promedio se requirieron menos cintas de video, lo que indica que el menisco estuvo avanzando con una mayor velocidad.

Al notar una gran diferencia en los resultados de los experimentos, se pensó que el proceso de lavado de los tubos era insuficiente, ya que en las dos ocasiones que se repitió el proceso de limpieza de tubos donde la mayoría de los tubos fueron doblemente lavados, los experimentos, en su mayoría, terminaron satisfactoriamente (descartando la influencia de la alcalinidad del extrán con la velocidad del menisco). Así que se realizaron modificaciones al procedimiento de lavado de tubos que inicialmente se tenía como base. Las



modificaciones hechas básicamente consisten en hacer pasar a todos los tubos por los pasos de saturación en las soluciones más fuertes que son: mezcla crómica y ácido clorhídrico. Además de este cambio en el procedimiento de lavado, se decidió hacer permanecer a los tubos en cada solución el doble de tiempo, haciendo un enjuague de su propia solución a mitad del tiempo en la solución que le corresponda. De este modo se realiza la corrida de limpieza 7 de la tabla 3.1.4, donde se muestra además la corrida de limpieza 8.

Ante este cambio se llega a la tabla 3.2.7 donde se muestra la séptima corrida experimental.

Corrida experimental 7 (con 2 operaciones más en el lavado y doble tiempo de permanencia)					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
41	150	1,2	Mismo	3	SI
42	100	0,8	Mismo	5	SI
43	100	1,2	Mismo	2	SI
44	50	1,2	Mismo	1	SI
45	50	0,8	Mismo	4	SI
46	150	0,8	Mismo	?	NO
47	50	0,4	Mismo	?	NO
48	150	0,4	Contrario	3	SI
49	100	0,4	Contrario	2	SI

Tabla 3.2.7 Experimentos de la corrida 7.

Se puede observar en la corrida 7 de la tabla 3.2.7 que los experimentos que ahora fracasaron son los número 46 y 47 que corresponden a tubos de 150 y 50 cm de largo con 0.8 y 0.4 mm de diámetro respectivamente. Para los experimentos 48 y 49 se cambió el sentido de saturación de aceite, por lo que por primera vez se observó que los experimentos en los tubos de 100 y 150 cm de largo con 0.4 mm de diámetro tuvieron éxito. Este hecho se adjudica a que el sentido de saturación inicial de aceite en estos tubos fue contrario al sentido del depósito de agua para realizar imbibición espontánea.

De alguna manera se piensa que este tipo de sentido de saturación de aceite ayuda de manera relevante a que los experimentos tengan éxito, por lo que se determina que para la corrida 8 la saturación será, para los 9 experimentos, en el sentido contrario al flujo del agua en la imbibición.

La tabla 3.2.8 muestra la octava corrida experimental en donde su correspondiente de limpieza (en la tabla 3.1.4) indica que se mantienen los mismos cambios efectuados en la corrida anterior. Solo que en este caso la saturación es contraria en todos los experimentos de esta corrida.

Corrida experimental 8 (con 2 operaciones más en el lavado y doble tiempo de permanencia)					
Número de Experimento	Longitud del tubo (cm)	Diámetro int. del tubo (mm)	Sentido de Saturación	Número de cintas	Éxito del Experimento
50	150	1,2	Contrario	4	SI
51	150	0,4	Contrario	3	SI
52	150	0,8	Contrario	2	SI
53	100	1,2	Contrario	3	SI
54	100	0,4	Contrario	1	SI
55	100	0,8	Contrario	2	SI
56	50	0,4	Contrario	2	SI
57	50	0,8	Contrario	2	SI
58	50	1,2	Contrario	2	SI

**Tabla 3.2.8** Experimentos de la corrida 8.

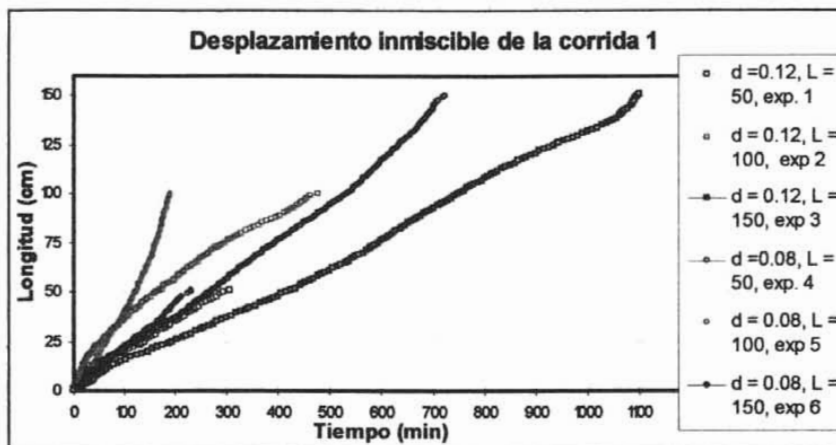
En la corrida 8 y última se observa que todos los experimentos tuvieron éxito, en particular para los hechos en los tubos de 0.4 mm de diámetro, lo cual esto no había ocurrido anteriormente. Por la cantidad de cintas utilizadas en cada uno, se puede suponer que en promedio hay una mayor velocidad del menisco comparada con los experimentos previos. Sin embargo, para los de 1.2 mm de diámetro se utilizaron, en promedio, más cintas que para experimentos anteriores con esos mismos tubos, indicando que las velocidades de los meniscos fueron en estos casos menores que las previas.

### 3.3 Resultados experimentales.

Como se ha dicho anteriormente todos los experimentos fueron filmados con el fin de obtener la distancia recorrida del menisco en función del tiempo que le lleva al agua desplazar a todo el aceite dentro del tubo hasta expulsarlo del mismo por imbibición espontánea. Toda esta información es graficada, mostrando en cada gráfica las curvas que corresponden a cada una de las 8 corridas

realizadas en este trabajo. En cada una se señalan, para cada curva, los datos de los tubos y el número de experimento. Para hacer notar la diferencia entre las curvas, se utilizan distintos tipos de puntos según el diámetro de los tubos: los cuadrados corresponden a los tubos de diámetro 0.12 cm, los círculos corresponden a los tubos de diámetro 0.08 cm y los triángulos corresponden a los tubos de diámetro 0.04 cm. Las diferencias de longitudes de cada tubo se notan observando el eje vertical. Cada gráfica está acompañada de una tabla conteniendo el listado del promedio de la velocidad de la interfaz de las curvas que se aproximan a rectas. Este promedio se realiza mediante aproximación lineal a cada curva, esto es, las pendientes de las rectas que mejor se ajustan a los datos experimentales. Para las curvas que no se aproximan a rectas, se hará un análisis posterior.

A continuación se presenta la gráfica 3.3.1 que corresponde a la tabla 3.2.1, donde se pueden observar seis experimentos realizados exitosamente de los nueve propuestos en esta corrida.



**Gráfica 3.3.1** Curvas de los resultados experimentales de la corrida 1.

De la gráfica 3.3.1 se puede observar que las velocidades de la interfaz para cada tubo tuvieron un comportamiento semi-constante, por lo que se les puede realizar la aproximación lineal a cada curva.

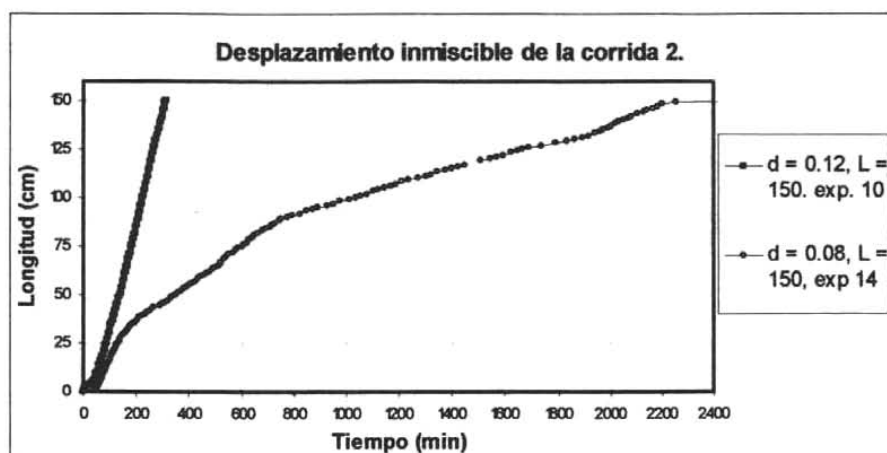
La tabla 3.3.1 muestra una lista de pendientes de las rectas supuestas que mejor se aproximan a cada curva y que parten del origen. Como se dijo anteriormente, cada pendiente denota el promedio de la velocidad de la interfaz.

Aproximación lineal para la corrida 1			
experimento numero	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm	Longitud del tubo cm
1	0,176	0,12	50
2	0,201	0,12	100
3	0,132	0,12	150
4	0,220	0,08	50
5	0,529	0,08	100
6	0,195	0,08	150

**Tabla 3.3.1.** Promedio de velocidades para la corrida 1.

En la tabla 3.3.1 podemos notar las velocidades de cada experimento de la corrida 1, aunado con los datos de los tubos que le corresponden.

La gráfica 3.3.2 muestra las curvas de los resultados graficados para la corrida 2, donde se observan que sólo dos experimentos tuvieron éxito, de los cuales solamente uno de ellos tiene comportamiento lineal.



**Gráfica 3.3.2** Curvas de los resultados experimentales de la corrida 2.

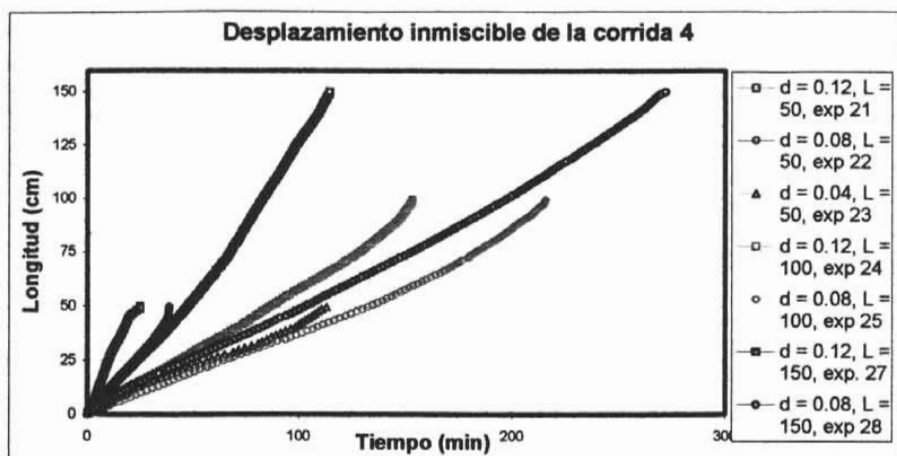
Esta gráfica, junto con su tabla correspondiente (tabla 3.2.2) da una idea del tiempo que llevaron los experimentos que tuvieron un avance significativo, de modo que en los demás experimentos, de esta misma corrida, no se dio ese avance en la interfaz.

La tabla 3.3.2 muestra la velocidad promedio del experimento que tuvo comportamiento lineal de la corrida 2, ya que el otro experimento no se toma en cuenta para una aproximación lineal debido a la forma irregular de su curva.

Aproximación lineal para la corrida 2			
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm	Longitud del tubo cm
10	0,537	0,12	150

**Tabla 3.3.2.** Promedio de velocidades para la corrida 2.

La gráfica 3.3.3 muestra las curvas de los resultados experimentales de la corrida 4, ya que ningún experimento de la corrida 3 tuvo éxito en el avance del menisco.



**Gráfica 3.3.3** Curvas de los resultados experimentales de la corrida 4.

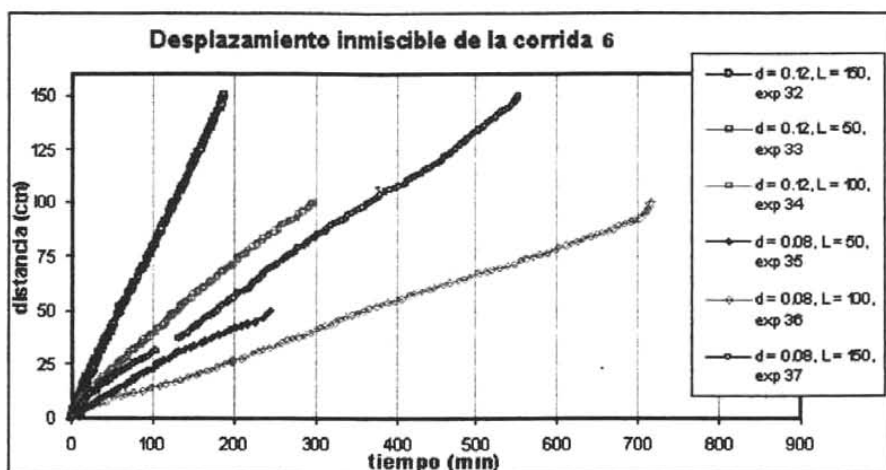
En esta gráfica tenemos las 7 curvas de los experimentos exitosos de la corrida 4. Las dos curvas faltantes corresponden a los tubos de 100 y 150 cm de largo con 0.04 cm de diámetro. Esto lleva a pensar la notable influencia del diámetro mínimo en los experimentos.

En la tabla 3.3.3 se encuentran las velocidades promedio de los experimentos para esta corrida. A las 7 curvas se les puede hacer una aproximación lineal para obtener dichas velocidades.

Aproximación lineal para la corrida 4			
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm	Longitud del tubo cm
21	2,266	0,12	50
22	1,157	0,08	50
23	0,430	0,04	50
24	0,601	0,12	100
25	0,438	0,08	100
27	1,314	0,12	150
28	0,532	0,08	150

**Tabla 3.3.3.** Promedio de velocidades para la corrida 4.

Al igual que los experimentos de la corrida 3, en la corrida 5, tampoco hubo avance en el menisco, por lo cual no hay gráfica que corresponda a dicha corrida. Sin embargo, para la corrida 6 tenemos la gráfica 3.3.4.



**Gráfica 3.3.4** Curvas de los resultados experimentales de la corrida 6.

En la gráfica 3.3.4 se muestran 6 curvas correspondientes a los experimentos exitosos de la corrida 6. Las curvas que faltan son de los experimentos con los tres tubos de 0,04 cm de diámetro. Una observación importante es el traslape de las curvas de los experimentos 32 y 33, aunque son difíciles de distinguir, se puede suponer al experimento 32 como una continuación del experimento 33, es decir, si el tubo del experimento 33 fuera más largo, se comportaría como el tubo del experimento 32.

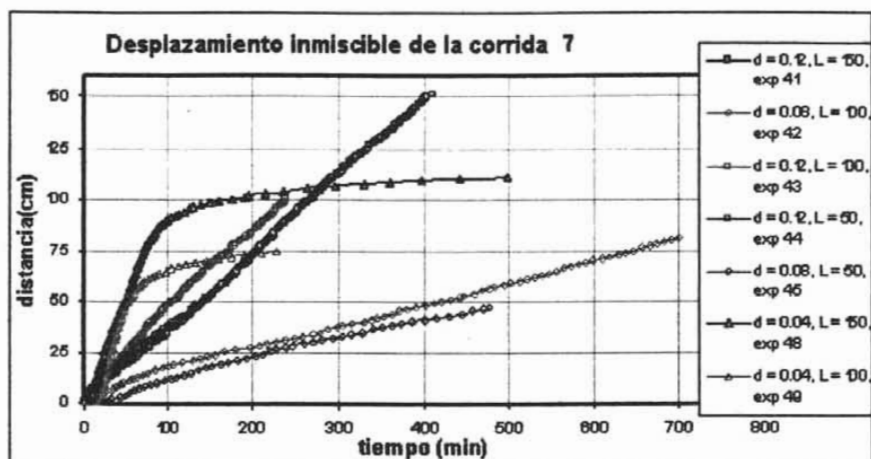
La tabla 3.3.4 muestra las velocidades promedio de los experimentos de la corrida 6.

Aproximación lineal para la corrida 6			
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm	Longitud del tubo cm
32	0,773	0,12	150
33	0,812	0,12	50
34	0,326	0,12	100
35	0,213	0,08	50
36	0,134	0,08	100
37	0,259	0,08	150

**Tabla 3.3.4.** Promedio de velocidades para la corrida 6.

A diferencia de la gráfica 3.3.4, en la tabla 3.3.4 se nota una pendiente de valor distinto para los experimentos 32 y 33, en los cuales hay una diferencia de 0.039 cm/min correspondiente a un porcentaje del 95.19 %.

Ahora se presenta la gráfica 3.3.5 correspondiente a la corrida 7, donde se muestran las siete curvas de los experimentos exitosos, de los nueve programados.



**Gráfica 3.3.5** Curvas de los resultados experimentales de la corrida 7.

Las curvas que faltan de la gráfica 3.3.5 corresponden a los experimentos con tubos de 150 y 50 cm de largo con 0.08 y 0.04 cm de diámetro respectivamente. Este hecho da una idea de lo impredecible que pueden ser los experimentos ya que no obedecen a un cierto patrón. Por otro lado, podemos observar que ahora dos de los tres experimentos en los tubos de diámetro 0.04 cm tuvieron éxito (y que no habían tenido éxito hasta ahora) a diferencia del experimento con el tubo restante de 50 cm de largo, el cual fracasó (aunque tuvo éxito anteriormente en la corrida 2). Sin embargo, de la tabla 3.2.7 se puede observar que a estos dos tubos se les hizo saturar el aceite en sentido contrario, lo que nos lleva a suponer que existe una mejoría en los experimentos al realizarles la saturación de aceite de forma contraria a la que comúnmente se realizaba. No obstante, se observa un cambio brusco en la dirección de ambas curvas, indicando un cambio a la velocidad de la interfaz, pasando de mayor a menor. Otra observación a la gráfica es que, de nueva cuenta, hay un traslape de curvas en los experimentos 41 y 44, en las que podemos suponer que una curva es la continuación de la otra, ya que ambas pertenecen a tubos del mismo diámetro (0.12 cm). Una observación similar se muestra para los dos tubos de diámetro 0.08 cm, notando un comportamiento parecido en la velocidad de la interfaz, debido a sus inclinaciones similares.

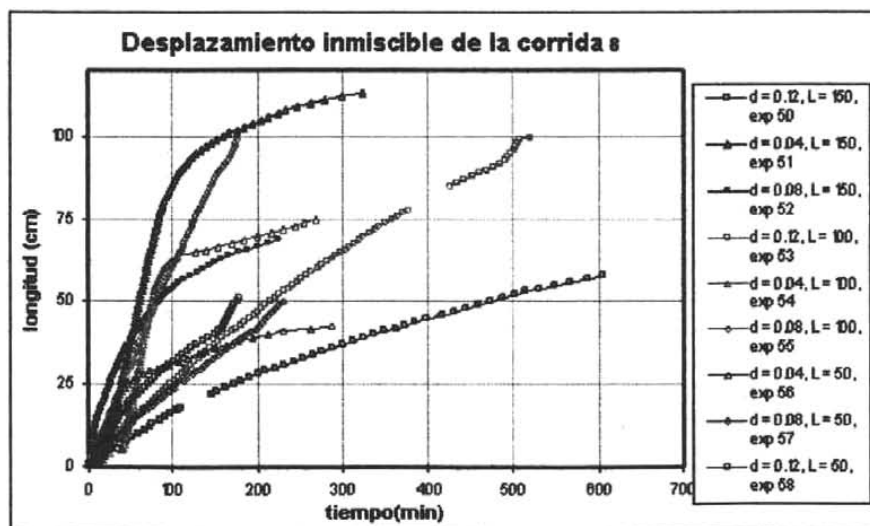
Para la corrida 7 tenemos que los promedios de las velocidades se muestran en la tabla 3.3.5, en la cual sólo se tomó en cuenta las curvas más parecidas a rectas. Las curvas que no se consideran en el listado de la tabla corresponden a los experimentos 48 y 49, pertenecientes a los realizados en los tubos de 0.04 cm de diámetro y que se les saturó el aceite en sentido contrario. Estos dos experimentos muestran una desaceleración en sus curvas.

Aproximación lineal para la corrida 7			
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm	Longitud del tubo cm
41	0,369	0,12	150
42	0,109	0,08	100
43	0,410	0,12	100
44	0,364	0,12	50
45	0,100	0,08	50

Tabla 3.3.5. Promedio de velocidades para la corrida 7.

De la misma manera que la corrida anterior, encontramos que las pendientes de las rectas de los experimentos 41 y 44 se traslapan en la gráfica 3.3.5, mostrando una diferencia de 0.005 cm/min correspondiente a un porcentaje del 98.6%.

Para la última corrida tenemos la gráfica 3.3.6 que se muestra a continuación.



Gráfica 3.3.6 Curvas de los resultados experimentales de la corrida 8.



Las curvas experimentales de la gráfica 3.3.6 muestran que los nueve experimentos propuestos de la corrida 8 tuvieron éxito, sin embargo, es notorio el cambio brusco de inclinación para los tubos de diámetro 0.04 cm. hay que recordar que para esta corrida a los nueve tubos se les hizo saturar el aceite en sentido contrario a la imbibición.

La tabla 3.3.6 muestra, solamente, cuatro velocidades promedio de las nueve curvas de la gráfica 3.1.6, esto es debido a que estas curvas son las que mejor se aproximan a rectas (como se puede apreciar de la gráfica descrita). Las pendientes de las curvas que no aparecen en la tabla 3.3.6 y que corresponden a los experimentos 51, 52, 54, 56 y 58, se les hará un análisis posterior.

Aproximación lineal para la corrida 8			
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm	Longitud del tubo cm
50	0,095	0,12	150
53	0,186	0,12	100
55	0,562	0,08	100
57	0,221	0,08	50

Tabla 3.3.6. Promedio de velocidades para la corrida 8.

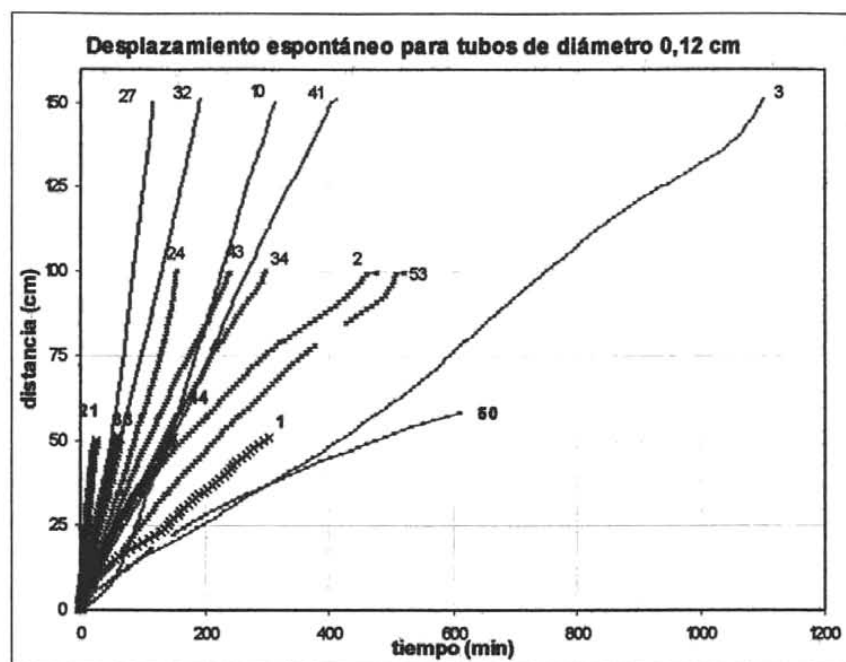
Se le hace el comentario al lector, que en algunas curvas de las dos últimas gráficas no se puede apreciar bien la longitud de los tubos, a diferencia de las demás gráficas, esto es debido a que estos experimentos no concluyen porque que el menisco no avanzó más de lo señalado por dichas curvas.

#### 3.4 Análisis comparativo entre experimentos con el mismo diámetro.

Con el fin de encontrar algún tipo de comportamiento similar entre los experimentos realizados, en esta sección se realiza una comparación entre los resultados experimentales. Dicha comparación, es tanto visual como numérica, ya que separa a las curvas que se obtuvieron en los tres diferentes diámetros, esto es, en cada gráfica de curvas del mismo diámetro hay tres diferentes longitudes, seguidas por tablas comparativas de las velocidades más parecidas entre experimentos en un mismo tubo.

A continuación se muestran tres distintas gráficas acompañadas de sus respectivas tablas de velocidad, correspondientes a los experimentos realizados en los tubos de 0.12, 0.08 y 0.04 cm, respectivamente. La convención de puntos que ahora se considera es la siguiente: Para longitud de 50 cm son signos cruz (x), para longitud de 100 cm son signos asterisco (\*) y para longitud 150 cm son signos "menos" (-). Adicionalmente cada curva tiene colocado el número de experimento que le corresponde.

La gráfica 3.4.1 corresponde a las curvas de los experimentos en los tubos de 0.12 cm de diámetro. En este conjunto de curvas sólo falta la que corresponde al experimento 58 y que se tratará posteriormente, ya que de los tres experimentos en los cuales se le hizo saturar el aceite en sentido contrario a la imbibición solamente el experimento mencionado mostró una tendencia no lineal (véase gráfica 3.3.6).



**Gráfica 3.4.1** Curvas de experimentos con tubos de 0.12 cm de diámetro.

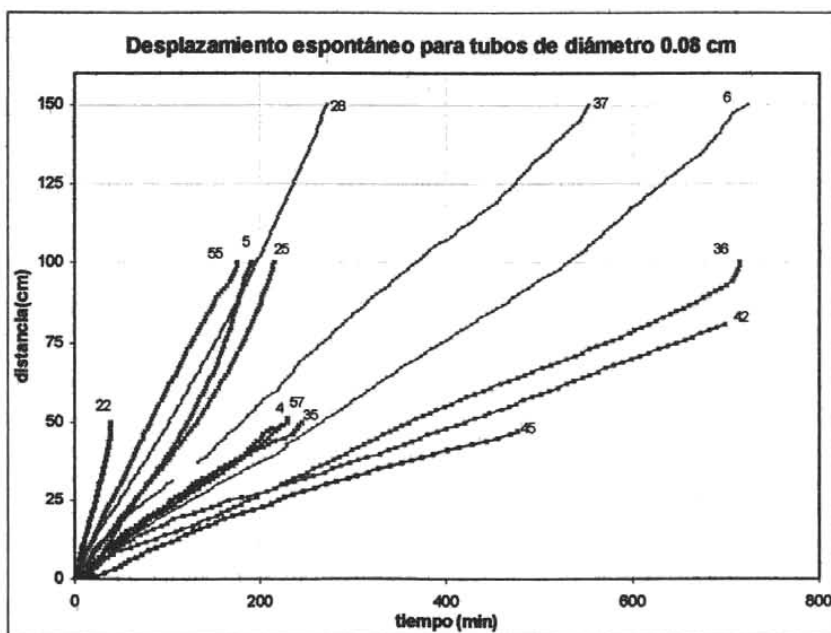
La gráfica 3.4.1 muestra las curvas de 15 experimentos hechos en los tubos de 0.12 cm de diámetro interno. Se observa que la mayoría de ellas tienen un comportamiento semejante a rectas, lo que indica que la velocidad de desplazamiento espontáneo, en promedio, para éste caso, es constante. Este hecho permite hacer el comentario de que la influencia, tanto de el cambio en el proceso de lavado como el sentido de saturación de aceite en los tubos, no son factores que afecten a la velocidad de la interfaz, ya que, no hay un cambio notable en las pendientes de las curvas de los experimentos a los cuales se les hizo tales modificaciones. Por otro lado, es importante señalar que la curva trunca, correspondiente al experimento 50, se tomará en cuenta para su análisis posterior.

La tabla 3.4.1 contiene las velocidades de desplazamiento del menisco de cada una de las curvas de la gráfica 3.4.1, así como la longitud de los tubos por donde se desplaza.

Aproximación lineal para los experimentos en los tubos de 0,12 cm de diámetro		
experimento número	velocidad cm/min	longitud cm
1	0,176	50
2	0,201	100
3	0,132	150
10	0,537	150
21	2,266	50
24	0,601	100
27	1,314	150
32	0,773	150
33	0,812	50
34	0,326	100
41	0,369	150
43	0,41	100
44	0,364	50
50	0,095	150
53	0,186	100

**Tabla 3.4.1** Velocidades de los experimentos de los tubos de 0.12 cm de diámetro.

A continuación se muestra la gráfica 3.4.2 que corresponde a los tubos de 0.08 cm de diámetro.



**Gráfica 3.4.2** Curvas de experimentos con tubos de 0.08 cm de diámetro.

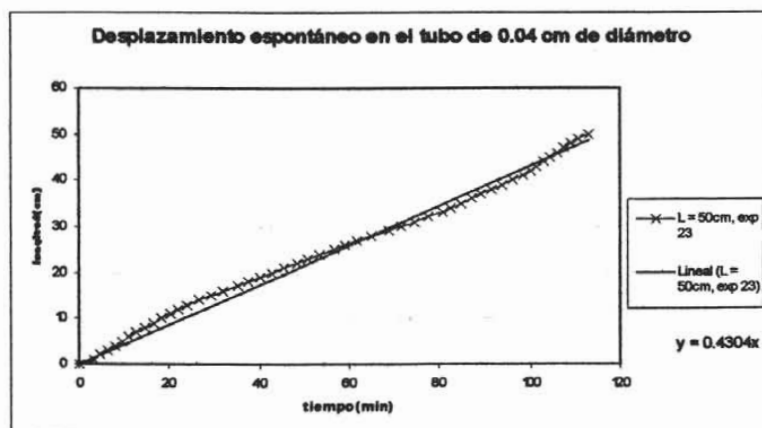
En la gráfica 3.4.2, además del notable parecido entre las curvas 4, 57 y 35 que se comentó anteriormente, también es notoria la tendencia lineal de la mayoría de ellas, por lo que se puede afirmar que el comportamiento en promedio de la velocidad de desplazamiento inmiscible para este diámetro, también es constante.

La tabla 3.4.2 muestra los valores de las velocidades de desplazamiento para los experimentos en los tubos de 0.08 cm de diámetro.

Aproximación lineal para los experimentos en los tubos de 0,08 cm de diámetro		
experimento número	velocidad cm/min	longitud cm
4	0,22	50
5	0,529	100
6	0,195	150
22	1,157	50
25	0,438	100
28	0,532	150
35	0,213	50
36	0,134	100
37	0,259	150
42	0,109	100
45	0,1	50
55	0,562	100
57	0,221	50

Tabla 3.4.2 Velocidades de los experimentos de los tubos de 0.08 cm de diámetro.

Para terminar con este análisis, la gráfica 3.4.3 muestra la única curva, de los experimentos en el tubo de diámetro 0.04 cm que tiene tendencia lineal.



Grafica 3.4.3 Curva de experimentos con tubos de 0.04 cm de diámetro.

La tabla 3.4.3 da la velocidad de desplazamiento para este tubo.

Aproximación lineal para los experimentos en los tubos de 0,04cm de diámetro		
experimento número	velocidad cm/min	longitud cm
23	0,43	50

**Tabla 3.4.3** Velocidades de los experimentos de los tubos de 0.04 cm de diámetro.

Cabe recordar que los demás experimentos en este diámetro no volvieron a tener un avance significativo en el menisco. Sin embargo, cuando los tubos fueron sometidos a saturación del aceite en sentido contrario a la imbibición, después de este experimento, mostraron curvas distintas de rectas que se analizan después. La curva de la gráfica 3.4.3 muestra un comportamiento que bien se le puede hacer una aproximación lineal. Esta aproximación, es mostrada por la recta oscura y su ecuación.

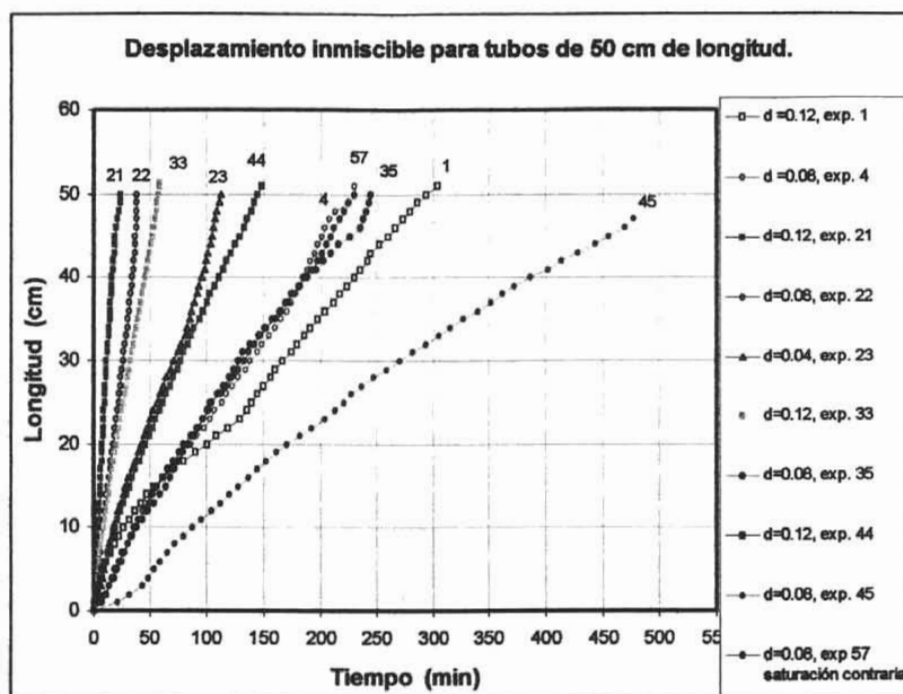
### 3.5 Análisis de comparación entre experimentos con la misma longitud.

Del mismo modo que en la sección anterior, en esta sección se realiza la comparación de los experimentos, utilizando las mismas curvas pero ahora separadas por su longitud, esto es, cada gráfica contiene curvas de experimentos realizados en tubos de la misma longitud para tres diferentes diámetros internos.

Las siguientes gráficas consideran la convención de la forma de puntos de las curvas hecha anteriormente en la sección 3.3, es decir, los cuadrados corresponden a los tubos de diámetro 0.12 cm, los círculos corresponden a los tubos de diámetro 0.08 cm y los triángulos corresponden a los tubos de diámetro 0.04 cm. Cabe señalar que las curvas que se presentan son sólo las que corresponden a las listadas en las tablas 3.3.1 – 3.3.6, esto quiere decir, que el análisis de las curvas se realiza para las que tienen tendencia a ser rectas. Las curvas faltantes se presentarán en conjunto que posteriormente serán analizadas por separado. Las siguientes gráficas muestran los experimentos hechos a los tubos con los tres distintos diámetros utilizados en el presente trabajo.

Debido a que la gran cantidad de curvas colocadas en una sola gráfica no ayuda a la fácil comparación, en esta sección se determinó colocarles, a todas las curvas de todas las gráficas, el número del experimento que le corresponde y de este modo facilitar la comparación de una curva con otra.

La gráfica 3.5.1 contiene las curvas de los experimentos realizados que comprenden a los desplazamientos en tubos de 50 cm de longitud.



**Gráfica 3.5.1** Curvas de experimentos con tubos de 50 cm de longitud.

En la gráfica 3.5.1 están los experimentos hechos con los tubos de 50 cm de largo de todas las corridas. Las curvas con los mismos diámetros, en realidad son experimentos hechos al mismo tubo. En los experimentos del tubo de 0.08 cm de diámetro se puede notar una similitud entre los experimentos 4, 35 y 57 ya que es notorio que las curvas se traslapan en la mayor parte de su trayecto. De estos tres experimentos, el 57 indica que se le realizó la saturación de aceite en sentido contrario, mostrando una pendiente cuasi-constante y de mayor inclinación comparada con la de otros experimentos hechos en ese mismo tubo, esto muestra la influencia de la velocidad de desplazamiento ante este cambio. En lo que respecta al tubo de 0.12 cm, solamente el primer experimento, en ese tubo, se llevó más tiempo que los posteriores ya que se observa que los demás experimentos tardaron menos de 150 min. Una de las cosas que se puede observar de esta gráfica, es que el desplazamiento no es mayor para tubos de mayor diámetro.

A continuación se presenta la tabla 3.5.1, en la cual se muestran los promedios de las velocidades del menisco de cada uno de los experimentos en los tubos de 50 cm de longitud, realizados mediante aproximación lineal. Los resultados se presentan en orden de diámetro del tubo.

Aproximación lineal para los experimentos en los tubos de 50 cm de longitud		
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm
23	0,430	0,04
4	0,220	0,08
22	1,157	0,08
35	0,213	0,08
45	0,100	0,08
57	0,221	0,08
1	0,176	0,12
21	2,266	0,12
33	0,812	0,12
44	0,384	0,12

**Tabla 3.5.1.** Velocidades en los experimentos de los tubos de 50 cm de longitud.

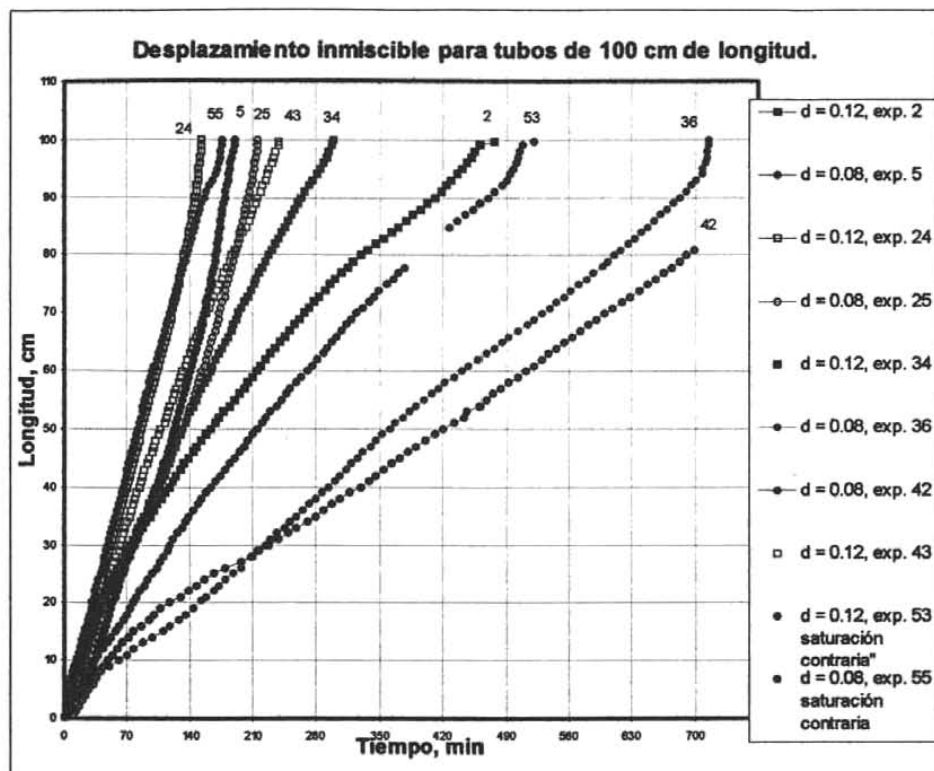
Con ayuda de la tabla 3.5.1 se puede cuantificar la semejanza observada entre los experimentos 4, 35 y 57 del tubo de 0.08 cm de la gráfica 3.5.1, en los que se obtiene una diferencia de velocidades no mayor a 0.007 cm/min entre ellos. Este resultado sólo comprueba que en promedio los tres experimentos tuvieron un avance semi-similar. El experimento 57, al cual se le saturó al tubo el aceite en sentido contrario a la imbibición, muestra una velocidad mayor (0.221 cm/min) que la de los otros dos. Esto contribuye a la hipótesis de que el sentido de saturación del aceite influye con la velocidad de la interfaz. El promedio de velocidades para el tubo de 0.08 cm de diámetro es de 0.382 cm/min. Algo notable de los experimentos en este tubo, es la velocidad tan grande del experimento 22 (1.157 cm/min) en comparación con los demás de ese mismo tubo.

Para el tubo de 0.04 cm de diámetro, el experimento 23 muestra una velocidad de 0.430 cm/min y es el único que se obtuvo de longitud de 50 cm.

Para el caso de los experimentos con el tubo de 0.12 cm de diámetro, se obtuvo un promedio de 0.905 cm/min. Del mismo modo que el tubo anterior, el experimento 21 es el que mostró una mayor velocidad (2.226 cm/min) de este conjunto de experimentos con este diámetro.

Estos resultados indican que los experimentos en el tubo de diámetro 0.08 cm tienen, en promedio, menor velocidad que los experimentos en el tubo de 0.12 cm. La diferencia entre estos dos valores es de 0.522 cm/min equivalente a un 42.2%. Estas observaciones son, hasta ahora, una consideración importante, aunque apresurada, para las conclusiones de este trabajo.

Para los experimentos de los tubos de 100 cm de largo, la gráfica 3.5.2 muestra las curvas de los tres distintos diámetros internos. De antemano, se hace la aclaración de que los puntos que faltan en algunas curvas son debido a un fallo en la cámara de video.



**Grafica 3.5.2** Curvas de experimentos con tubos de 100 cm de longitud.

Lo que se puede observar de la gráfica 3.5.2, es que se pueden formar pares de curvas que responden a un comportamiento similar, por ejemplo: para las parejas de experimentos 36 y 42 y 5 y 25, pertenecientes al tubo de 0.08 cm de diámetro, muestran en la mayoría de sus trayectos una inclinación parecida entre cada pareja. En tanto, para la pareja de curvas de los experimentos 43 y 34 que corresponden al tubo de diámetro 0.12 cm, también hay un parecido en la mayor parte del trayecto de ambas curvas. Este tipo de análisis no puede ser tomado como patrón de reproducibilidad ya que en la misma gráfica se puede ver a la pareja de curvas 24 y 55 en donde los experimentos son realizados a tubos diferentes (0.08 y 0.12 cm) y sin embargo muestran un comportamiento similar en la mayoría de su trayecto, este contraejemplo también existe, aunque menos pronunciado, en la pareja de curvas 2 y 53.

Haciendo el análisis con el tubo de 0.12 cm, en la gráfica 3.5.2 se observa que el experimento 53 es el de menor pendiente, cabe recordar que la saturación de aceite para este experimento fue en sentido contrario al flujo del agua en la imbibición.

Por último, se tiene que la curva del experimento 55, en el cual la saturación también es contraria, tiene un comportamiento muy recto (a excepción de los últimos



centímetros) siendo éste experimento el de mayor pendiente de los realizados al tubo de 0.08 cm. Es notorio que el cambio en la velocidad de desplazamiento en los experimentos se ve afectado por la dirección en la saturación de aceite.

La tabla 3.5.2 muestra las velocidades obtenidas con aproximación lineal para tubos de 100 cm de longitud.

Aproximación lineal para los experimentos en los tubos de 100 cm de longitud		
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm
5	0,529	0,08
25	0,438	0,08
36	0,134	0,08
42	0,109	0,08
55	0,562	0,08
2	0,243	0,12
24	0,601	0,12
34	0,326	0,12
43	0,410	0,12
53	0,186	0,12

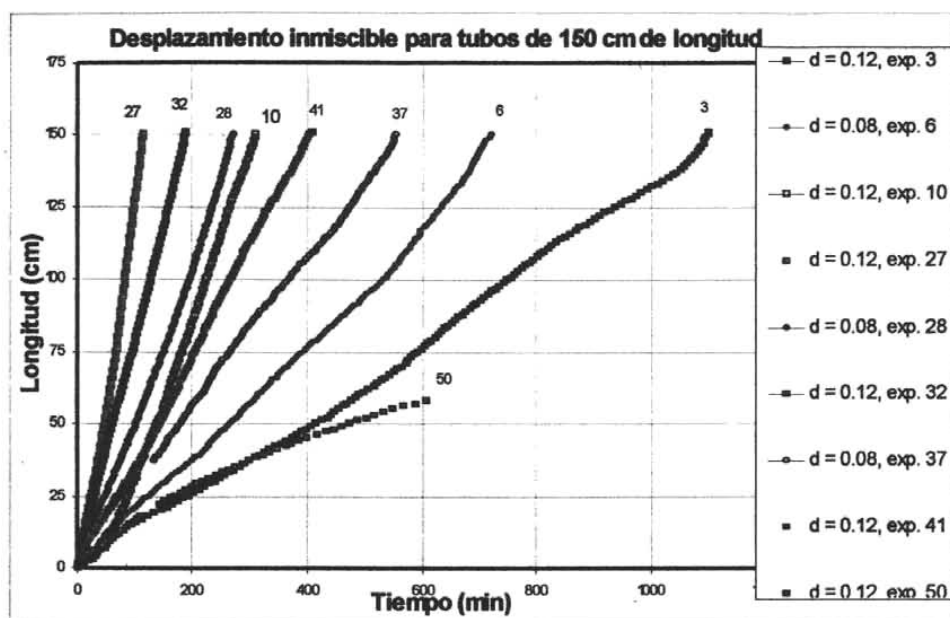
**Tabla 3.5.2.** Velocidades en los experimentos de los tubos de 100 cm de longitud.

De la tabla 3.5.2, en lo que respecta al tubo de 0.08 cm de diámetro, se obtiene que en la pareja de rectas de los experimentos 36 y 42 hay una diferencia de promedio de velocidades entre ellos de 0.025 cm/min, para la pareja de experimentos 5 y 25 se obtiene una diferencia de 0.091 cm/min. La pareja de rectas hechas con los experimentos 43 y 34 arrojó una diferencia de promedio de velocidades entre ellas de 0.084 cm/min.

El experimento 53 mostró un valor mínimo de velocidad (0.186 cm/min) comparado con los demás experimentos en el tubo de 0.08 cm, el cual esta por debajo del promedio de velocidades de ese tubo (0.354 cm/min). Mientras que el experimento 55 tuvo una velocidad máxima de 0.562 cm/min, el cual esta arriba del promedio de velocidades para los tubos de 0.12 cm (0.353 cm/min).

Estos resultados contradicen lo que suponían los obtenidos anteriormente, ya que ahora tenemos que para los tubos de 100 cm de longitud el promedio de velocidades de los tubos de 0.08 cm de diámetro es mayor por 0.001 cm/min a su similar del tubo de 0.12 cm de diámetro.

Para terminar con las comparaciones de los experimentos debido a su longitud, a continuación se presenta la gráfica 3.5.3 que contiene a los experimentos realizados en los tubos de 150 cm de largo. Seguida de esta gráfica, se muestra la tabla 3.5.3 con las velocidades promedio del menisco de cada curva.



**Gráfica 3.5.3** Curvas de experimentos con tubos de 150 cm de longitud.

La tabla 3.5.3 da las velocidades promedio de los experimentos de longitud 150 cm.

Aproximación lineal para los experimentos en los tubos de 150 cm de longitud		
experimento número	Velocidad del menisco cm/min	Diámetro del tubo cm
6	0,195	0,08
28	0,532	0,08
37	0,259	0,08
3	0,132	0,12
10	0,537	0,12
27	1,314	0,12
32	0,773	0,12
41	0,369	0,12
50	0,095	0,12

**Tabla 3.5.3.** Velocidades en los experimentos de los tubos de 150 cm de longitud.

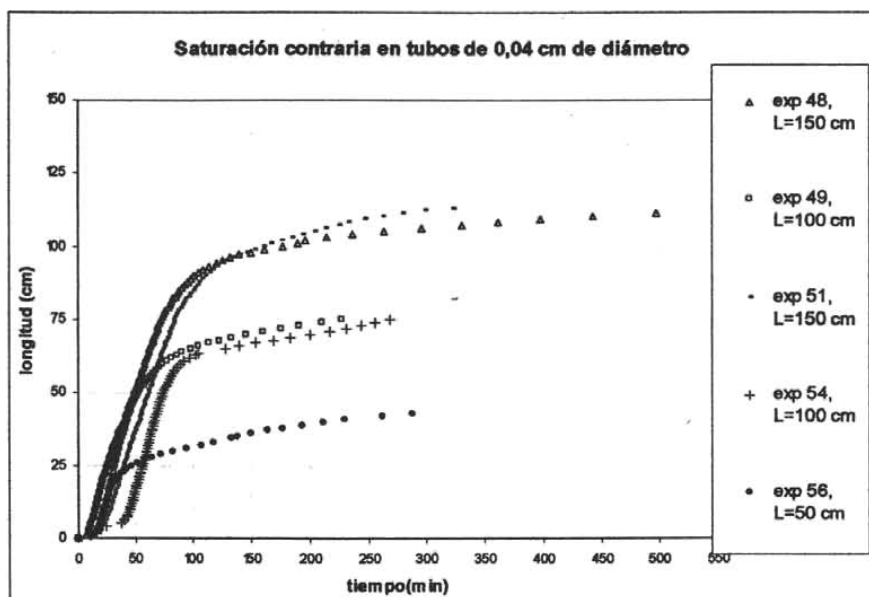
Realizando el análisis de la gráfica 3.5.3, se puede observar que para el tubo de 0.12 cm de diámetro hay un comportamiento muy parecido en los experimentos 10, 27, 32 y 41 en donde se puede apreciar que las curvas son rectas y que solamente cambian de pendiente unas con otras, lo cual se indica en la tabla 3.5.3, pero la excepción es precisamente el primer experimento con ese tubo (experimento 3) ya que esta curva es mas larga que todas las demás.

El promedio de las velocidades para el tubo de 0.08 cm de diámetro es de 0.328 cm/min y para su similar de 0.12 cm de diámetro es de 0.536 cm/min. Obteniendo que la velocidad promedio en el tubo de 0.08 cm de diámetro es menor que la correspondiente de 0.12 cm por 0.208 cm/min. Este resultado es consistente con el dado por los tubos de 50 cm de longitud.

### 3.6 Análisis de experimentos con el sentido de saturación contrario a la imbibición.

En esta sección se realiza un análisis de los experimentos que tuvieron un comportamiento no lineal y que fueron saturados de aceite en sentido contrario al flujo de agua que posteriormente desplazó espontáneamente a este aceite. Dicho análisis es por diámetro de tubo capilar.

La gráfica 3.6.1 muestra los experimentos en el tubo de 0.04 cm de diámetro.

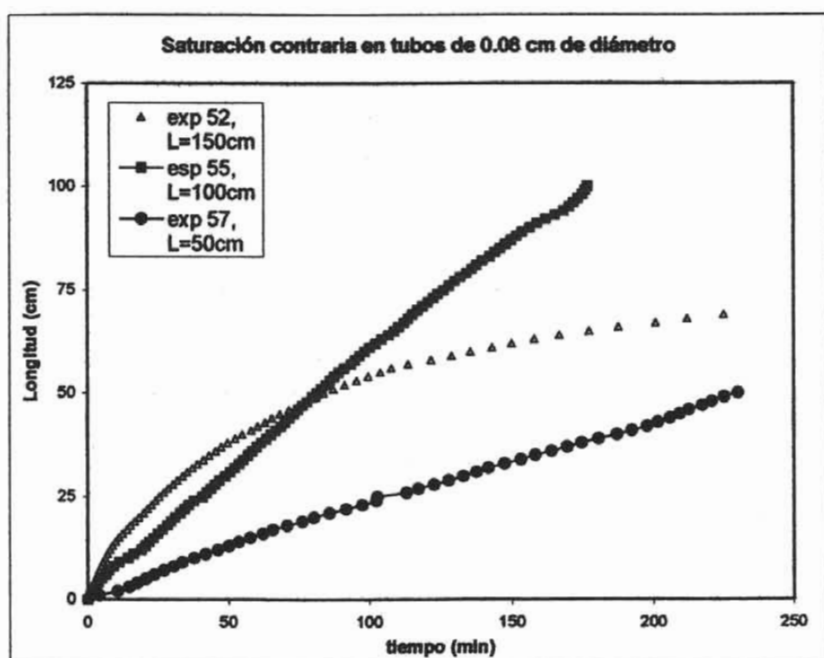


Gráfica 3.6.1 Experimentos de saturación contraria para diámetro 0.04 cm.

Podemos notar que en la gráfica 3.6.1 todas las curvas se parecen y se pueden diferenciar dos etapas: La primera tiene un comportamiento lineal hasta aproximadamente la primera mitad de cada curva. Esto indica que la velocidad de desplazamiento inmiscible es constante al principio. Todas las curvas muestran inclinaciones similares y se puede observar que los desplazamientos fueron en conjunto más rápidos que los anteriores. En la segunda etapa, la velocidad de la interfaz muestra una atenuación brusca, comparada con las demás curvas de todos los experimentos anteriores, hasta el grado de llegar a detenerse totalmente antes de terminar su proceso de imbibición al otro extremo del tubo. Una observación importante es la dependencia de los experimentos con la longitud del tubo, ya que se forman pares de curvas correspondientes a diferentes longitudes.

Se le recuerda al lector que en los experimentos anteriores en este diámetro, la interfaz se había quedado estática desde el inicio, a excepción del experimento número 23. Ante esta situación, es fácil constatar que la dirección del sentido de saturación del aceite es un parámetro relevante que afecta de manera notoria al desplazamiento de la interfaz al menos en éste diámetro capilar.

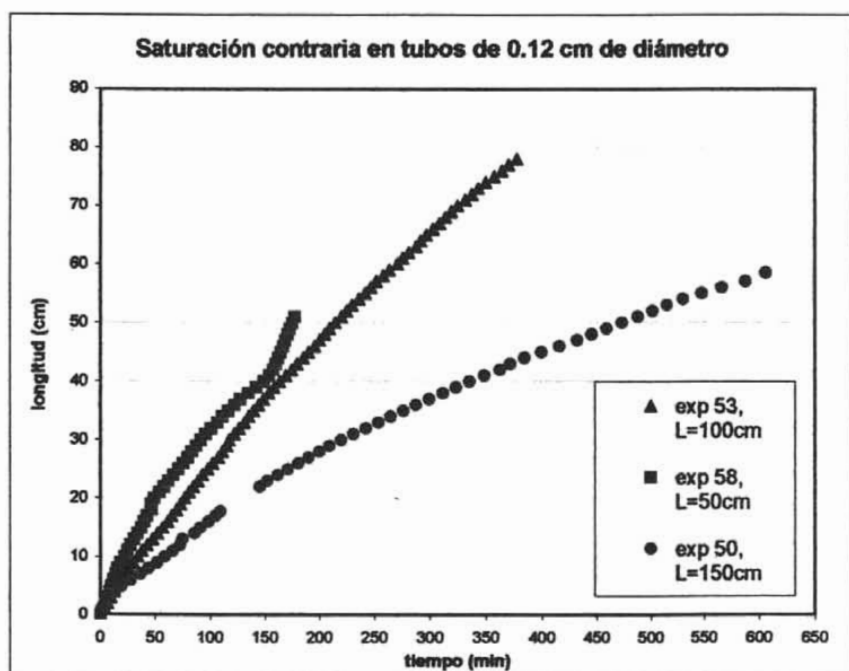
La gráfica 3.6.2 muestra las curvas para los tubos de diámetro 0.08 cm en los que también se les saturó el aceite de forma contraria a la imbibición.



**Gráfica 3.6.2** Experimentos de saturación contraria para diámetro 0.08 cm.

De la gráfica 3.6.2 se puede resaltar al experimento 52, que muestra un comportamiento no lineal, acercándose, aunque muy poco, a la forma de las curvas de la gráfica 3.6.1. Esta curva describe una atenuación gradual de la velocidad de la interfaz conforme avanza. Las otras dos curvas correspondientes a los experimentos 55 y 57 se incluyeron en los análisis anteriores por su forma parecida a rectas. Sin embargo, todos estos experimentos fueron sometidos a saturación de aceite en dirección contraria a la imbibición. Como última observación se puede ver que la curva del experimento 52 es la única que no termina su trayecto dentro del tubo ya que la interfaz se detuvo totalmente.

Para concluir este análisis se presenta en la gráfica 3.6.3 los experimentos hechos en tubos de 0.12 cm de diámetro.

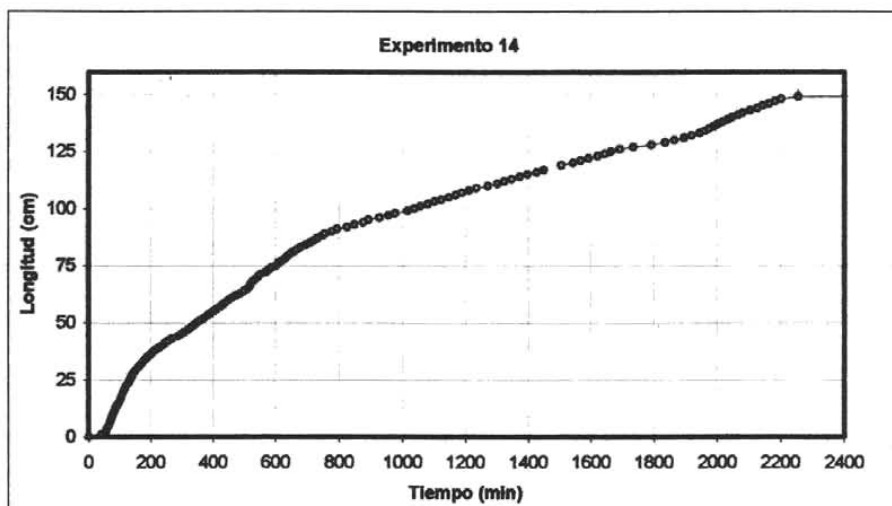


**Grafica 3.6.3** Experimentos de saturación contraria para diámetro 0.12 cm.

De la gráfica 3.6.3 se puede notar que solamente el experimento 58 termina su proceso de imbibición, ya que las otras dos curvas (50 y 53) no lo lograron. Estos últimos dos experimentos muestran un comportamiento parecido a una recta, por lo que, también se han incluido en los análisis anteriores. Cabe señalar que en ambos casos no se terminan dichos experimentos. Por otro lado, la curva del experimento 58 no muestra tendencia lineal ni tampoco forma parecida a los demás experimento del análisis de este apartado.

En todos los análisis que se han hecho para este trabajo, se han considerado los experimentos que por un lado muestran un comportamiento lineal en su curva y por otro lado pertenecen al conjunto de experimentos a los que se les saturó el aceite en sentido contrario al flujo del agua en la imbibición espontánea. Sin embargo existen experimentos que no caen dentro de estos dos conjuntos. Es decir, que aunque no se saturaron en sentido contrario al flujo de agua, no se tomaron en cuenta ya que no mostraron un comportamiento lineal.

La grafica 3.6.4 muestra al único experimento que sin haberle saturado el aceite en sentido contrario de la imbibición, del tubo de 150 cm de longitud y de 0.08 cm diámetro, mostró un comportamiento no lineal.



Gráfica 3.6.4 Curva que no muestran comportamiento lineal (diámetro 0.08 cm).

La velocidad de la interfaz del experimento 14 dado por la gráfica 3.6.4, muestra una cierta atenuación conforme ésta avanza dentro del tubo capilar. Este comportamiento es el único en su especie y cabe señalar que de todos los experimentos, fue el que la interfaz tardó más tiempo en llegar al otro extremo del tubo.

## CAPITULO 4

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Debido a que este trabajo es una investigación experimental del fenómeno de imbibición espontánea en su comportamiento unidimensional, se pretende aportar nuevas expectativas al desarrollo experimental de los procesos de imbibición. Muchos trabajos en el campo hasta ahora se han centrado en las características de la interfaz de los fluidos a considerar cuando el proceso se lleva a cabo de manera forzada y muy pocos han estudiado los procesos capilares bajo condiciones de imbibición espontánea. Aunque hace falta precisar todavía algunos aspectos en el procedimiento experimental, se ha llegado a diferentes conclusiones que se consideran de relevancia.

#### 4.1 Diseño experimental

Para que dos experimentos sean comparables entre si se debe tener cuidado que las condiciones bajo las cuales se llevan a cabo sean las mismas. Es por eso que el arreglo experimental empleado a lo largo de este trabajo pretendió aproximar exitosamente dichas condiciones como son; la temperatura, la diferencia en la fuerza de gravedad en ambos extremos de cada tubo, el deposito de agua en la entrada de los tubos, etc. por lo cual fue posible caracterizar y distinguir aspectos que juegan un papel importante en la imbibición espontánea como el sentido de saturación de aceite previo a los experimentos, entre otros. Con el diseño experimental utilizado para este trabajo se obtuvieron resultados interesantes por lo que se concluye que éste es un buen diseño para controlar algunas variables macroscópicas importantes de la imbibición espontánea. Sin embargo, para un análisis mas profundo del fenómeno se requiere, además, sistemas que puedan controlar otras variables como la humedad y la presión atmosférica dentro de la cámara de baño térmico, entre otras, ó variables microscópicas como la mojabilidad local de las paredes internas de los tubos capilares, el muestreo de desplazamientos de puntos en un aro de la interfaz, etc.

#### 4.2 Lavado de tubos

La limpieza es importante y se debe realizar de igual forma para cada tubo. En este caso se tienen dos tipos de limpieza: de tipo ácido y de tipo básico. Estos dos tipos de limpieza se refieren al tiempo de permanencia de los tubos en sustancias ácidas o básicas, ya que siempre se utilizó la misma concentración de dichas sustancias para todos los experimentos.

Aunque hubo un cambio en la alcalinidad del extrán, el cual se pensó que sería un factor determinante en los resultados, el doble lavado es sin duda una modificación al método de limpieza que se considera importante para que la interfaz tuviera un avance significativo. De esta manera se realiza el método de lavado de la tabla 3.1.4, el cual incrementa al doble el tiempo de permanencia a los tubos en todas las sustancias tanto ácidas como básicas, simulando un doble lavado de tubos. Es notorio el cambio en los

resultados referente al avance del menisco, ya que después de la modificación, los experimentos tuvieron éxito en su mayoría.

Se podría pensar que a un cierto número de repeticiones de lavado, la superficie interna de los tubos alcanzaría un estado de reproducibilidad posible. Esto debería reflejarse en el proceso de desplazamiento de los fluidos, sin embargo, se observaron distintos comportamientos de desplazamientos entre los tratamientos de limpieza efectuados a los tubos, esto se refleja por la diferencia de pendientes entre los experimentos, lo que conduce a afirmar que no se alcanzó una buena homogeneidad en la superficie interna de los tubos capilares. Sin embargo, los cambios hechos al proceso ayudaron de manera significativa a mostrar que existe una influencia de la cantidad de lavados o tiempos de permanencia en las sustancias con el desplazamiento de la interfaz.

### 4.3 Comparaciones con la ecuación de Washburn.

La ecuación de Washburn (1.14) describe una relación directa entre la velocidad de la interfaz y el radio del tubo capilar. En radios más grandes se debe notar una mayor velocidad de penetrabilidad del agua que desplaza al aceite independientemente de la longitud de desplazamiento. La tabla 4.1 muestra los comportamientos de la velocidad de la interfaz, en donde al compararlas se observa que de manera general se cumple esta condición.

velocidad de desplazamiento en función del diámetro cm/min			
Diámetro (cm)	Para longitudes de desplazamiento de:		
	50 cm	100 cm	150 cm
0,08	0,382	0,354	0,329
0,12	0,905	0,353	0,536

Tabla 4.1 Promedio de las velocidades a longitudes fijas.

La tabla 4.1 no contiene los resultados de diámetro 0.04 cm debido a que no hubo comportamiento lineal en ellos.

La misma relación 1.14 indica una proporcionalidad directa del cuadrado de la longitud de penetración del agua desplazando al aceite, con el tiempo de saturación del tubo. Dicha expresión fue encontrada por Washburn realizando experimentos en tubos capilares de radios menores a medio milímetro. La relación no garantiza el comportamiento para capilares de radio más grande. Los resultados del capítulo 3 del presente trabajo muestran que el comportamiento descrito por la relación de Washburn es válido solo para los capilares de diámetro 0.04 cm. Para los capilares de diámetros 0.08 y 0.12 cm el comportamiento del desplazamiento es, en general, lineal.

La tabla 4.2 muestra los promedios de las velocidades de desplazamiento en función de la longitud de penetración.



Velocidad de desplazamiento en función de la longitud (cm/min)			
longitud (cm)	para diámetros de:		
	0,04 cm	0,08 cm	0,12 cm
50	0,43	0,382	0,904
100	-	0,354	0,345
150	-	0,328	0,536

**Tabla 4.2** Promedio de las velocidades a diámetros fijos.

#### 4.4 Cambio en el sentido de saturación de aceite.

Uno de los factores de mayor importancia para la realización de los experimentos, es sin duda el cambio en el sentido de saturación de aceite dentro del tubo y que posteriormente es desplazado por el agua. Inicialmente el aceite se saturaba en el mismo sentido que el agua dentro del tubo. Al no notar mejoría en el desplazamiento inmisible de la interfaz, se optó por saturar el tubo con aceite por el extremo contrario, esto es, en el sentido opuesto a la inyección posterior de agua dentro del tubo durante el experimento.

Los resultados obtenidos ante este cambio dieron un giro impresionante, ya que, los experimentos en los tubos de 0.04 cm de diámetro, en los cuales no se había tenido un avance significativo del menisco, se logró avance junto con todos los experimentos realizados en los demás tubos, mostrando en los experimentos hechos en este diámetro, un comportamiento en general como el descrito por la relación de Washburn (graficas 3.6.1-3).

De este modo se puede concluir este trabajo con los siguientes puntos.

- Es difícil encontrar experimentos que se repitan exactamente igual, aunque se tenga cuidado de todas las variables en juego. Sin embargo, se puede hablar de una reproducción experimental global, es decir, se observa una tendencia lineal en tubos de 1.2 y 0.8 mm de diámetro, pero sin llegar a obtener una repetibilidad local.
- Se encontró una dependencia de la longitud de penetración con la longitud del tubo capilar, solo en los tubos de 0.04 cm de diámetro y saturación contraria. Estos mismos experimentos mostraron la velocidad Terminal que se menciona como hipótesis en el trabajo de Ramirez <sup>[2]</sup>. Los demás experimentos (tubos con diámetros 0.08 y 0.12 cm) no mostraron ninguna de estas dos características.
- Para los experimentos con saturación en sentido de la imbibición, no se encontró dependencia de la velocidad de penetración con el diámetro interno del tubo capilar. Sin embargo, en los correspondientes al sentido de saturación contraria, existe una transición en la forma de las curvas entre los diámetros 0.08 y 0.04 cm.
- La saturación en sentido contrario al flujo inicial, afectó directamente a los resultados en tubos capilares de 0.04 cm. Para los otros diámetros, aunque hubo en general un mejoramiento en la velocidad de la interfaz, no es tan marcada la diferencia entre los experimentos antes y después de tal modificación, ya que se siguió mostrando un comportamiento lineal.
- La forma de las curvas obtenidas se puede explicar de la siguiente forma:

El desplazamiento inmisible en un medio capilar esta gobernado por las fuerzas capilares y viscosas, en donde al inicio domina la fuerza capilar, ya que es la única presente, conforme la interfaz avanza adentrándose, comienzan las fuerzas viscosas a contrarrestar el movimiento, sin embargo, las fuerzas capilares son de mayor magnitud comparadas con las viscosas, ya que el menisco sigue avanzando hasta desplazar el fluido no mojante hacia fuera del tubo.

- Los tubos capilares son el medio más sencillo para el análisis de imbibición espontánea unidimensional. Las modificaciones hechas; tanto a los métodos de lavado como a la forma de saturar al tubo, han repercutido de manera importante a los resultados que se esperaban comparados con trabajos previos y son aportaciones nuevas al estudio.

#### 4.5 Futuros trabajos.

A continuación se muestra un listado de las posibles investigaciones a realizar en trabajos posteriores y que son abiertas gracias a los resultados obtenidos en el presente trabajo.

- ▶ Se debe hacer un análisis de experimentos usando ambos métodos de limpieza combinando ambos sentidos de saturación.
- ▶ Utilizando las características físicas de los líquidos y los capilares se puede hacer una estimación del tiempo de imbibición.
- ▶ Se puede experimentar con matrices de tubos capilares de diferentes radios aproximándose a medios porosos.
- ▶ Desarrollar modelos alternativos al de Washburn que contemple otros aspectos que no se han contemplado aún, como la longitud del tubo capilar.
- ▶ Realizar experimentos en sentido contrario a la imbibición con tubos capilares de diámetros entre 0.08 y 0.04 cm, con el fin de estudiar la transición en la forma de las curvas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Hayashi, J. A. (2001), Proceso de Imbibición espontánea en celdas Helle-Shaw. Tesis de doctorado en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana, México D. F.
- [2] Ramirez, M. A. (1998), Estudio experimental de la imbibición espontánea en medios capilares, Tesis de Maestría en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, México D. F.
- [3] Hernandez, J. (2002), Imbibición espontánea en medios capilares unidimensionales, Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma Metropolitana, México D. F.
- [4] Washburn, E. W. (1921), *Phil. Mag.* **44**, 1152.
- [5] Dullien, F. A. L. (1998), *Journal of Porous Media* **1**, 1-29.
- [6] Collins, R. E. (1975), *Flow of fluids through porous materials*, Ed. Penn Well Books, United States of America.
- [7] Calvo A., Paterson I., Chertcoff, R., Rosen, M. y Hullin, J. P. (1921), *Journal of Colloid and Interface Science A: Physicochemical and Engineering Aspects* **141**, 384-394.
- [8] Hoffman, R., *J. Colloid Interface Sci.* **50**, 228.
- [9] Dullien, F. A. L. (1998), *Journal of Porous Media* **1**, 1-29.
- [10] Buyevich, Y. A., Hacia una teoría de nanoequilibrio multifásico de filtración de flujo, transporte en medios porosos, **21**, 145-162.
- [11] Dong, M., Dullien, F. A. L., y Chatzis, L., la imbibición de aceite en películas formadas bajo agua, presentes en bordes de capilares con sección transversal angular, *J. Colloid Interface Sci.*, **172**, 21-36.

- [12] Lenormand, R., Zarcone, C., y Sarr, A., Mecanismos de desplazamiento de un fluido por otro en mallas de ductos capilares. *J. Fluid Mech.*, **135**, 337-353.
- [13] Chatzis, I. y Dullien, F. A. L., Aplicación de la teoría de percolación para modelación del drenado en medios porosos y de permeabilidad relativa del líquido inyectado no mojable, *ICE*, **25**, 47-66.
- [14] Diaz, C. E., Chatzis I., y Dullien, F. A. L., Simulación de curvas de presione capilar usando ataduras correlacionadas ubicadas en una malla de forma cúbica, *Transporte en Medios Porosos*, **2**, 215-240.
- [15] Bird, R. B., Stewart, W. E. y Lightfoot, E. N. (1998), *Fenómenos de transporte*, Ed. Reverté, 5ª reimpresión, México.